

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2023

№ 1

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66443 от 14 июля 2016 г.)

**Журнал индексируется в Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index и SCOPUS.
The Journal is indexed in the Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index and SCOPUS.**



Томский государственный университет
2023

Учредитель – Томский государственный университет

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет, геолого-географический факультет, ауд. 242. Сайт: <http://journals.tsu.ru/geo/>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: **Врублевский В.В.**, д-р геол.-минерал. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

E-mail: vasvr@yandex.ru

Заместитель главного редактора: **Шпанский А.В.**, д-р геол.-минерал. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

Ответственный секретарь: **Асочакова Е.М.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: ev.asochakova@gmail.com

Гордиенко И.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Гутак Я.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор Сибирского государственного индустриального университета, Новокузнецк, Россия

Дорошкевич А.Г., д-р геол.-минерал. наук, заведующая лабораторией, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Евсеева Н.С., д-р геогр. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

Земцов В.А., д-р геогр. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

Изох А.Э., д-р геол.-минерал. наук, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Корогеев В.А., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Крук Н.Н., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, директор, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Кузьмин М.И., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геохимии СО РАН, Иркутск, Россия

Парначев В.П., д-р геол.-минерал. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

Поздняков А.В., д-р геогр. наук, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Ревердатто В.В., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Савичев О.Г., д-р геогр. наук, профессор Томского политехнического университета, Томск, Россия

Сазонов А.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

Скляров Е.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Соломина О.Н., д-р геогр. наук, чл.-кор. РАН, директор Института географии РАН, Москва, Россия

Худoley А.К., д-р геол.-минерал. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

Цыганков А.А., д-р геол.-минерал. наук, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Чернышов А.И., д-р геол.-минерал. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

Ярмолюк В.В., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Бэнкс Давид, CGeol, компания Holymoore Consultancy, Честерфилд, Университета Глазго, Великобритания

Гутierrez-Алонсо Г., профессор Университета Саламанки, Саламанка, Испания

Покровский О.С., ведущий научный сотрудник обсерватории Миди-Пиренейз Национального центра научных исследований, Тулуза, Франция

Чамберлейн К.Р., профессор, Университет Вайоминг, Ларами, США

Чан Чонг Хоа, Геологический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

Эрнст А.А., профессор, Гамбургский университет, Гамбург, Германия

Эрнст Р.Э., профессор Карлетонского университета, Оттава, Канада

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гертнер И.Ф., канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Горбатенко В.П.**, д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Гринев О.М.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Квасникова З.Н.**, канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Краснова Т.С.**, канд. геол.-минерал. наук, начальник научного управления, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Кужевская И.В.**, канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Лещинский С.В.**, д-р геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Лычагин Д.В.**, д-р физ.-мат. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Подобина В.М.**, д-р геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Ромашова Т.В.**, канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Севастьянов В.В.**, д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Татьянин Г.М.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Тишин П.А.**, канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия

Founder – Tomsk State University

“Geosphere Research”

International standard serial edition number: 2542-1379

Languages: Russian, English

Publication are non-commercial basis (FREE)

Open access

Contacts: 36 Lenin Avenue, Tomsk, Russia, 634050. Tomsk State University. Faculty of Geology and Geography; <http://journals.tsu.ru/geo>

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: **Vassily V. Vrublevskii**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: vasvr@yandex.ru

Deputy Editor-in-Chief: **Andrey V. Shpansky**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

Executive Editor: **Evgeniya M. Asochakova**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Assistant Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: ev.asochakova@gmail.com

Gordienko I.V., Corresponding Member of RAS, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Gutak Ya.M., Professor of the Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Doroshkevich A.G., Head of Laboratory, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Evseeva N.S., Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia

Zemtsov V.A., Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia

Izokh A.E., Professor, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Kruk N.N., Corresponding Member of RAS, Director, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Kuzmin M.I., Member of RAS, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Parnachov V.P., Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia

Pozdnyakov A.V., Professor, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

Reverdatto V.V., Member of RAS, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Savichev O.G., Professor of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Sazonov A.M., Professor of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Sklyarov E.V., Corresponding Member of RAS, Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Solomina O.N., Corresponding Member of RAS, Director of the Geography Institute RAS, Moscow, Russia

Khudoley A.K., Professor of the St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Tsygankov A.A., Director of the Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Chernyshov A.I., Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia

Yarmolyuk V.V., Member of RAS, Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

David Banks, CGeol, Holymoor Consultancy, Chesterfield, UK

Gabriel Gutierrez-Alonso, Professor of the Salamanca University, Salamanca, Spain

Pokrovsky O.S., Leading Scientist, the Observatory Midi-Pyrénées of CNRS, Toulouse, France

Tran Trong Hoa, Chief Scientist, Geological Institute of the Vietnam Academy of Sciences and Technologies, Hanoi, Vietnam

Chamberlain K.R., Research Professor, Department of Geology & Geophysics, University of Wyoming, Laramie, USA

Ernst A.A., Professor of the Hamburg University, Hamburg, Germany

Richard E. Ernst, Professor of the Carleton University, Ottawa, Canada

EDITORIAL COUNCIL

Gertner I.F., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Gorbatenko V.P.**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Grinev O.M.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Kvasnikova Z.N.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Krasnova T.S.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Kuzhevskaya I.V.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Leshchinskiy S.V.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Lychagin D.V.**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Podobina V.M.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Romashova T.V.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Sevast'yanov V.V.**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Tat'yanin G.M.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Tishin P.A.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕКТОНИКА, РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г.** Распределение температуры в субдуцирующей плите и в верхней мантии на континентальном крыле зоны субдукции 6
- Плюснин А.В., Гёкче М.И., Шаваров Р.Д., Никулин Е.В.** Геодинамические и тектонические факторы формирования и разрушения карбонатных венд-кембрийских залежей углеводородов на юге Непско-Ботубинской антеклизы 20

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, СТРАТИГРАФИЯ

- Подобина В.М.** Позднетуронская зона фораминифер – пограничные отложения Среднего мела Западной Сибири 36
- Shpansky A.V., Aidos (Novik) A.V., Sapunova L.S., Saveliev S.V., Bondarev A.A.** Metapodial pathology of ancient Ungulates 51

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ГЕОМОРФОЛОГИЯ

- Гордиенко О.А., Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Дубачева А.А., Омаров Р.С.** Оценка запечатанности почв и грунтов в городах засушливой зоны по данным дистанционного зондирования Земли 68
- Невский В.Н.** Схема формирования таксонов индуктивной геоморфологической классификации 79

ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Кнауб Р.В., Дутова Е.М., Игнатьева А.В.** Оценка энергоэкологической ёмкости территории под действием катастроф различного генезиса (на примере Сибирского федерального округа) 88
- Черных Д.В., Лубенец Л.Ф., Зиновьева А.Е., Глушкова М., Жиянски М., Яшина Т.В.** Экосистемные блага и эффективность особо охраняемых природных территорий в горах (на примере Болгарских Родоп и Русского Алтая) 106

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

- Замана Л.В., Кальная О.И., Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Кашницкая М.А.** Многолетняя климатогенная динамика водной поверхности озер Улуг-Хемской котловины (Республика Тыва) 118
- Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Scholtz O.** Оценка климатических ресурсов в Томской области в период современного изменения климата 132

CONTENTS

GEOTECTONICS, REGIONAL GEOLOGY

- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G.** Temperature distribution in a subducting plate and in the upper mantle at the continental limb of the subduction zone 6
- Plyusnin A.V., Gyokche M.I., Shavarov R.D., Nikulin E.V.** Geodynamic and tectonic factors of the formation and destruction of carbonate Vendian-Cambrian hydrocarbon deposits in the south of the Nepa-Botuoba antecline 20

PALEONTOLOGY, STRATIGRAPHY

- Podobina V.M.** Upper Turonian foraminiferal zone – boundary deposits of West Siberian Middle Cretaceous 36
- Shpansky A.V., Aidos (Novik) A.V., Sapunova L.S., Saveliev S.V., Bondarev A.A.** Metapodial pathology of ancient Ungulates 51

PHYSICAL GEOGRAPHY, GEOMORPHOLOGY

- Gordienko O.A., Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Y., Dubacheva A.A., Omarov R.S.** Assessment of soil and ground sealing in arid zone cities based on remote sensing data 68
- Nevsky V.N.** Scheme of construction of geomorphological inductive classification's taxa 79

GEOECOLOGY

- Knaub R.V., Dutova E.M., Ignateva A.V.** Assessment of energyecological capacity of a territory under the action of disasters of different genesis (on the example of the Siberian Federal District) 88
- Chernykh D.V., Lubenets L.F., Zinovyeva A.E., Glushkova M., Zhiyanski M., Yashina T.V.** Ecosystem goods and efficiency of protected areas in the mountains (Bulgarian Rhodope and Russian Altai as the case study) 106

METEOROLOGY, CLIMATOLOGY

- Zamana L.V., Noskova E.V., Kalnaya O.I., Vakhnina I.L., Kashnitskaya M.A.** Long-term climatogenic dynamics water surface of the Ulug-Khem kotlovina lakes (Tyva Republic) 118
- Cheredko N.N., Volkova M.A., Scholtz O.** Assessment of the heating season resources in the Tomsk region during the period of current climate change 132

ГЕОТЕКТОНИКА, РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.2: 551.14: 536.25

doi: 10.17223/25421379/26/1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СУБДУЦИРУЮЩЕЙ ПЛИТЕ И В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ КРЫЛЕ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

Алексей Анатольевич Кирдяшкин¹, Анатолий Григорьевич Кирдяшкин²

^{1,2} *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *aak@igm.nsc.ru*

² *agk@igm.nsc.ru*



Аннотация. Представлена модель тепловой и гидродинамической структуры субдукционной зоны, включающая схему свободноконвективных течений в астеносферном слое и слое *C*. Представлены профили температуры в субдуцирующей литосферной плите и в континентальном крыле зоны субдукции. Тепловой поток вследствие трения на границе субдуцирующей плиты и континентального крыла оказывает значительное влияние на теплообмен в зоне субдукции и на формирование температурного поля в ней. Уровень температуры в коровом слое погружающейся океанической плиты указывает на отсутствие плавления в нем.

Ключевые слова: зона субдукции, континентальное крыло, астеносфера, слой *C*, свободноконвективные течения, субдуцирующая плита, распределение температуры, теплообмен

Источник финансирования: работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 122041400057-2).

Для цитирования: Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Распределение температуры в субдуцирующей плите и в верхней мантии на континентальном крыле зоны субдукции // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 6–19. doi: 10.17223/25421379/26/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/26/1

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A SUBDUCTING PLATE AND IN THE UPPER MANTLE AT THE CONTINENTAL LIMB OF THE SUBDUCTION ZONE

Alexey A. Kirdyashkin¹, Anatoly G. Kirdyashkin²

^{1,2} *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

¹ *aak@igm.nsc.ru*

² *agk@igm.nsc.ru*

Abstract. A model of the thermal and hydrodynamic structure of the subduction zone is presented. The subduction zone, taking into account the rheology of the layers and the forces acting in it, can be conditionally divided into three main domains that have a characteristic flow structure and different velocity scales: 1) asthenospheric layer; 2) layer *C* (transition zone of the mantle); 3) subducting oceanic lithospheric plate with a joined horizontal segment of the oceanic lithosphere. At the continental limb of the subduction zone, the continental lithosphere overlies the asthenospheric layer. At the oceanic limb of the subduction zone, two layers can be distinguished: the asthenospheric layer and layer *C*. The motions in the asthenosphere and layer *C* in the oceanic and continental limbs are described as free-convection currents in the horizontal layer heated from below.

The temperature distributions in the subducting plate and in the boundary layer in the mantle beneath a continent (at the contact of the plate with the continental mantle) are determined in the approximation of non-stationary conductive heat transfer using the model of instantaneous cooling of the half-space. The obtained temperature profiles allowed us to clarify the features of heat transfer between the subducting plate and the surrounding mantle for different depths ($x = 100\text{--}600$ km).

The friction coefficient at the contact of the crustal layer with the surrounding mantle τ_{fp} is determined on the basis of the force balance of forces acting in the subduction zone. Knowledge of τ_{fp} allowed us to determine the heat flow caused by friction, $q_{\text{fp}} = 0.05\text{--}0.08$ W/m².

The results of the studies showed that the heat flow due to friction at the boundary of the subducting plate and the continental limb ($y = 0$) has a significant effect on the heat transfer in the subduction zone as well as on the temperature field. At depths up to

~ 170 km, the highest temperature (T_0) exists at this boundary, and both the plate and the continental lithosphere are heated. Heating of the mantle from the plate boundary $y = 0$ (the region of frictional heat generation) is observed in the depth range 170–250 km. Heat flow from the mantle on the continental limb to the plate decreases to zero at a depth of $x = 600$ km.

The temperature level in the crustal layer of the sinking oceanic plate indicates that there is no melting in it. The temperature level at the 670 km boundary allows for the formation of a thermochemical plume at this boundary only in the crustal layer. Melting in the crustal layer is possible at the boundary of 670 km only in the presence of chemical dope that lowers the melting point of the crustal layer of the sinking plate [Kirdyashkin et al., 2019, 2021].

Keywords: subduction zone, continental limb, asthenosphere, layer C, free-convective flows, subducting plate, temperature distribution, heat transfer

Source of financing: The study was carried out under the state assignment of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 122041400057-2).

For citation: Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. (2023) Temperature distribution in a subducting plate and in the upper mantle at the continental limb of the subduction zone. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 6–19. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/1

Введение

Субдукция представляет собой процесс погружения океанической литосферной плиты в мантию под континент или островную дугу [Добрецов и др., 2001]. Она во многом определяет структуру течений и теплообмен в мантии Земли [Добрецов и др., 2001; Turcotte, Schubert, 2002]. В большинстве работ, посвященных лабораторному моделированию субдукции, погружающаяся плита – жесткая пластина с отрицательной плавучестью, движущаяся под действием поршней или же свободно, под собственной тяжестью [Kincaid, Griffiths, 2004; Schellart, Strak, 2016]. В лабораторных экспериментах исследуется развитие вынужденных (созданных субдуцирующей плитой) течений [Strak, Schellart, 2016].

В исследованиях зон субдукции одной из основных задач является нахождение распределения температуры в субдуцирующей плите. Аналитические выражения, полученные в упрощенных моделях, должны обеспечивать понимание тепловой структуры зоны субдукции и возможность исследования интервалов ключевых параметров субдукции, оценки их неопределенности [Peacock, 2020]. В аналитических моделях рассматривается движение субдуцирующей плиты с постоянной скоростью, движение плиты вызывает течение в так называемом мантийном клине – области мантии между слэбом и поверхностью [Davies, 1999; England, Wilkins, 2004]. Для вынужденного движения используются решения для двумерного течения в угловой области. В модели, в которой плита, движущаяся с постоянной скоростью, нагревается сверху и снизу, на основе уравнения теплообмена было представлено первое двумерное аналитическое решение для ее тепловой структуры [McKenzie, 1969]. Дальнейшие работы посвящены уточнению аналитических выражений для температуры верхней границы плиты (на глубине < 50 км) [Molnar, England, 1990; England, 2018],

нахождению толщины пограничного слоя с использованием модели течения в угловой области, получению аналитических аппроксимаций для больших глубин [England, Wilkins, 2004; England, Katz, 2010]. Вводится так называемое кажущееся касательное напряжение вдоль границы субдукции, или постоянное, или возрастающее линейно с глубиной, и анализируется ее температура для этих случаев [Peacock, 2020].

В большинстве работ, посвященных двумерному численному моделированию субдукции, движение субдуцирующего слэба описывается кинематически, течение в мантийном клине задается движением слэба [Kincaid, Sacks, 1997; van Keken et al., 2002, 2011]. Термальная плавучесть в клине не учитывается, основным управляющим фактором субдукции является избыточная плотность слэба [van Keken et al., 2002, 2011]. В численные модели могут вноситься усложнения, в частности, вязкость мантийного клина, зависящая от температуры и величин касательных напряжений [van Keken et al., 2002], различные варианты воздействия на субдуцирующую плиту и вариации состава [Kincaid, Sacks, 1997].

Существует и другой подход к моделированию мантийных течений, когда на основе теплофизического (лабораторного и теоретического) моделирования изучается тепловая и гидродинамическая структура свободноконвективных течений в зоне субдукции [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2013, 2014]. Эксперименты в горизонтальном слое вязкой жидкости, охлаждаемом сверху, при наличии нагревателей у подошвы показали, что происходит растекание субдукционного свободноконвективного потока в противоположных направлениях от лобовой точки при встрече потока с подошвой слоя [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2013]. На основе этих экспериментов была предложена модель свободноконвективных течений в области контакта субдуцирующей плиты с границей верхней и нижней мантии (границей 670 км). В цитированных работах были оценены си-

лы давления, создающиеся вблизи границы 670 км и обуславливающие растекание нисходящего потока субдуцирующей плиты вдоль нее, а также вертикально направленные силы, действующие на субдуцирующую плиту.

В настоящее время остаются актуальными вопросы о распределении температуры как в субдуцирующей плите, так и в континентальном крыле субдукционной зоны, определении тепловых потоков от континента и нижележащей мантии к плите и, соответственно, о величине температуры на границе контакта субдуцирующей плиты и континентального крыла. В настоящей статье на основе данных лабораторного и теоретического моделирования представлена модель зоны субдукции, учитывающая свободноконвективные течения в астеносфере и переходной зоне мантии (слое *C*) и растекание нисходящего субдукционного потока на границе 670 км. Найдены распределения температуры в континентальном крыле субдукционной зоны и в субдуцирующей плите для различных значений глубины погружения плиты и различных моментов времени от начала процесса субдукции.

Модель тепловой и гидродинамической структуры зоны субдукции

В тектонических и геодинамических процессах особую роль играют зоны субдукции. Они представляют собой области нисходящих течений и проявляются в литосферном слое. Количественная оценка сил, порождающих нисходящие течения в верхней мантии [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2014], указывает на определяющую роль силы тяжести опускающейся литосферной плиты $F_{\text{тг}}$, имеющей более низкую температуру, чем окружающая мантия, силы, обусловленной фазовым переходом в коровом слое плиты $F_{\text{з}}$, и силы, обусловленной фазовым переходом на глубине 410 км $F_{\text{фп}}$. Согласно [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2014], суммарная движущая сила на один погонный метр по ширине плиты $F_{\text{дв}} = F_{\text{тг}} + F_{\text{з}} + F_{\text{фп}}$. Сумма силы трения на подошве плиты из-за астеносферного свободно-конвективного течения $F_{\text{а}}$ и силы соскальзывания океанической плиты $F_{\text{хр}}$ составляет $F_{\text{а}} + F_{\text{хр}} \approx 0,1 F_{\text{дв}}$.

На основе баланса сил, проявляющихся в зоне субдукции, оценено касательное напряжение $\tau_{\text{тр}}$ на контакте корового слоя с окружающей верхней мантией. Знание $\tau_{\text{тр}}$ позволило определить тепловой поток, вызванный трением на контакте субдуцирующей плиты с континентальным крылом субдукционной зоны $q_{\text{тр}} = u\tau_{\text{тр}}$ [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2014], где u – скорость опускающейся плиты относительно континента. Тепловой поток был оценен без использования коэффициента динамической вязкости, ве-

личина которого в этой области весьма неопределенная.

Зона субдукции с учетом реологии слоев и действующих в ней сил может быть условно разделена на три основные области, имеющие характерную структуру течения и различные масштабы скорости движений (рис. 1): 1) астеносферный слой; 2) слой *C* (переходная зона мантии); 3) субдуцирующая океаническая литосферная плита с сопряженным горизонтальным участком океанической литосферы.

На океаническом крыле зоны субдукции можно выделить два слоя: астеносферный слой и слой *C* (рис. 1). Астеносферный слой находится выше границы фазового перехода «оливин–вадслеит», расположенной на глубине 410 км (рис. 1, линия *l*). Слой *C* расположен ниже границы 410 км и простирается до границы верхней и нижней мантии (границы 670 км). Указанные слои плоские, т.е. их протяженность много больше, чем их толщина. Свободноконвективные течения в этих слоях существуют под действием горизонтального градиента температуры [Кирдяшкин и др., 1989; Добрецов и др., 2001; Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2008].

На континентальном крыле зоны субдукции можно выделить, прежде всего, континентальную литосферу толщиной $l_{\text{к}}$ (см. рис. 1). В схему течений в субдукционной зоне вместо континента может быть включена островная дуга, поэтому толщина $l_{\text{к}}$ может изменяться в широком интервале от сотен километров, т.е. от значений толщины континентальной литосферы, до нескольких десятков километров, т.е., до значений, соответствующих островной дуге. В реологическом отношении континентальную литосферу можно рассматривать как упругую или высоковязкую среду, динамическая вязкость которой $\mu_{\text{л}} \rightarrow \infty$. Толщина астеносферного слоя под континентом $l_{\text{а}}$ зависит от толщины континентальной литосферы, т.е. $l_{\text{а}} = 420 \text{ км} - l_{\text{к}}$ (рис. 1). Толщина слоя *C* на континентальном крыле зоны субдукции $l_{\text{с}}$ близка к толщине этого слоя на океаническом крыле.

На континентальном крыле координата x (глубина) совпадает с направлением ускорения силы тяжести. Координата y горизонтально направлена, т.е. направлена нормально к ускорению силы тяжести. На континентальном крыле зоны субдукции выделяется особая структура – аккреционный клин, представляющий собой область сопряжения относительно высокоскоростной океанической плиты и низкоскоростной высоковязкой континентальной плиты. Аккреционный клин представляет собой область вязкого течения в условиях противоположно направленных горизонтальных сил, действующих на океаническую и континентальную плиты [Добрецов и др., 2001, 2009; Dobretsov, Kiryashkin, 1992, 1998].



Рис. 1. Схема свободноконвективных течений в зоне субдукции

Схема течений построена с использованием результатов лабораторного и теоретического моделирования [Кирдяшкин, 1989; Кирдяшкин и др., 2006; Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2008, 2013]. 1 – граница фазового перехода «оливин–вадслеит» (граница 410 км); 2 – распределение температуры в континентальном крыле вдали от зоны субдукции; 3 – нижнемантийные свободноконвективные течения; L_0 – расстояние от оси срединно-океанического хребта до желоба; $\delta_{кс}$ – толщина корового слоя субдуцирующей плиты. Область упругого состояния показана наклонными штрихами

Fig. 1. Sketch of free convection flows in the subduction zone

The sketch is constructed using the results of laboratory and theoretical modeling [Kirdyashkin, 1989; Kirdyashkin et al., 2006; Kirdyashkin, Kirdyashkin, 2008, 2013]. 1 – olivine-wadsleyite phase transition (410 km boundary); 2 – temperature distribution in the continental limb away from the subduction zone; 3 – free convection currents in the lower mantle; L_0 – distance from the axis of the mid-ocean ridge to the trench; $\delta_{кс}$ – thickness of the crustal layer of the subducting plate. The elastic state region is shown by inclined dashes

Таким образом, при построении первичной модели мы можем в первом приближении указать, где проявляются упругие и где – вязкие свойства среды в выделенных нами геодинамических областях. При анализе течения в астеносфере и слое С мы можем использовать основные закономерности, присущие крупномасштабным вязким течениям.

Как показывают эксперименты, в области взаимодействия погружающейся плиты с границей «верхняя–нижняя мантия» (границей 670 км) происходит растекание субдукционного потока в противоположных направлениях от лобовой точки при встрече потока с ограничивающей поверхностью – подошвой слоя. Растекание вдоль нее происходит согласно закону сохранения массы (согласно уравнению неразрывности) под влиянием горизонтальных сил, возникающих из-за противоположно направленных горизонтальных градиентов температуры [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2013; 2014]. На основе экспериментального моделирования и теоретического анализа в первом приближении построена модель конвективных течений в области контакта субдуцирующей плиты с границей 670 км [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2013].

Рассмотрим характерные области кондуктивного теплообмена и граничные условия для субдуцирующей плиты (рис. 1), взяв ее фрагмент, ориентацию которого показывает вектор ускорения силы тяжести (рис. 2, а). Ось x_1 направлена вдоль поверхности контакта плиты с континентальным крылом и связана с координатой x континентального крыла зоны субдукции соотношением $x_1 = x/\sin\alpha$, где α – угол наклона между направлением скорости субдукции u и горизонтальной поверхностью Земли, x – глубина. Плита погружается в верхнюю мантию и движется между океанической мантией и континентальной. Скорость движения плиты меньше скорости свободноконвективных течений в астеносфере под океаном и соизмерима со скоростью течений в слое С [Кирдяшкин и др., 2006; Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2008]. Континент неподвижен относительно субдуцирующей плиты. Для обоснования этого приближения рассмотрим возможный механизм взаимодействия на контакте плиты с континентом (рис. 2, б). На основе суммарной движущей силы плиты может быть оценен коэффициент трения (см. раздел «Теплообмен между субдуцирующей плитой и мантией...»):

$\tau_{тр} = 3 \times 10^7 \text{ Н/м}^2$. Реология корового слоя субдуцирующей плиты, контактирующего с континентом, неизвестна. Поэтому рассмотрим приближение вязкого плоского корового слоя. Для течения Куэтта [Шлихтинг, 1974] в коровом слое толщиной $\delta_{кс}$ (рис. 1, 2, b) $\tau_{тр} = \mu_{кс} u / \delta_{кс}$, тогда динамическая вязкость корового слоя $\mu_{кс} = \tau_{тр} \delta_{кс} / u$, где u – скорость субдукции. Для $\delta_{кс} = 5 \text{ км}$ и $u = 6 \text{ см/год}$ ($1,9 \times 10^{-9} \text{ м/с}$) величина $\mu_{кс} = 8 \times 10^{19} \text{ Н} \times \text{с/м}^2$. Величина динамической вязкости для континента по оценкам [Добрецов и

др., 2001; Strehlau, Meissner, 1987] $\mu_k = 10^{21} - 10^{23} \text{ Н} \times \text{с/м}^2$. Отношение динамической вязкости корового слоя к динамической вязкости континента $\mu_k = 10^{22} \text{ Н} \times \text{с/м}^2$: $\mu_{кс} / \mu_k = 8 \times 10^{-3}$ и скорость движения на границе корового слоя с континентом будет равна $8 \times 10^{-3} u$, т.е. 0,48 мм/год. Поэтому в континентальном крыле зоны субдукции можно пренебречь вынужденной конвекцией и считать, что теплообмен между плитой и континентом происходит в режиме теплопроводности.

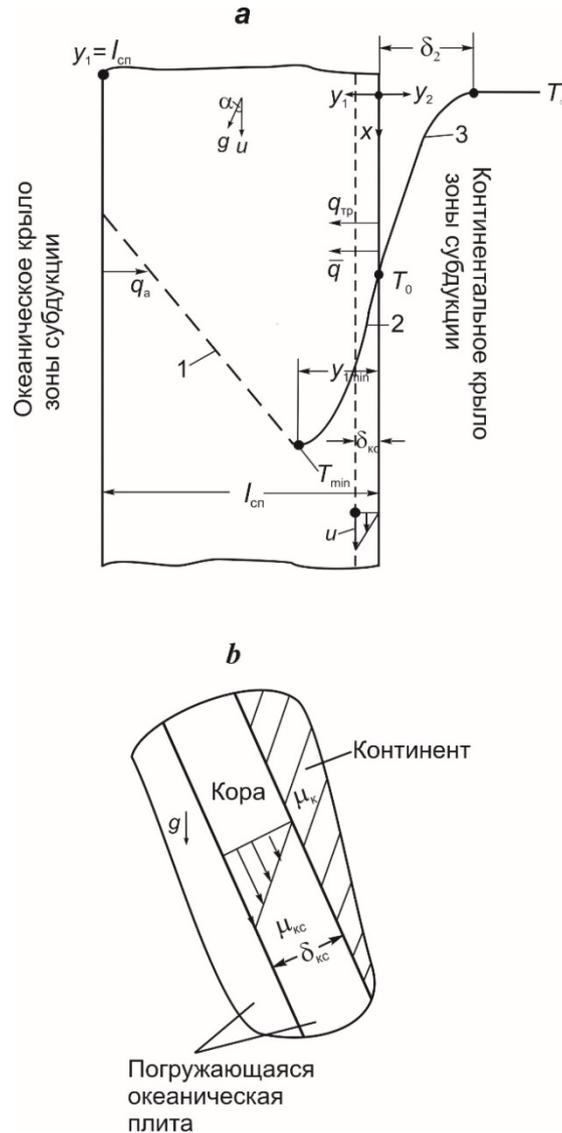


Рис. 2. Распределение температуры в зоне субдукции

a – профили температуры по толщине субдуцирующей плиты и в тепловом пограничном слое верхней мантии континентального крыла зоны субдукции. 1 – распределение температуры по толщине плиты; 2 – распределение температуры в пограничном слое плиты на границе контакта плиты и континентального крыла (границе $y = 0$); 3 – распределение температуры в пограничном слое окружающей мантии на континентальном крыле зоны субдукции вблизи границы $y = 0$; *b* – взаимодействие субдуцирующей плиты с континентом

Fig. 2. Temperature distribution in the subduction zone

a – temperature profiles across the subducting plate and in the thermal boundary layer of the upper mantle at the continental limb of the subduction zone. 1 – temperature distribution across the plate; 2 – temperature distribution in the plate boundary layer at the contact between the plate and the continental limb ($y = 0$); 3 – temperature distribution in the boundary layer of the surrounding mantle at the continental limb of the subduction zone adjacent to the $y = 0$ boundary; *b* – interaction of the subducting plate with the continent

Можно в первом приближении принять, что и астеносферный слой, и слой C в океаническом крыле также неподвижны относительно погружающейся плиты. Нагрев субдуцирующей плиты происходит в условиях нестационарного кондуктивного теплообмена. Характерным временем для процесса теплообмена в плите и на границе контакта плиты с континентальным крылом зоны субдукции будет время погружения до глубины x , равное $t_n = x/u$ при постоянной во времени скорости погружения плиты $u = \text{const}$. Диапазон изменения t_n : от начала субдукции до времени опускания плиты и ее соприкосновения с границей «верхняя–нижняя мантия» ($x_0 = 6,7 \times 10^5$ м), т.е. $0 \leq t_n \leq x_0/usin\alpha$. Время существования (длительность) субдукции t много больше, чем время $t_n = x_0/usin\alpha$. При $t > t_n$ процесс теплообмена в пограничном слое плиты толщиной $\delta_1 = y_{1\text{min}}$ (рис. 2) будем рассматривать в приближении квазистационарного теплообмена.

В континентальном крыле зоны субдукции на границе «коровый слой субдуцирующей плиты–мантия» существует тепловой пограничный слой толщиной δ_2 (рис. 2), режим кондуктивного теплообмена в нем – нестационарный. Пограничный слой возникает с момента контакта плиты с мантией под континентом. Так как контакт плиты для различной глубины x возникает через время $t_n = x/usin\alpha$ от момента начала субдукции, то развитие пограничного слоя происходит, начиная с этого момента времени, т.е. время зарождения пограничного слоя $t_k = t - t_n = t - x/usin\alpha$, где t – время от начала возникновения субдукции.

Происходит нагрев погружающейся плиты со стороны океанического крыла субдукционной зоны, т.е. тепловой поток q_a направлен от границы контакта плиты с мантией океанического крыла ($y_1 = l_{\text{cn}}$) к плите, где l_{cn} – толщина плиты (рис. 2). Распределение сверхадиабатической температуры в субдуцирующей литосферной плите со стороны океанического крыла зоны субдукции в первом приближении можно представить в виде линейного закона (рис. 1, 2). Введем следующие обозначения: T_0 – температура на контакте плиты с мантией континентального крыла, т.е. на границе $y = 0$; T_∞ – температура в континентальном крыле на удалении от зоны субдукции $y_2 \gg \delta_2$; $\delta_1 = y_{1\text{min}}$ – толщина теплового пограничного слоя в плите, существующего на границе контакта плиты и континентального крыла зоны субдукции ($y_1 = 0$); T_{min} – минимальная температура в плите (рис. 2, а).

Граница $y_1 = 0$ подвергается мгновенному, в масштабе геологического времени, повышению температуры вследствие контакта плиты с континентом. При $t > 0$ температура на этой границе равна T_0 .

Тепло $q_{\text{тр}}$, возникающее вследствие трения на границе $y_1 = 0$ (рис. 2), передается погружающейся плите, так как ее температура ниже, чем температура в континенте.

В задачу данной статьи входит: (1) нахождение распределения температуры в погружающейся плите и в континентальном крыле зоны субдукции в зависимости от времени, начиная с момента начала погружения плиты; (2) определение тепловых потоков на границе контакта субдуцирующей плиты с континентом, астеносферой и слоем C , а также температур T_0 и T_{min} .

Теплообмен между субдуцирующей плитой и мантией на континентальном крыле зоны субдукции

Проанализируем процесс теплообмена между погружающейся литосферной плитой и окружающей мантией в период от зарождения субдукции до момента контакта торца погружающейся океанической литосферы с границей «нижняя–верхняя мантия» на глубине 670 км.

Сложность задачи о субдукции состоит еще и в том, что в нисходящем потоке, представляющем собой субдуцирующую океаническую литосферу, наблюдаются реологически неоднородные слои. Коровый слой и слой литосферы (с точки зрения минералогического состава, состоящей в основном из оливина [Meschede, 2015]) до значения T_{min} в плите при низкой температуре (< 800 °С) находится в упругом и вязкоупругом состоянии [Xu et al., 2003] (рис. 1). Этот слой на глубине, большей, чем ~ 150 км, переходит в пластическое состояние [e.g., Karato, Wu, 1993], т.е. можно рассматривать опускающуюся литосферу со спутным потоком (астеносферой) как вязкую среду. На границе фазового перехода «оливин–вадслеит» наблюдается, кроме скачка плотности $\Delta\rho \approx 200$ кг/м³, еще и скачок вязкости от значения $\sim 10^{14}$ до 4×10^{15} м²/с. Граница фазового перехода проницаема для свободной конвекции, так как $dP/dT > 0$ [Трубицын и др., 2008].

Толщину субдуцирующей литосферы l_{cn} оценим по границе корового слоя, контактирующего с окружающей мантией на континентальном крыле, т.е. контактирующего с континентальной литосферой, астеносферой и слоем C . На рис. 2 представлены схематическое распределение температуры по толщине плиты и граничные условия. Координата y_1 – нормальная к поверхности плиты, x – продольная координата, направленная вдоль поверхности плиты и отсчитываемая от дневной поверхности, α – угол наклона плиты относительно горизонтальной поверхности, который может изменяться с глубиной погружения (с увеличением x).

Линия $y_1 = 0$ является границей между субдуцирующей плитой и континентальным крылом зоны субдукции и представляет собой границу корового слоя, контактирующего с окружающей мантией на континентальном крыле. Рассмотрим субдуцирующую плиту, т.е. область $y_1 > 0$. В субдуцирующей океанической литосферной плите можно выделить две характерные области (рис. 2, а):

1. Область $0 \leq y_1 \leq y_{1\min}$, где тепло подводится к плите от континентального крыла из-за охлаждения массива верхней мантии и тепла, возникающего вследствие трения на контакте плиты с верхней мантией.

2. Область $y_{1\min} \leq y_1 \leq l_{\text{сп}}$, где подводится тепло из астеносферы и слоя *C* океанического крыла зоны субдукции к плите, погружающейся со скоростью u .

Области (1) и (2) сопрягаются при $y = y_{1\min}$, где достигается минимальная температура $T = T_{\min}$, $(\partial T / \partial y)_{\min} = 0$ и удельные тепловые потоки справа и слева от $y_{1\min}$ равны по величине и противоположно направлены.

На континентальном крыле зоны субдукции, где происходит охлаждение верхней мантии, имеющей начальную температуру T_∞ (рис. 2, а), температура на границе контакта с субдуцирующей плитой $y = 0$, $T = T_0$ и суммарный тепловой поток со стороны верхней мантии (при $y_2 > 0$) $q = q_{\text{тр}} + q_{\text{кк}}$, где $q_{\text{кк}}$ – тепловой поток от континентального крыла в субдуцирующую океаническую плиту.

Начальное (при $t = 0$) распределение сверхадиабатической температуры в погружающейся плите линейное: $T_n = q_a / y \lambda$, где q_a – удельный тепловой поток от океанического крыла в субдуцирующую плиту при $y_1 = l_{\text{сп}}$ (рис. 2, а, линия 1). В период развития субдукции и в режиме постоянной скорости опускания плиты ($u = \text{const}$) теплообмен нестационарный.

Рассмотрим теплообмен в опускающейся океанической литосфере в области на контакте плиты с континентальным крылом субдукционной зоны, т.е. в области (1) ($0 \leq y_1 \leq y_{1\min}$). На контакте опускающейся литосферы происходит нагрев плиты и охлаждение окружающей мантии. В геологических масштабах времени граница опускающейся плиты $y_1 = 0$ подвергается мгновенному повышению температуры вследствие контакта плиты с континентом. Модель мгновенного охлаждения поверхности полупространства успешно использовалась при решении уравнения теплопроводности для описания процесса охлаждения океанической литосферы, отодвигающейся от срединно-океанического хребта [Turcotte, Schubert, 2002]. При погружении (субдукции) литосферы мы будем использовать эту же модель для решения уравнения теплообмена, когда происходит мгновенное нагревание границы $y_1 = 0$ полупространства $y_1 > 0$.

Как показали дальнейшие вычисления, перепад температуры в области $0 \leq y_1 \leq y_{1\min}$ изменяется незначительно во времени и градиент температуры вдоль плиты много меньше, чем по ее толщине. Поэтому в первом приближении примем, что профиль температуры в пограничном слое соответствует решению для $\Delta T = T_0 - T_{\min} = \text{const}$, т.е. квазистационарному условию теплообмена.

Так как $\partial^2 T / \partial y_1^2 \gg \partial^2 T / \partial x^2$, то уравнение теплообмена имеет вид

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y_1^2}. \quad (1)$$

При постоянной скорости субдукции ($u = \text{const}$) введем новую переменную – время $t_n = x / u \sin \alpha$. Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t_n} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y_1^2}. \quad (2)$$

При $t_n > 0$ температура поверхности контакта плиты с континентом равна T_0 . Поскольку $T_0 > T_{\min}$, то происходит нагрев плиты. На границе $y_1 = 0$ вследствие трения возникает тепловой поток, который нагревает погружающуюся литосферную плиту. Влияние тепловыделения вследствие трения учитывается при определении T_0 .

Профиль температуры в области $0 \leq y_1 \leq y_{1\min}$ получим из решения уравнения (2) при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} &\text{при } t_n = 0 \text{ и } y_1 = 0, T = T_{\min}, \\ &\text{при } t_n > 0 \text{ и } y_1 = 0, T = T_0, \\ &\text{при } t_n > 0 \text{ и } y_1 \rightarrow \infty, T \rightarrow T_{\min}. \end{aligned} \quad (3)$$

Представим температуру в безразмерном виде: $\theta_1 = T - T_{\min} / T_0 - T_{\min}$. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t_n} = a \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y_1^2} \quad (4)$$

и граничные условия (3) примут вид $\theta_1(y_1, 0) = 0$; $\theta_1(0, t_n) = 1$; $\theta_1(t_n, \infty) = 0$.

Единственным параметром задачи, имеющим размерность длины, является характерная длина температуропроводности $(at_n)^{1/2}$ [Turcotte, Schubert, 2002]. Используя безразмерную координату $\eta_1 = y_1 / 2(at_n)^{1/2}$, преобразуем уравнение (4):

$$-\eta_1 \frac{d\theta_1}{d\eta_1} = \frac{1}{2} \frac{d^2\theta_1}{d\eta_1^2}. \quad (5)$$

Граничные условия к уравнению (5):

$$\theta_1(0) = 1; \theta_1(\infty) = 0. \quad (6)$$

Решением уравнения (5) при граничных условиях (6) будет

$$\theta_1 = 1 - \text{erf}\eta_1 = \text{erfc}\eta_1, \quad (7)$$

где $\text{erf}\eta_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta_1} \exp(-\eta_1'^2) d\eta_1'$ – функция ошибок, $\text{erfc}\eta_1$ – дополнительная функция ошибок.

Тепловой поток от границы $y_1 = 0$ в погружающуюся плиту равен $q_- = -\lambda(\partial T/\partial y_1)_{y_1=0}$, и с учетом равенства (7):

$$q_- = -\lambda(T_0 - T_{\min}) \frac{\partial}{\partial y_1} \left(\operatorname{erfc} \frac{y_1}{2(at_n)^{1/2}} \right)_{y_1=0} = \frac{\lambda(T_0 - T_{\min})}{2(at_n)^{1/2}} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta_1^2} \right)_{\eta_1=0} \quad (8)$$

Из (8) следует, что тепловой поток при $y_1 = 0$:

$$q_- = \lambda(T_0 - T_{\min}) / (\pi ax / \sin \alpha)^{1/2}. \quad (9)$$

Величина среднего теплового потока при $y_1 = 0$ за время t_n :

$$\bar{q}_- = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} q_- dt_n' = \frac{2\lambda(T_0 - T_{\min})}{(\pi at_n)^{1/2}} = \frac{2\lambda(T_0 - T_{\min})}{(\pi ax / \sin \alpha)^{1/2}}.$$

Изменение температуры в погружающейся плите происходит в тепловом пограничном слое толщиной $\delta_1 = y_{1\min}$ (рис. 2, а). Толщину этого пограничного слоя δ_1 будем определять из условия $\theta_1(\eta_{1T}) = 0,1$. Используя равенство (7), из этого условия находим $\eta_{1T} = 1,16$, и тогда, поскольку $\delta_1 = 2\eta_{1T}(at_n)^{1/2}$, получаем

$$\delta_1 = 2,32(at_n)^{1/2} = 2,32(ax_1/u)^{1/2}. \quad (10)$$

В области контакта плиты с литосферой и подстилающей ее мантией континентального крыла происходит выделение тепла вследствие трения. Это тепло идет на нагрев плиты, так как ее температура $T(y) < T_0$. Величина удельного теплового потока, возникающего вследствие трения, определяется из соотношения $q_{\text{тр}} = \tau_{\text{тр}}u$, где $\tau_{\text{тр}}$ – касательное напряжение при $y_1 = 0$ и u – скорость субдуцирующей плиты относительно окружающей мантии [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2014]. Сила трения при равномерном движении субдуцирующей плиты ($u = \text{const}$) равна движущей силе $F_{\text{дв}}$. Поэтому касательное напряжение на контакте погружающейся плиты с континентальной литосферой и подстилающей ее верхней мантией

$$\tau_{\text{тр}} = (F_{\text{дв}} \sin^2 \alpha) / x. \quad (11)$$

Величина удельного теплового потока, возникающего вследствие трения и нагревающего субдуцирующую литосферу,

$$q_{\text{тр}} = (uF_{\text{дв}} \sin^2 \alpha) / x. \quad (12)$$

Величина движущей силы $F_{\text{дв}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{фп}} + F_3$, где $F_{\text{тр}}$ – термогравитационная сила, обусловленная разностью температуры субдуцирующей плиты и окружающей мантии, $F_{\text{фп}}$ – сила, создающаяся вследствие фазового перехода оливин–вадслеит и F_3 – сила, возникающая вследствие фазового перехода в коровом слое с образованием эклогита [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2014]. Согласно проведенной нами некоторой коррекции оценок величин сил [Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2014], $F_{\text{тр}} = 2,8 \times 10^{13}$ Н/м,

$F_{\text{фп}} = 7,1 \times 10^{12}$ Н/м и $F_3 = 6,1 \times 10^{12}$ Н/м. Суммарная движущая сила на погонный метр субдуцирующей плиты имеет величину $F_{\text{дв}} = 4,1 \times 10^{13}$ Н/м. Тогда для значений $u = 5 - 8$ см/год ($1,59 \times 10^{-9} - 2,54 \times 10^{-9}$ м/с), $\sin \alpha = 0,707$ ($\alpha = 45^\circ$) и $x_0 = 670$ км из соотношения (12) следует, что $q_{\text{тр}} = 0,049 - 0,078$ Вт/м², т.е. тепловой поток $q_{\text{тр}}$ соизмерим со средним тепловым потоком на океаническом дне. Влияние теплового потока $q_{\text{тр}}$ проявляется в увеличении температуры T_0 .

Рассмотрим теплообмен в континенте ($y_2 \geq 0$, $u_k = 0$) (рис. 2, а). Контакт погружающейся плиты с мантией происходит при $t_n = x_1/u$ ($x_1 = x/\sin \alpha$). Охлаждение континента для $x_1 = \text{const}$ начинается с момента времени, равного x_1/u . Это время и является временем отсчета для определения профиля температуры в континенте для координаты $x_1 = \text{const}$, т.е. $t_k = t - t_n = t - (x/\sin \alpha)$. Время t_k – характерное время развития теплового пограничного слоя в континентальном крыле.

В области континентального крыла ($y_2 \geq 0$, рис. 2, а) имеет место нестационарный кондуктивный теплообмен. Поскольку $\partial T/\partial y_2 \gg \partial T/\partial x$, то уравнение теплообмена имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t_k} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y_2^2}. \quad (13)$$

Так же, как и при анализе теплообмена в погружающейся плите, найдем решение уравнения (13) для области континента $y_2 \geq 0$, граница которого подвергается мгновенному понижению температуры. При $t_k = 0$ температура по всему пространству равна T_∞ , а при $t_k > 0$ температура поверхности при $y_2 = 0$ равна T_0 . При $T_0 < T_\infty$ возникает тепловой поток, направленный в погружающуюся литосферную плиту. Тогда температура континента в окрестности $y_2 = 0$ понижается.

Профиль температуры найдем из уравнения (13) при граничных условиях:

$$\begin{aligned} &\text{при } t_k = 0, y_2 > 0, T = T_\infty, \\ &\text{при } t_k > 0, y_2 = 0, T = T_0, \\ &\text{при } t_k > 0, y_2 \rightarrow \infty, T \rightarrow T_\infty. \end{aligned} \quad (14)$$

Как и выше, вводим безразмерную температуру $\theta_2 = (T - T_0)/(T_\infty - T_0)$ и безразмерную координату $\eta_2 = y_2/2(at_k)^{1/2}$. Тогда получаем уравнение:

$$-\eta_2 \frac{d\theta_2}{d\eta_2} = \frac{1}{2} \frac{d^2\theta_2}{d\eta_2^2}. \quad (15)$$

Граничные условия к уравнению (15): $\theta_2(0) = 0$; $\theta_2(\infty) = 1$. Решение уравнения (15) с этими граничными условиями имеет вид

$$\begin{aligned} \theta_2 = \operatorname{erf} \eta_2 &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta_2} \exp(-\eta_2'^2) d\eta_2' \quad \text{или} \\ (T - T_0)/(T_\infty - T_0) &= \operatorname{erf} \eta_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Тепловой поток при $y_2 = 0$: $q_{\text{кк}} = -\lambda(\partial T/\partial y_2)_{y_2=0} = -\lambda(T_\infty - T_0) \partial/\partial y_2 [\text{erf}(y_2/2(at_k)^{1/2})]_{y_2=0} = -\lambda(T_\infty - T_0)d/d\eta_2 (\text{erf}\eta_2)_{\eta_2=0}$, т.е.:

$$q_{\text{кк}} = -\lambda(T_\infty - T_0)/(\pi at_k)^{1/2}. \quad (17)$$

Величина теплового потока, усредненного за время t_k ,

$$\overline{q_{\text{кк}}} = -2\lambda(T_\infty - T_0)/(\pi at_k)^{1/2}. \quad (18)$$

Толщина теплового пограничного слоя в континенте δ_2 (рис. 2) определяется из условия $\theta(\eta_{2T}) = 0,98$. Тогда, исходя из равенства (16), $\eta_{2T} = 1,7$, и, следовательно, с учетом равенства $\delta_2 = 2\eta_{2T}(at_k)^{1/2}$ получаем

$$\delta_2 = 3,4(at_k)^{1/2}. \quad (19)$$

Температуру на границе контакта субдуцирующей литосферной плиты и континента определим из баланса тепловых потоков: подведенных к этой границе и отведенного от нее в плиту (q_-):

$$q_- = q_{\text{кк}} + q_{\text{тр}}. \quad (20)$$

Подставляем значения q_- , $q_{\text{тр}}$ и $q_{\text{кк}}$ из соотношений (9), (12) и (17) в равенство (20), и, предполагая, что коэффициенты теплопроводности и температуропроводности субдуцирующей плиты и континента одинаковые, после преобразований получаем

$$T_0 = \left[\frac{T_{\text{мин}}}{t_n^{1/2}} + \frac{T_\infty}{t_k^{1/2}} + \frac{uF_{\text{дв}}(\pi a \sin \alpha)^{1/2}}{\lambda x_0} \right] \left[\frac{(t_k t_n)^{1/2}}{t_k^{1/2} + t_n^{1/2}} \right]. \quad (21)$$

Среднюю температуру $T_{\text{мин}}$ по толщине субдуцирующей плиты $l_{\text{сп}}$ в различных ее сечениях x будем определять из соотношения

$$T_{\text{мин}} = \frac{(q_a + q_{\text{тр}} + q_{\text{кк}})x}{l_{\text{сп}} C \rho u \sin \alpha} + \frac{T_{\text{л}}}{2}, \quad (22)$$

где q_a – удельный тепловой поток от океанической астеносферы к субдуцирующей плите, $q_{\text{тр}} = (uF_{\text{дв}} \sin^2 \alpha)/x_0$ – средний по глубине x удельный тепловой поток за счет трения на контакте погружающейся литосферной плиты с континентальным крылом зоны субдукции, $T_{\text{л}}/2 = 600$ °С – средняя температура в погружающейся океанической литосфере при $x = 0$ [Кирдяшкин и др., 2006].

Вычисление температуры T_0 проводилось последовательным приближением. Принимались следующие значения параметров: $l_{\text{сп}} = 70 \times 10^3$ м, $C = 1,2 \times 10^3$ Дж/кг × °С, $\rho = 3\,300$ кг/м³, $\lambda = 3$ Вт/м × °С, $a = \lambda/C\rho = 7,6 \times 10^{-7}$ м²/с, $u = 1,9 \times 10^{-9}$ м/с (6 см/год), $\sin \alpha = 0,707$ ($\alpha = 45^\circ$), $T_1 = 1\,200$ °С, $x_0 = 6,7 \times 10^5$ м, $F_{\text{дв}} = 4,1 \times 10^{13}$ Н/м, $q_{\text{тр}} = 0,058$ Вт/м², $q_a = 0,025$ Вт/м² [Добрецов и др., 2001; Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2013, 2014]. Температура T_0 вычислялась для значений глубины $x = 100, 200, 400$ и 600 км, для которых значения сверхадиабатической температуры на удалении от зоны субдукции T_∞ принимались, исходя из распределения температуры в верхней мантии под континентом [Кирдяшкин и др., 2020]. Время погру-

жения плиты $t_{\text{п}} = x/\sin \alpha$ находили для вышеуказанных значений x . В расчетах принималось время от начала субдукции: $t = 2,5; 5; 10; 20; 50$ млн лет и 100 млн лет. Характерное время развития теплового пограничного слоя в континентальном крыле субдукционной зоны вычислялось как $t_k = t - t_{\text{п}}$.

В первом приближении минимальную температуру субдуцирующей плиты $T_{\text{мин}}$ вычисляли из соотношения (22), в котором принимали $q_{\text{кк}} = 0$. С учетом вышеуказанных параметров, а также значений T_∞ для заданного x и вычисленных температур $T_{\text{мин}}$ с использованием соотношения (21) в первом приближении рассчитывали температуру T_0 . Затем тепловой поток $q_{\text{кк}}$ определялся из соотношения (17) с учетом вычисленной температуры T_0 . Во втором приближении вычисляли температуру $T_{\text{мин}}$ с использованием соотношения (22) уже с учетом величины теплового потока $q_{\text{кк}}$, найденной в первом приближении. Затем находили T_0 и $q_{\text{кк}}$ во втором приближении. Расчеты показали, что второго приближения достаточно для нахождения температур $T_{\text{мин}}$ и T_0 .

С использованием рассчитанных значений температур $T_{\text{мин}}$ и T_0 были найдены распределения температуры в субдуцирующей плите и в континентальном крыле субдукционной зоны. Распределение температуры $T_{\text{сп}}$ в субдуцирующей литосферной плите определялось из соотношения

$$T_{\text{сп}} = \text{erfc}\eta_1(T_0 - T_{\text{мин}}) + T_{\text{мин}}, \quad (23)$$

где величина η_1 лежит в интервале от 0 до 1,16. Толщина теплового пограничного слоя δ_1 для субдуцирующей плиты находится с использованием соотношения (10).

Распределение температуры в пограничном слое мантии континентального крыла находится с использованием соотношения

$$T_{\text{конт}} = \text{erf}\eta_2(T_\infty - T_0) + T_0, \quad (24)$$

где η_2 лежит в интервале от 0 до 1,7. Толщина теплового пограничного слоя δ_2 вычисляется из соотношения (19).

Результаты вычислений представлены на рис. 3–7. Из рис. 3 следует, что наибольшая температура в субдуцирующей океанической литосфере равна T_0 – температуре границы погружающейся плиты и литосферы континентального крыла зоны субдукции. Температура T_0 увеличивается по мере приближения к границе «верхняя–нижняя мантия» (рис. 3–7) и ее значение на глубине $x = 600$ км составляет $T_0 = 1\,720$ °С (рис. 6, 7), что существенно ниже температуры плавления базальта и перидотита KLB–1 $T_{\text{пл}} = 2\,130$ °С на этой глубине [Yasuda et al., 1994; Zhang, Herzberg, 1994]. Это означает, что нет условий для плавления в коровом слое плиты на глубине 600 км.

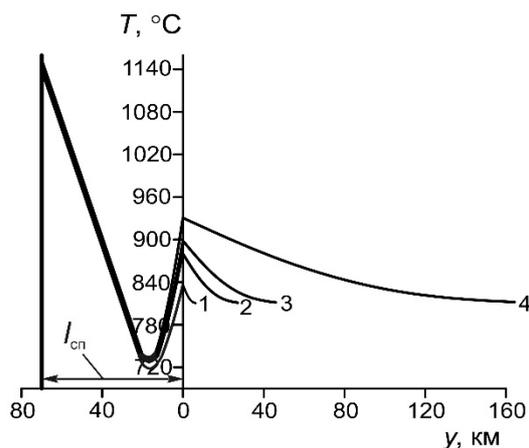


Рис. 3. Распределение температуры в субдуцирующей плите и в пограничном слое мантии на континентальном крыле субдукционной зоны во времени при $x = 100$ км

1 – $t = 2,5$ млн лет, 2 – $t = 5$ млн лет, 3 – $t = 10$ млн лет, 4 – $t = 100$ млн лет

Fig. 3. Temperature distribution in the subducting plate and in the mantle boundary layer at the continental limb of the subduction zone for $x = 100$ km and different times t

1 – $t = 2.5$ Ma, 2 – $t = 5$ Ma, 3 – $t = 10$ Ma, 4 – $t = 100$ Ma

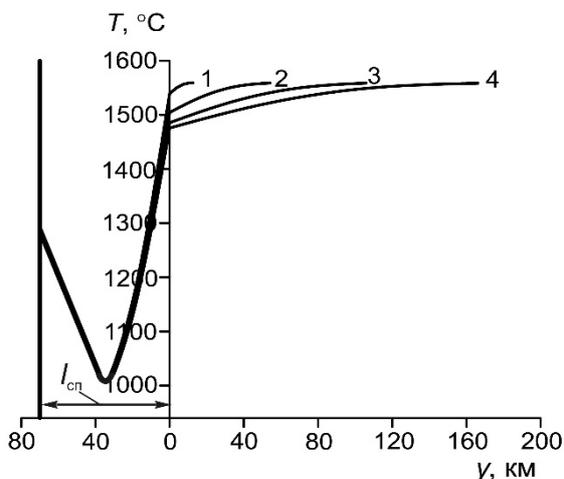


Рис. 5. То же, что рис. 3 при $x = 400$ км

1 – $t = 10$ млн лет, 2 – $t = 20$ млн лет, 3 – $t = 50$ млн лет, 4 – $t = 100$ млн лет

Fig. 5. The same as fig. 3 for $x = 400$ км

1 – $t = 10$ Ma, 2 – $t = 20$ Ma, 3 – $t = 50$ Ma, 4 – $t = 100$ Ma

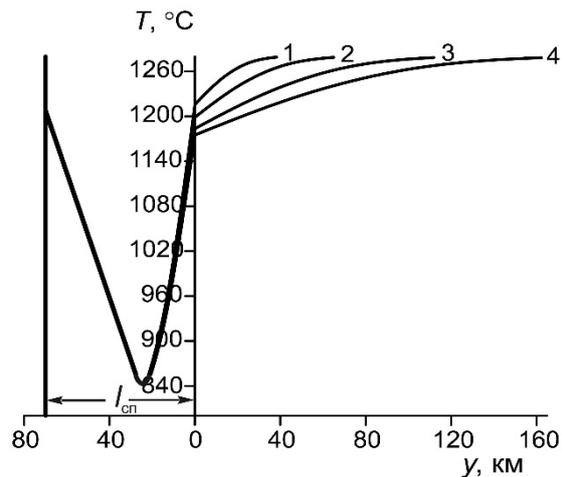


Рис. 4. То же, что рис. 3 при $x = 200$ км

1 – $t = 10$ млн лет, 2 – $t = 20$ млн лет, 3 – $t = 50$ млн лет, 4 – $t = 100$ млн лет

Fig. 4. The same as fig. 3 for $x = 200$ км

1 – $t = 10$ Ma, 2 – $t = 20$ Ma, 3 – $t = 50$ Ma, 4 – $t = 100$ Ma

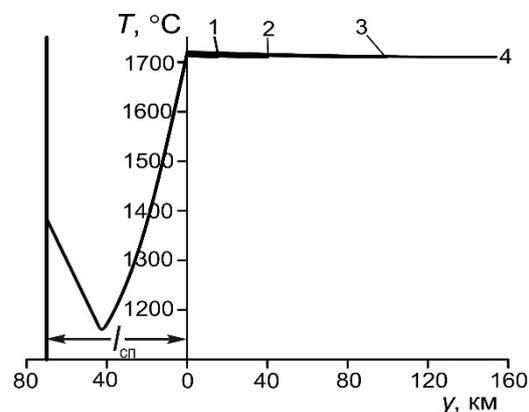


Рис. 6. То же, что рис. 5 при $x = 600$ км

1 – $t = 15$ млн лет, 2 – $t = 20$ млн лет, 3 – $t = 50$ млн лет, 4 – $t = 100$ млн лет

Fig. 6. The same as fig. 3 for $x = 600$ км

1 – $t = 15$ Ma, 2 – $t = 20$ Ma, 3 – $t = 50$ Ma, 4 – $t = 100$ Ma

На кровле нижней мантии (на глубине 670 км) температура $T_{670} = 1970$ °С, а температура плавления базальта $T_{пл} = 2200$ °С [Yasuda et al., 1994]. При наличии в коровом слое химических добавок, понижающих

температуру плавления, становится возможным плавление в этом слое [Кирдяшкин и др., 2019].

На рис. 3 представлены профили температуры в субдуцирующей литосферной плите и в континен-

тальном крыле зоны субдукции для глубины $x = 100$ км. На границе «субдуцирующая плита–континентальная литосфера» температура T_0 больше, чем температура литосферы. Это объясняется влиянием теплового потока, генерируемого трением, который на этой глубине нагревает и плиту, и литосферу континента. Согласно рис. 7, такое распределение тепловых потоков существует до глубины ~ 170 км. Происходит нагрев плиты и со стороны астеносферы под океаном.

На глубине $x = 200$ км (см. рис. 4) характер теплообмена на континентальном крыле зоны субдукции изменяется: нагрев опускающейся плиты происходит за счет теплоты трения и теплового потока из континентальной литосферы и из океанической астеносферы. На глубине $x = 400$ км (см. рис. 5) характер теплообмена такой же, как и на глубине 200 км: происходит нагрев погружающейся литосферной плиты со стороны океанического и континентального крыльев субдукционной зоны. Температура литосферной плиты возрастает. На глубине 600 км (см. рис. 6) нагрев плиты происходит за счет тепла, образующегося вследствие трения на границе «плита–мантия». Температура T_0 достигает значения $\sim T_\infty$, т.е. тепловой поток из континентального крыла отсутствует. Также плита нагревается со стороны океанического крыла зоны субдукции.

Распределения температуры, представленные на рис. 3–7, найдены для длительных времен, характер-

ных для существования зоны субдукции. Это позволяет оценить из рис. 3–7 изменение температуры в субдуцирующей плите и в пограничном слое континентального крыла во времени.

На глубине 100 км при $t \leq 100$ млн лет происходит нагрев литосферы континента (рис. 3, 7). На глубине 200 и 400 км при тех же временах t наблюдается нагрев субдуцирующей литосферной плиты и охлаждение континентального крыла (рис. 4, 5, 7). На глубине 600 км тепловой поток от мантии на континентальном крыле к субдуцирующей плите отсутствует (рис. 6, 7), плавление в коровом слое субдуцирующей плиты отсутствует. Оценки тепловых потоков показывают, что плавление в коровом слое субдуцирующей литосферной плиты возможно только на границе 670 км, и на этой границе возможно образование термохимических плюмов, которые создаются при понижении температуры плавления корового слоя из-за наличия в нем химических добавок [Кирдяшкин и др., 2019; Кирдяшкин и др., 2021].

На рис. 7 представлено изменение температуры границы субдуцирующей плиты и континентального крыла $T_{0,cp}$ и минимальной температуры в плите $T_{min,cp}$, усредненных за интервал времени от 10 до 100 млн лет, в зависимости от глубины x . Кроме того, представлена зависимость $T_\infty(x)$. Температуры $T_{0,cp}$ и $T_{min,cp}$ возрастают с увеличением x . На глубине $x = 600$ км $T_{0,cp} = 1\ 719$ °C и $T_{min,cp} = 1\ 094$ °C.

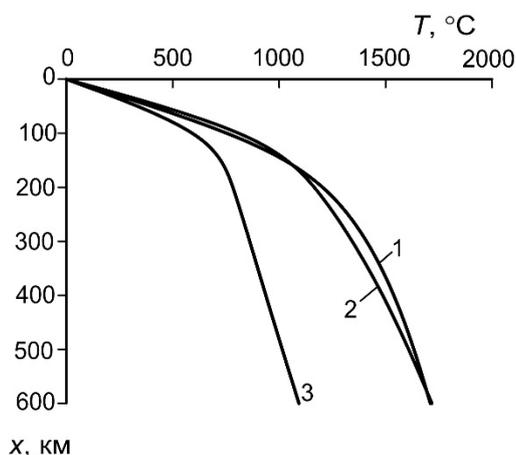


Рис. 7. Распределение температур по толщине верхней мантии

1 – вне теплового пограничного слоя в мантии (T_∞), 2 – на границе субдуцирующей плиты с континентальным крылом зоны субдукции ($T_{0,cp}$), 3 – минимальной температуры в субдуцирующей плите ($T_{min,cp}$)

Fig. 7. Temperature distribution over the upper mantle thickness

1 – outside the thermal boundary layer in the mantle (T_∞), 2 – at the boundary of the subducting plate with the continental limb of the subduction zone ($T_{0,cp}$), 3 – the minimum temperature in the subducting plate ($T_{min,cp}$)

Заключение

Представлена модель тепловой и гидродинамической структуры субдукционной зоны. Зона субдук-

ции с учетом реологии слоев и действующих в ней сил может быть условно разделена на три основные области, имеющие характерную структуру течения и различные масштабы скорости движений: 1) астено-

сферный слой; 2) слой *C* (переходная зона мантии); 3) субдуцирующая океаническая литосферная плита с сопряженным горизонтальным участком океанической литосферы. На континентальном крыле зоны субдукции над астеносферным слоем залегает континентальная литосфера. На океаническом крыле зоны субдукции можно выделить два слоя: астеносферный слой и слой *C*. Движения в астеносфере и слое *C* в океаническом и континентальном крыльях описываются закономерностями для свободноконвективных течений в горизонтальном слое, подогреваемом снизу.

Распределения температуры в субдуцирующей плите и в пограничном слое в мантии под континентом (на границе контакта плиты с мантией) определены в приближении нестационарного кондуктивного теплообмена с использованием модели мгновенного охлаждения полупространства. Полученные профили температуры позволили выяснить особенности теплообмена между субдуцирующей плитой и окружающей мантией для различных глубин погружения плиты ($x = 100\text{--}600$ км).

Коэффициент трения на контакте корового слоя с окружающей мантией $\tau_{\text{тр}}$ определен на основе баланса сил, действующих в зоне субдукции. Знание

$\tau_{\text{тр}}$ позволило определить тепловой поток, вызванный трением, $q_{\text{тр}} = 0,05\text{--}0,08$ Вт/м².

Результаты исследований показали, что тепловой поток вследствие трения на границе субдуцирующей плиты и континентального крыла (границе $y = 0$) оказывает значительное влияние на теплообмен в зоне субдукции и на формирование температурного поля в ней: в области глубин до ~ 170 км наибольшая температура (T_0) существует на этой границе и наблюдается нагрев и плиты, и континентальной литосферы. Нагрев мантии от границы плиты $y = 0$ (области генерации тепла от трения) наблюдается в интервале глубин 170–250 км. Далее происходит нагрев плиты со стороны мантии на континентальном крыле. Тепловой поток от мантии на континентальном крыле к границе плиты $y = 0$ уменьшается до нуля на глубине $x = 600$ км.

Уровень температуры в коровом слое погружающейся океанической плиты указывает на отсутствие плавления в нем. Уровень температуры на границе 670 км допускает зарождение термохимического плюма на этой границе только в коровом слое погружающейся плиты. Плавление в коровом слое возможно на границе 670 км и только при наличии в нем химических добавок, понижающих температуру плавления корового слоя [Кирдяшкин и др., 2019, 2021].

Список источников

- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 408 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Геодинамическая и тепловая модели зоны субдукции // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12, № 1. С. 5–16.
- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Влияние скорости движения океанической литосферы на свободно-конвективные течения в астеносфере под срединно-океаническим хребтом // Физика Земли. 2008. № 4. С. 35–47.
- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Экспериментальное и теоретическое моделирование тепловой и гидродинамической структуры субдуцирующей плиты // Геотектоника. 2013. № 3. С. 31–42.
- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Силы, действующие на субдуцирующую океаническую плиту // Геотектоника. 2014. № 1. С. 62–76.
- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Дистанов В.Э. Распределение температуры в верхней мантии под континентом // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 14–22. doi: 10.21209/2227-9245-2020-26-9-14-22
- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Дистанов В.Э., Гладков И.Н. Об источнике тепла в зоне субдукции // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12, № 3. С. 471–484. doi: 10.5800/GT-2021-12-3-0534
- Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Сурков Н.В. Тепловая гравитационная конвекция в астеносфере под срединно-океаническим хребтом и устойчивость основных глубинных парагенезисов // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 1. С. 76–94.
- Кирдяшкин А.Г. Тепловые гравитационные течения и теплообмен в астеносфере. Новосибирск : Наука, 1989. 81 с.
- Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., Гладков И.Н., Дистанов В.Э. Тепловая и гидродинамическая структура и вулканизм в зоне субдукции // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 9. С. 13–24. doi: 10.21209/2227-9245-2019-25-9-13-24
- Трубицын В.П., Евсеев А.Н., Баранов А.А., Трубицын А.П. Влияние эндотермического фазового перехода на массообмен между верхней и нижней мантией // Физика Земли. 2008. № 6. С. 3–16.
- Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 712 с.
- Davies J.H. Simple analytic model for subduction zone thermal structure // Geophys. J. Int. 1999. V. 139. P. 823–828.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G. Deep-level geodynamics. Rotterdam, Brookfield : A.A. Balkema Publishers, 1998. 328 p.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G. Subduction zone dynamics: models of an accretionary wedge // Ofioliti. 1992. V. 17 (1). P. 155–164.
- England P. On shear stresses, temperatures, and the maximum magnitudes of earthquakes at convergent plate boundaries // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2018. V. 123. P. 7165–7202.
- England P., Wilkins C. A simple analytical approximation to the temperature structure in subduction zones // Geophys. J. Int. 2004. V. 159. P. 1138–1154.
- England P.C., Katz R.F. Melting above the anhydrous solidus controls the location of volcanic arcs // Nature. 2010. V. 467. P. 700–704.

- Karato S., Wu P.** Rheology of the upper mantle: a synthesis // *Science*. 1993. V. 260 (5109). P. 771–778.
- Kincaid C., Griffiths R.W.** Variability in flow and temperatures within mantle subduction zones // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2004. V. 5 (6), Q06002. P. 1–20. doi: 10.1029/2003GC000666
- Kincaid C., Sacks I.S.** Thermal and dynamical evolution of the upper mantle in subduction zones // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102 (B6). P. 12295–12315.
- McKenzie D.P.** Speculations on the consequences and causes of plate motions // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1969. V. 18 (1608). P. 1–32.
- Meschede M.** Lithosphere: Structure and Composition // *Encyclopedia of Marine Geosciences* / eds. by J. Harff, M. Meschede, S. Petersen, J. Thiede. Dordrecht : Springer, 2015. doi: 10.1007/978-94-007-6644-0_86-1
- Molnar P., England P.** Temperatures, heat flux, and frictional stress near major thrust faults // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 4833–4856.
- Peacock S.M.** Advances in the thermal and petrologic modeling of subduction zones // *Geosphere*. 2020. V. 16 (4). P. 1647–1663.
- Schellart W.P., Strak V.** A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments // *J. Geodyn.* 2016. V. 100. P. 7–32.
- Strak V., Schellart W.P.** Control of slab width on subduction induced upper mantle flow and associated upwellings: Insights from analog models // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2016. V. 121. P. 4641–4654.
- Strehlau J., Meissner R.** Estimation of crustal viscosities and shear stresses from an extrapolation of experimental steady state flow data // *Composition, structure and dynamics of the lithosphere–asthenosphere system* / eds. by K. Fuchs, C. Froidevaux. Washington : AGU, 1987. V. 16. P. 69–87. doi: 10.1029/GD016p0069.
- Turcotte D.L., Schubert G.** *Geodynamics*. Cambridge University Press, 2002. 456 p.
- Van Keken P.E., Hacker B.R., Syracuse E.M., Abers G.A.** Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, No. B01401. P. 1–15. doi: 10.1029/2010JB007922
- Van Keken P.E., Kiefer B., Peacock S.M.** High-resolution models of subduction zones: Implications for mineral dehydration reactions and the transport of water into the deep mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2002. V. 3, No. 10, 1056. P. 1–20. doi: 10.1029/2001GC000256
- Xu Y., Weidner D.J., Chen J., Vaughan M.T., Wang Y., Uchida T.** Flow-law for ringwoodite at subduction zone conditions // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 136. P. 3–9.
- Yasuda A., Fujii T., Kurita K.** Melting phase relations of an anhydrous mid-ocean ridge basalt from 3 to 20 GPa: Implications for the behavior of subducted oceanic crust in the mantle // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99 (B5). P. 9401–9414.
- Zhang J., Herzberg C.** Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1 from 5.0 to 22.5 GPa // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99 (B9). P. 17729–17742.

References

- Dobretsov N.A., Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A. *Glubinnaya geodinamika* [Deep-level geodynamics]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Branch «GEO». 2001. 409 p. In Russian
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A. *Geodinamicheskaya i teplovaya modeli zony subduksii* [Geodynamic and thermal models of the subduction zone] // *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2009. V. 12. No. 1. pp. 5–16. In Russian
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A. G. *Vliyaniye skorosti dvizheniya okeanicheskoy litosfery na svobodno-konvektivnyye techeniya v astenosfere pod sredinno-okeanicheskim khrebtom* [Effect of the oceanic lithosphere velocity on free convection in the asthenosphere beneath mid-ocean ridges] // *Fizika Zemli [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]*. 2008. V. 44. No. 4. pp. 35–47. In Russian
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. *Eksperimental'noye i teoreticheskoye modelirovaniye teplovoy i gidrodinamicheskoy struktury subduktivnoy plity* [Experimental and theoretical simulation of the thermal and hydrodynamic structure of a subducting plate] // *Geotectonics*. 2013. V. 47. No. 3. pp. 31–42. In Russian
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. *Sily, deystviyushchiye na subduktivnyy okeanicheskuyu plitu* [Forces acting on a subducting oceanic plate] // *Geotectonics*. 2014. V. 48. No. 1. pp. 62–76. In Russian
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Distanov V.E. *Rasprezheniye temperatury v verkhney mantii pod kontinentom* [Temperature distribution in the upper mantle beneath a continent] // *Transbaikal State University Journal*. 2020. V. 26. No. 1. pp. 14–22. doi: 10.21209/2227924520202611422. In Russian
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Distanov V.E., Gladkov I.N. *Ob istochnike tepla v zone subduksii* [On heat source in subduction zone] // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021. V. 12. No 3. pp. 471–484. doi: 10.5800/GT-2021-12-3-0534. In Russian
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Surkov N.V. Thermal gravitational convection in the asthenosphere beneath a mid-oceanic ridge and stability of main deep-seated parageneses // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. No. 1. pp. 76–94.
- Kirdyashkin A.G. *Teplovye gravitatsionnyye techeniya i teploobmen v astenosfere* [Thermal gravitational flows and heat transfer in the asthenosphere]. Novosibirsk: Publishing house "Nauka". 1989. 81 p. In Russian
- Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A., Gladkov I.N., Distanov V.E. *Teplovaya i gidrodinamicheskaya struktura i vulkanizm v zone subduksii* [Thermal and hydrodynamic structure and volcanism in subduction zone] // *Transbaikal State University Journal*. 2019. V. 25. No. 9. pp. 13–24. doi: 10.21209/2227-9245-2019-25-9-13-24. In Russian
- Trubitsyn V.P., Evseev A.N., Baranov A.A., Trubitsyn A.P. *Vliyaniye endotermicheskogo fazovogo perekhoda na massoobmen mezhdur verkhney i nizhney mantiyey* [Influence of an endothermic phase transition on mass transfer between the upper and the lower mantle] // *Fizika Zemli [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]*. 2008. No. 6. pp. 3–16. In Russian
- Schlichting H. *Teoriya pogrannichnogo sloya* [Boundary-layer theory]. Moscow: Nauka. 1974. 712 p. In Russian
- Davies J.H. Simple analytic model for subduction zone thermal structure // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 139. pp. 823–828.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G. *Deep-level geodynamics*. Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema Publishers, 1998. 328 p.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G. Subduction zone dynamics: models of an accretionary wedge // *Ofioliti*. 1992. V. 17(1). pp. 155–164.
- England P. On shear stresses, temperatures, and the maximum magnitudes of earthquakes at convergent plate boundaries // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2018. V. 123. pp. 7165–7202.

- England P.C., Katz R.F. Melting above the anhydrous solidus controls the location of volcanic arcs // *Nature*. 2010. V. 467. pp. 700–704.
- England P., Wilkins C. A simple analytical approximation to the temperature structure in subduction zones // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 159. pp. 1138–1154.
- Karato S., Wu P. Rheology of the upper mantle: a synthesis // *Science*. 1993. V. 260(5109). pp. 771–778.
- Kincaid C., Griffiths R.W. Variability in flow and temperatures within mantle subduction zones // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2004. V. 5(6), Q06002. pp. 1–20. doi: 10.1029/2003GC000666.
- Kincaid C., Sacks I.S. Thermal and dynamical evolution of the upper mantle in subduction zones. // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102(B6). pp. 12295–12315.
- McKenzie D.P. Speculations on the consequences and causes of plate motions // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1969. V. 18(1608). pp. 1–32.
- Meschede M. Lithosphere: Structure and Composition. In: Harff J., Meschede M., Petersen S., Thiede J. (Eds.). *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Dordrecht: Springer, 2015. doi: 10.1007/978-94-007-6644-0_86-1.
- Molnar P., England P. Temperatures, heat flux, and frictional stress near major thrust faults // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. pp. 4833–4856.
- Peacock S.M. Advances in the thermal and petrologic modeling of subduction zones // *Geosphere*. 2020. V. 16(4). pp. 1647–1663.
- Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments // *J. Geodyn.* 2016. V. 100. pp. 7–32.
- Strak V., Schellart W.P. Control of slab width on subduction-induced upper mantle flow and associated upwellings: Insights from analog models // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2016. V. 121. pp. 4641–4654.
- Strehlau J., Meissner R. Estimation of crustal viscosities and shear stresses from an extrapolation of experimental steady state flow data // In: K. Fuchs, C. Froidevaux (Eds.). *Composition, structure and dynamics of the lithosphere–asthenosphere system*. Washington: AGU, 1987. V. 16. pp. 69–87. <https://doi.org/10.1029/GD016p0069>.
- Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics*. Cambridge University Press. 2002. 456 p.
- van Keken P.E., Hacker B.R., Syracuse E.M., Abers G.A. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, No B01401, doi: 10.1029/2010JB007922. 1–15.
- van Keken P.E., Kiefer B., Peacock S.M. High-resolution models of subduction zones: Implications for mineral dehydration reactions and the transport of water into the deep mantle, // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2002. V. 3. No. 10, 1056. pp. 1–20. doi:10.1029/2001GC000256.
- Xu Y., Weidner D.J., Chen J., Vaughan M.T., Wang Y., Uchida T. Flow-law for ringwoodite at subduction zone conditions // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 136. pp. 3–9.
- Yasuda A., Fujii T., Kurita K. Melting phase relations of an anhydrous mid-ocean ridge basalt from 3 to 20 GPa: Implications for the behavior of subducted oceanic crust in the mantle // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99(B5). pp. 9401–9414.
- Zhang J., Herzberg C. Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1 from 5.0 to 22.5 GPa // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99(B9). pp. 17729–17742.

Информация об авторах:

Кирдяшкин Алексей Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: aak@igm.nsc.ru

Кирдяшкин Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: agk@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kirdyashkin A.A., Dr. Sci. (Geol-Miner.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief of the Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: aak@igm.nsc.ru

Kirdyashkin A.G., Dr. Sci. (Tech.), Leading Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: agk@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2021; одобрена после рецензирования 05.10.2021; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 30.05.2021; approved after reviewing 05.10.2021; accepted for publication 13.03.2023

Научная статья
УДК 551.244.2+553.98
doi: 10.17223/25421379/26/2

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ ВЕНД-КЕМБРИЙСКИХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЮГЕ НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ



Алексей Владимирович Плюснин¹, Марьяна Игоревна Гёкче²,
Роман Дмитриевич Шаваров³, Евгений Владимирович Никулин⁴

^{1, 2, 3, 4} ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¹ a.v.plyusnin@mail.ru

² gyokche_mi@irkutskoil.ru

³ shavarov_rd@irkutskoil.ru

⁴ nikulin_ev@irkutskoil.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения влияния тектонических и геодинамических факторов на венд-кембрийский карбонатный резервуар юга Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА). В ходе исследований были использованы геолого-геофизические данные глубокого бурения скважин и результаты интерпретации сейсморазведочных данных методом МОГТ 2D и 3D. Детальный анализ сейсмических материалов позволил описать строение структурных этажей, а также разделить подсолевой структурный этаж на две части: непский, преимущественно терригенный, и тирско-среднеусольский, преимущественно карбонатный, выделить сейсмогеологические комплексы. Деформация карбонатного комплекса повлияла на резервуар – нарушила его целостность и флюидопроводность. Вызванная ей гидродинамическая перестройка изменила первичную пористость коллекторов, а также послужила причиной блокового строения залежей и образования разных флюидалных контактов, что подтверждается испытаниями и работой скважин месторождений углеводородов. Влияние соляной тектоники показано на примере разреза скважины Аяская 88, в которой основное воздействие пришлось на карбонатный осинский продуктивный горизонт. Выделенные структурно-текстурные особенности пород отражают историю развития территории. Разрушение карбонатного резервуара происходило под действием вышележащих солей. Складкообразование и разрушение залежей отмечены только в усольских карбонатных породах. Тэтэрские отложения характеризуются нормальным залеганием. Наличие галогенной перемычки с вышележащими породами способствовали их сохранению, обеспечив скольжение вышележащего комплекса. Для рассмотрения изменений на уровне коллектора приведена краткая история стадийности минералообразования, основанная на многолетних исследованиях авторов в данном регионе. На стадии диа- и катагенеза происходило образование пород и перераспределение вещества. Подчеркнута связь стадии термального катагенеза с проявлением траппового магматизма. Благодаря ему активизировался новый этап циркуляции подземных вод и их последующее остывание. Помимо вторичного минералообразования происходило заражение сероводородом пластовых вод и углеводородов, источником которого были сульфатные породы, вступившие в реакцию с окислителем – водой от парового фронта, причиной которого послужил трапповый магматизм.

Ключевые слова: кембрий, осадочный чехол, трапповый магматизм, галогенная формация, тектоника, геодинамика, МОГТ 3D, литология, Непско-Ботуобинская антеклиза, Сибирская платформа

Для цитирования: Плюснин А.В., Гёкче М.И., Шаваров Р.Д., Никулин Е.В. Геодинамические и тектонические факторы формирования и разрушения карбонатных венд-кембрийских залежей углеводородов на юге Непско-Ботуобинской антеклизы // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 20–35. doi: 10.17223/25421379/25/2

Original article
doi: 10.17223/25421379/26/2

GEODYNAMIC AND TECTONIC FACTORS FOR THE FORMATION AND DESTRUCTION OF THE CARBONATE VENDIAN-CAMBRIAN HYDROCARBON RESERVES IN THE SOUTHERN OF THE NEP-BOTUOBA ANTECLISE

Alexey V. Plyusnin¹, Maryana Ig. Gyokche², Roman D. Shavarov³, Evgeny V. Nikulin⁴

^{1, 2, 3, 4} ООО Irkutsk Oil Company, Irkutsk, Russia

¹ Tyumen State University, Tyumen, Russia

¹ a.v.plyusnin@mail.ru

² gyokche_mi@irkutskoil.ru

³ shavarov_rd@irkutskoil.ru

⁴ nikulin_ev@irkutskoil.ru

Abstract. The paper presents the results of studying the influence of tectonic and geodynamic factors on the Vendian-Cambrian carbonate reservoir in the south of the Nepa-Botuoba anticline (NBA). In the course of the research, geological and geophysical data from deep well drilling and the results of interpretation of seismic data using the 2D and 3D CDP methods were used. A detailed analysis of seismic data made it possible to describe the structure of the structural stages, as well as to divide the subsalt structural stage into two parts: the Nepa, predominantly terrigenous, and the Tirsko-Middle Usolian, predominantly carbonate, and to distinguish seismogeological complexes. Deformation of the carbonate complex affected the reservoir - it violated its integrity and fluid conductivity. The hydrodynamic restructuring caused by it changed the primary porosity of the reservoirs, and also caused the block structure of deposits and the formation of various fluid contacts, which is confirmed by testing and well operation of hydrocarbon fields. The influence of salt tectonics is shown on the example of the section of the Ayanskaya 88 well, in which the main impact was on the carbonate Osinsky productive horizon. The identified structural and textural features of the rocks reflect the history of the development of the territory. The destruction of the carbonate reservoir occurred under the action of overlying salts. Folding and destruction of deposits are noted only in Usolsky carbonate rocks. Teter deposits are characterized by normal occurrence. The presence of a halogen bridge with overlying rocks contributed to their preservation, ensuring the sliding of the overlying complex. To consider changes at the reservoir level, a brief history of the staging of mineral formation is given, based on many years of geological research by the authors in this region. At the stage of diagenesis and catagenesis, the formation of rocks and the redistribution of matter took place. The connection between the stage of thermal catagenesis and the influence of trap magmatism, the rocks of which occur directly in the vicinity of the Middle Usol Subformation, is emphasized. Due to the influence of trap magmatism, a new stage of groundwater circulation and their subsequent cooling became more active. In addition to secondary mineral formation, formation waters and hydrocarbons were contaminated with hydrogen sulfide, the source of which was sulfate rocks that reacted with an oxidizing agent – water from the steam front. The source of steam front was trap magmatism.

Keywords: cambrian, sedimentary cover, trap, halogen formation, tectonics, geodynamics, CDP 3D, lithology, Nepa-Botuoba anticline, Siberian Platform

For citation: Plyusnin A.V., Gyokche M.I., Shavarov R.D., Nikulin E.V. (2023) Geodynamic and tectonic factors of the formation and destruction of carbonate Vendian-Cambrian hydrocarbon deposits in the south of the Nepa-Botuoba anticline. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 20–35. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/2

Введение

Изучение тектонических и геодинамических факторов, повлиявших на формирование и разрушение залежей углеводородов (УВ), на сегодняшний день является не только приоритетным направлением, но и тесно связанным с концептуальными основами современной теоретической геологии. Выявление особенностей влияния различных факторов на нефтегазоносность позволит в дальнейшем усовершенствовать методику прогноза залежей и проектирования разработки месторождений.

В данной работе рассматриваются факторы и их влияние на венд-кембрийский мегарезервуар: а) тектонический фактор – образование складок и разрывных нарушений различного порядка; б) геодинамический фактор – трапповый магматизм; в) постседиментационный фактор (вторичное преобразование пород коллекторов), активизация которого происходила под действием вышеперечисленных факторов. Высокая степень изученности района работ ООО «Иркутская нефтяная компания» предоставляет возможность детально исследовать данную проблему.

Материал и методы

Работа выполнена на основе исследований отложений венд-кембрийского возраста геолого-геофи-

зическими методами в рамках проведения поисково-разведочных работ на нефть и газ.

Для наглядного представления о строении разреза осадочного чехла производились структурные построения на основании данных обработки и интерпретации сейсморазведочных работ методом МОГТ 2D и 3D (рис. 1, А). При разделении осадочного чехла на сейсмогеологические комплексы использовалась литература по региональной геологии района исследования [Гайдук, Прокопьев, 1999; Бондарев, Крылатков, 2001; Мельников, 2009; Семинский и др., 2019].

При работе с керновым материалом скважины Аянская 88 использованы геолого-геофизические данные глубокого бурения, включающие в себя гамма- и нейтронный-гамма каротажи, акустический каротаж. Материалы вместе с результатами гамма-сканирования керна позволили произвести привязку его к стволу скважины. Производилось литологическое описание скважины и интерпретация результатов с использованием трудов [Вожов, Чернова, 1999; Чамов, 2008].

В изученном разрезе произведен отбор 47 проб на рентгеноструктурный анализ (РСА). Исследование образцов произведено в лаборатории ООО «Арктик-ГЕРС» (г. Тверь). Минералогический состав пород изучен методом РСА с использованием рентгенодифрактометрического метода на приборе ДРОН-

ЗМ, регистрирующем дифракционную картину с помощью счетчика квантов. Результаты анализа поступали на ЭВМ; для обработки и интерпретации спектрограмм применялись специальные программные средства со встроенной библиотекой эталонных спектрограмм.

Построение карт толщин интересующих стратиграфических уровней выполнено на основе данных корреляции скважин согласно схемам [Шемин, 2007; Мельников, 2009].

Для построения карты концентраций H₂S были использованы данные по нефти средней усольской подсистемы (осинский продуктивный горизонт). Замеры концентраций производились по поверхностным пробам в промысловой лаборатории на хроматографе Хроматэк-Кристалл.

В работе освещена южная часть НБА. Под южной частью понимается район Кийского, Ярактинского, Большетирского и Марковского лицензионных участков (ЛУ) (рис. 1, В).

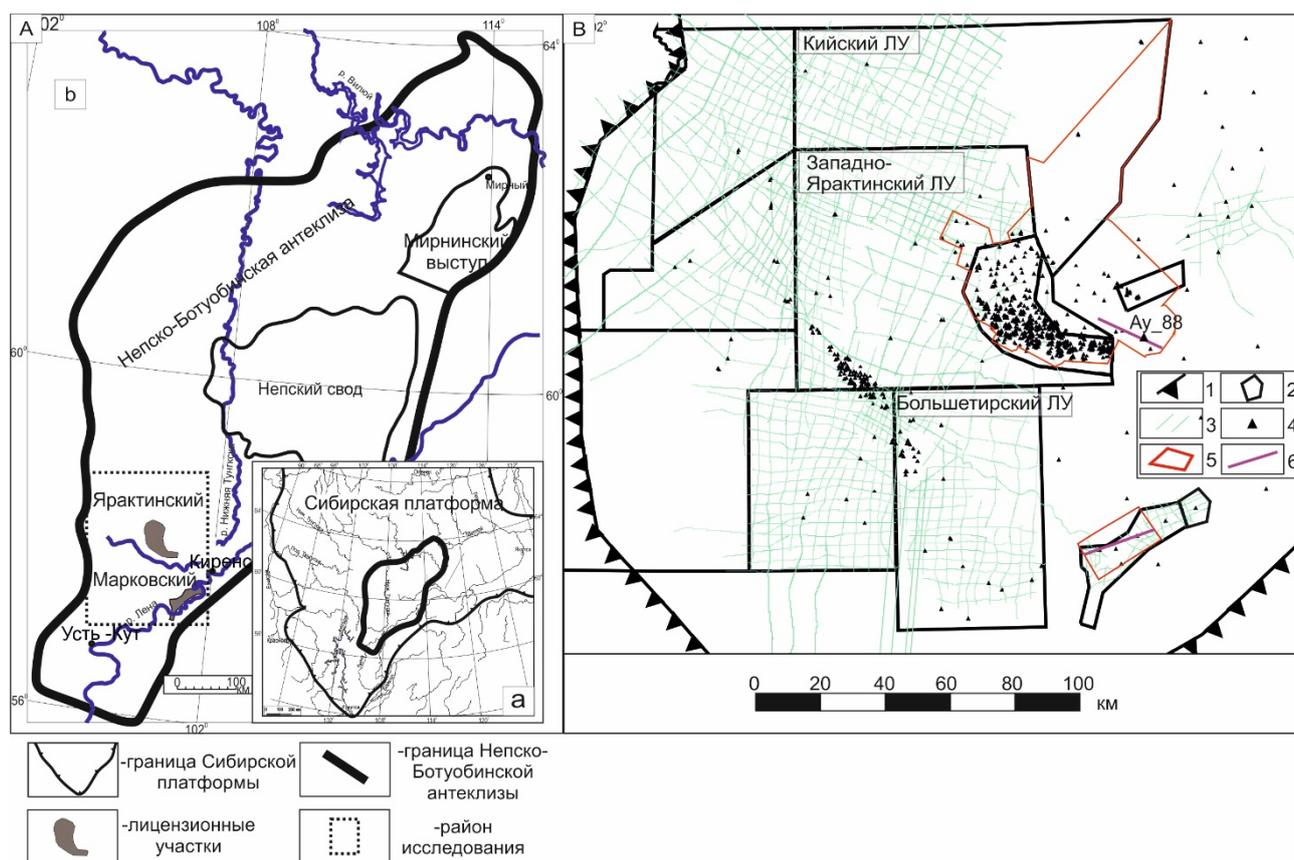


Рис. 1. Район исследований (а) и местоположение лицензионных участков (б) на фрагменте тектонической схемы Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА) Сибирской платформы по [Тектоническая карта..., 2005] с изменениями авторов (А). Карта фактического материала (В)

1 – границы НБА; 2 – границы ЛУ; 4 – сейсмические профили 2D; 4 – скважины; 5 – участки работ МОГТ-3D; 6 – местоположение описываемых сейсмических разрезов

Fig. 1. Study area (a) and location of license areas (b) on a fragment of the tectonic scheme of the Nepsko-Botuoba anticline (NBA) of the Siberian platform after [Tectonic map..., 2005] with changes by the authors (A). Map of factual material (B)

1 – borders of the NBA; 2 – boundaries of the LA; 4 – line seismic lines 2D; 4 – wells; 5 – border 3D seismic

Краткая геологическая характеристика

Район исследования расположен в южной части Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА), в зоне ее сочленения с северо-восточным окончанием Ангаро-Ленской ступени и северо-западным бортом Предпатовского прогиба, между Непским сводом и Усть-Кутским валом. Непско-

Ботуобинская антеклиза выделена в 1975 г., она оконтурена большей частью по изогипсе – 2000 м. Её граница имеет пликативно-дизъюнктивный характер. Непско-Ботуобинская антеклиза осложнена двумя основными положительными структурами I порядка – Непским сводом и Мирнинским выступом [Геология..., 1981; Шемин, 2007; Мельников, 2009].

Породы кристаллического фундамента вскрыты десятками скважин и представлены гранито-гнейсами. Они выделены в *нижний структурный этаж*, архей-раннепротерозойский сейсмогеологический комплекс. Осадочный чехол снизу вверх дифференцируется на следующие комплексы:

Подсолевой структурный этаж разделен на две части. *Непский сейсмогеологический комплекс* залегает на породах кристаллического фундамента, коры выветривания, представлен терригенными отложениями неп-ского горизонта и нижней пачки нижнетирской подсвиты тирской свиты тирского горизонта верхнего венда [Решения..., 1989; Плюснин, Гёкче, 2020]. В данном структурном этаже неравномерно развиты дизъюнктивные нарушения различных порядков, от локальных малоамплитудных до глубинных корневых, распространяющихся на десятки километров (рис. 2, 3).

Тирско-среднеусольский сейсмогеологический комплекс представлен терригенно-карбонатными породами и снизу вверх включает отложения верхней пачки нижнетирской подсвиты, верхнетирской подсвиты тирской свиты тирского горизонта и даниловский горизонт верхнего венда, а также нижнюю и верхнюю подсвиты усольской свиты усольского горизонта нижнего кембрия. В данном комплексе развиты дизъюнктивные и пликативные нарушения, связанные главным образом со складчато-надвиговыми деформациями, проявляющимися в Марковско-Ичерской, Непской зоне, граничащей с Байкало-Патомской складчатой областью, а также наличием соляной тектоники [Сметанин, 2000]. Данные деформации, по мнению исследователей [Беляев и др., 2009], происходили, предположительно, в период от позднекаледонской до позднегерцинской фаз складчатости, что примерно соответствует девон-триасовому интервалу.

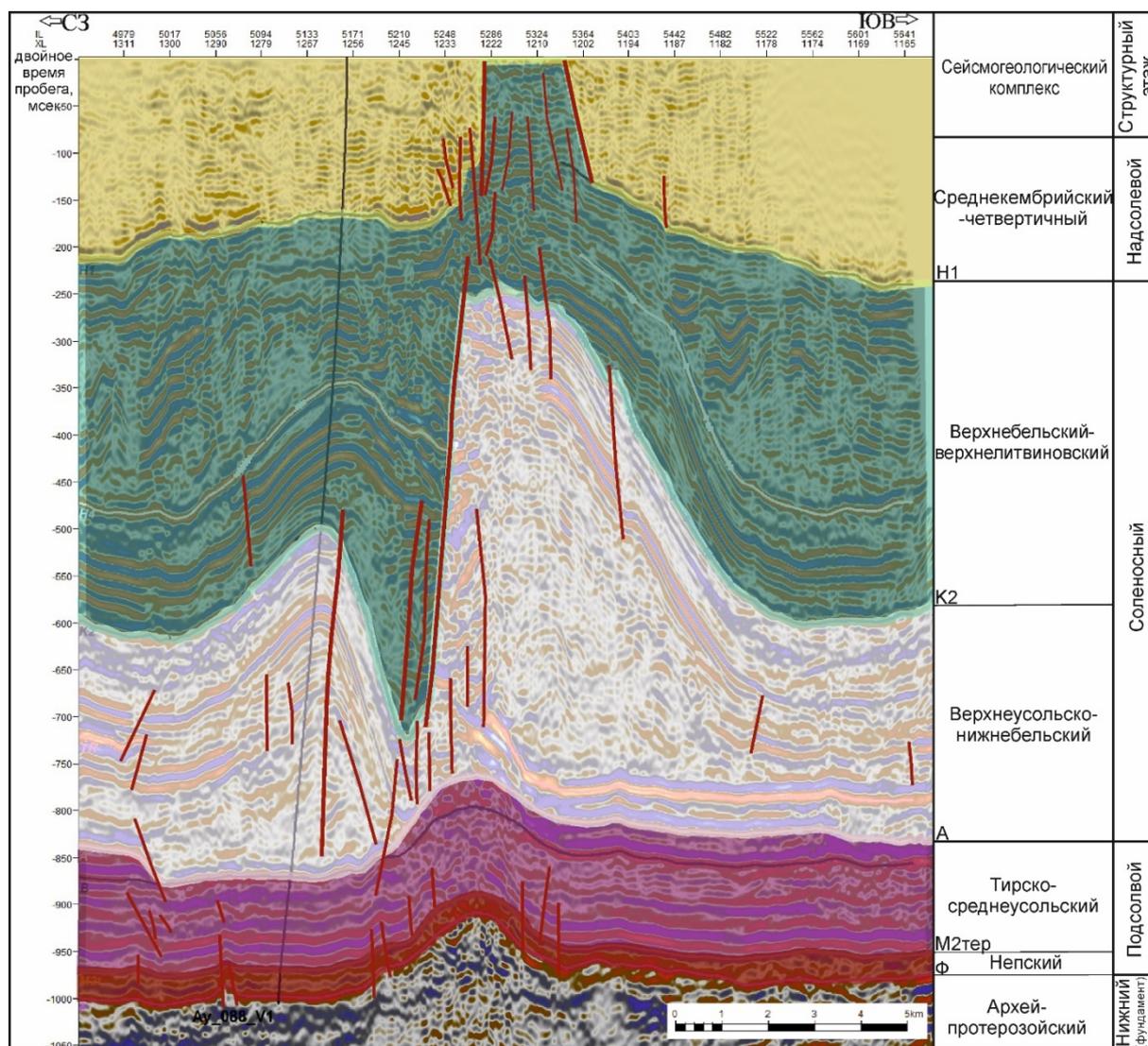


Рис. 2. Сейсмический разрез Аянского ЛУ

Fig. 2. Seismic section of the Ayanskiy license area

Под «соляной тектоникой» понимается «совокупность тектонических форм и процессов, возникающих и развивающихся в соленосных толщах вследствие низкого удельного веса соли при ее компактном сложении; пластичность соли расценивается при этом как свойство, определяющее не причины движения, а лишь его характер. Общие тектонические напряжения и движения не порождают соляной

тектоники» [Косыгин, 1969]. При наличии достаточно мощных соляных пластов для проявления соляной тектоники необходимы следующие условия: положительная разница между средней плотностью надсолевых пород, плотностью соли и неравномерность нагрузки на соляные пласты (неровности в их кровле, неравномерность плотности надсолевых пород и т.д.) [Косыгин, 1973].

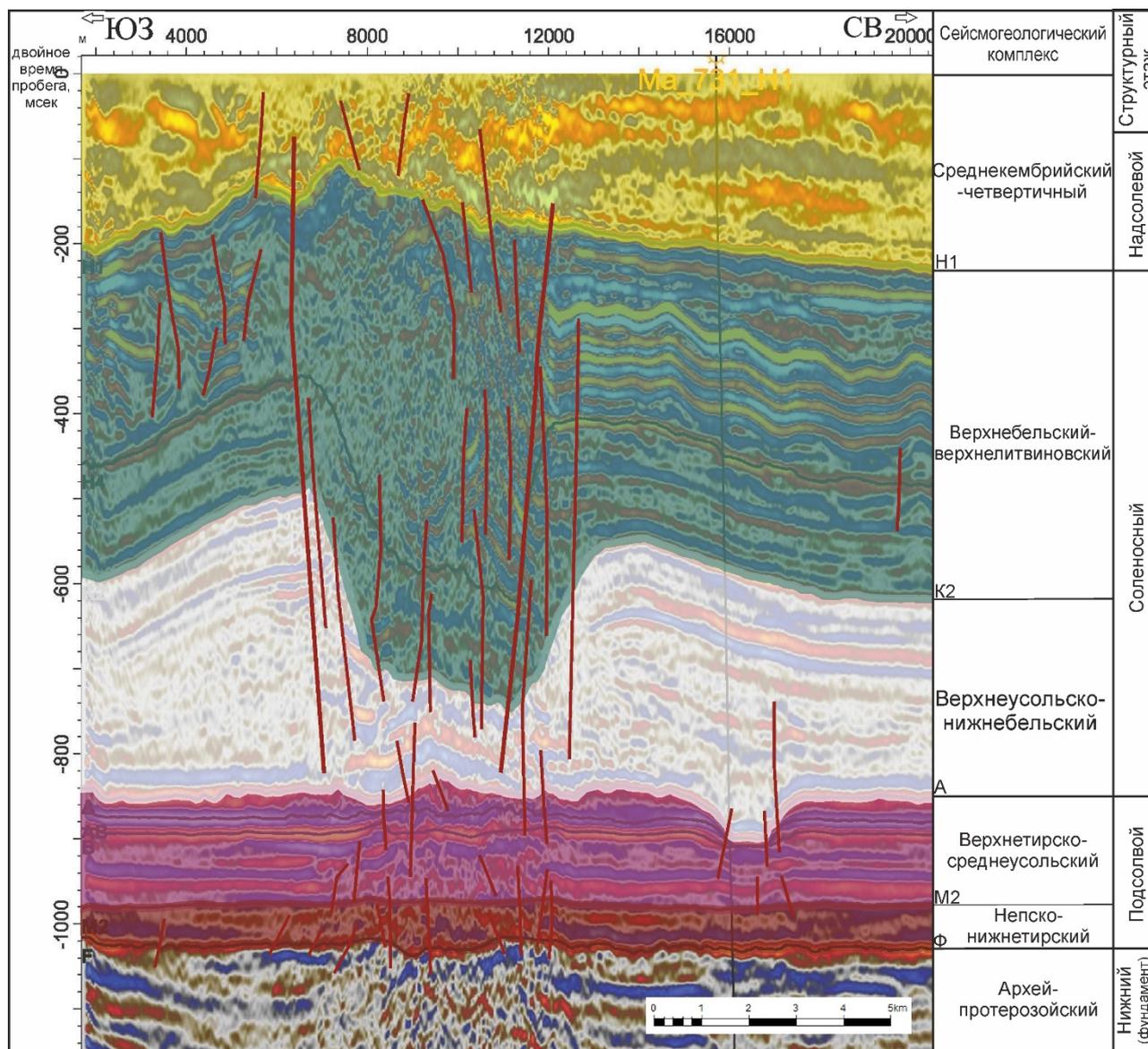


Рис. 3. Сейсмический разрез Марковского ЛУ

Fig. 3. Seismic section of Markovsky license area

Соленосный этаж включает отложения верхнеусольской подсвиты, а также бельской, булайской, ангарской и литвинцевской свит нижнего кембрия. Данный комплекс имеет более сложное строение, в нем интенсивно развиты дизъюнктивные и плика-

тивные нарушения, связанные с проявлением соляной тектоники. Отмечаются колебания мощностей отложений усольской, бельской и ангарской свит, обусловленные резкими изменениями толщины солей. Основные изменения связаны с солями ангар-

ской свиты, которые образуют узкие, протяженные, высокоамплитудные складки (часто осложненные разрывными нарушениями), сформированные в условиях компрессионного тектонического сжатия [Мигурский, 2010]. Траппы представлены долеритами темно-серыми до черных. Возраст их определен калий-аргоновым методом как позднепалеозойско-триасовый. Их формирование, вероятно, хронологически связано с заложением и развитием Тунгусской синеклизы, юго-восточный борт которой накладывается на северо-западный склон Непско-Ботубинской антеклизы [Старосельцев, Лебедев, 1975; Фролов и др., 1976; Мельников и др., 1977; Вожов и др., 1981; Вдовыкин и др., 1983; Мигурский, 1983, 1986; Мигурский, Старосельцев, 1989; Лобанов и др., 1991; Шемин, 2007; Гажула, 2008; Мельников, 2009]. Мощность пород трапповой формации изменяется от 5 до 150 м.

Надсолевой этаж состоит из отложений среднего, верхнего кембрия и ордовика, выделяется от кровли литвинцевской свиты до дневной поверхности и сложен преимущественно терригенными образованиями. Для него характерно зональное наличие четких, линейно-вытянутых, узких, высокоамплитудных антиклинальных складок, осложненных тектоническими нарушениями.

Строение разреза пограничных отложений соленосного и подсолевого структурного этажей

Основным фактором, который повлиял на разрушение и складкообразование усольских карбонатных пород, является соляная тектоника. По результатам детального описания керна скважины Аянская 88 авторами выделены следующие литологические типы пород с характерными структурными и текстурными особенностями, отражающими историю развития территории (рис. 4):

1) каменная соль крупнокристаллическая (размер кристаллов в среднем составляет 0,5–1 см), полосчатая за счет смены цвета в циклах 2–5 см, реже массивная;

2) каменная соль крупнокристаллическая, полосчатая за счет ориентировки интракластов глинистого доломита угловатой формы размером от 0,2 до 3 см.

Первые два литотипа являются первичными неизмененными солями без признаков пластичного течения. Полосчатость характеризует особенности садки галита в первичной рапе. Обломки карбонатных пород могли поступать с краевых частей соляной лагуны при повышении уровня вод и подмыва берегов при поступлении новой порции морской воды (рис. 5, а):

1) каменная соль гигантокристаллическая (размер кристаллов до 10 см) массивная;

2) каменная соль гигантокристаллическая, массивная, с многочисленными глинистыми включениями и замутненными кристаллами, с интракластами карбонатных пород угловатой формы размером от 1–5 до 10 см на контакте с нижележащими карбонатными породами.

Гигантокристаллические соли приурочены к участкам пласта, которые подвергались пластичному течению. На это указывает размер кристаллов, который не характерен для большей части пласта каменных солей, приуроченность к контакту с карбонатными породами, замутнение кристаллов и большое содержание глинистых включений, что свидетельствует о кристаллизации соли из «загрязненного» рассола. Все это свидетельствует о непосредственном контакте солей с карбонатными породами. Обмен глинистыми примесями и включениями мог происходить только под действием эрозии пластичных солей по карбонатным породам. При этом важно отметить, что признаки «загрязнения» солей проявляются на расстоянии до 2 м от кровли нижележащих карбонатов.

Следующая группа литотипов характерна для пород средней и нижней подсвиты усольской свиты, испытавших перемещение:

1) доломиты глинистые, брекчированные (размер обломков от 0,2 до 1 см), полосчатые за счет ориентации обломков (рис. 5, б);

2) карбонатная брекчия разнообломочная, преимущественно крупнообломочная (от 1 до 4 см), состоящая из обломков известняков с реликтовой микробиальной структурой, доломитов сульфатизированных разнокристаллических, с несохранившейся первичной структурой, реже доломитов зернистых со структурой грейнстоун. Цемент представлен разнокристаллическим галитом и ангидритом (рис. 5, с).

Брекчированные карбонатные породы в основном приурочены к контакту с каменными солями. Размер обломков зависит от первоначальных свойств пород. Образовались они при давлении и движении вышележащих солей. Наличие угловато-окатанных и угловатых обломков карбонатных пород с различной структурой свидетельствует о значительном горизонтальном перемещении.

1. Каменная соль разнокристаллическая с карбонатной брекчией, заполняющая разноориентированные трещины видимой шириной до 20–30 см (рис. 5, д).

Следующая группа литотипов характерна для участков с субвертикальным, наклонным и пологим залеганием пород, которое подчеркнуто ориентировкой структуры и текстуры.

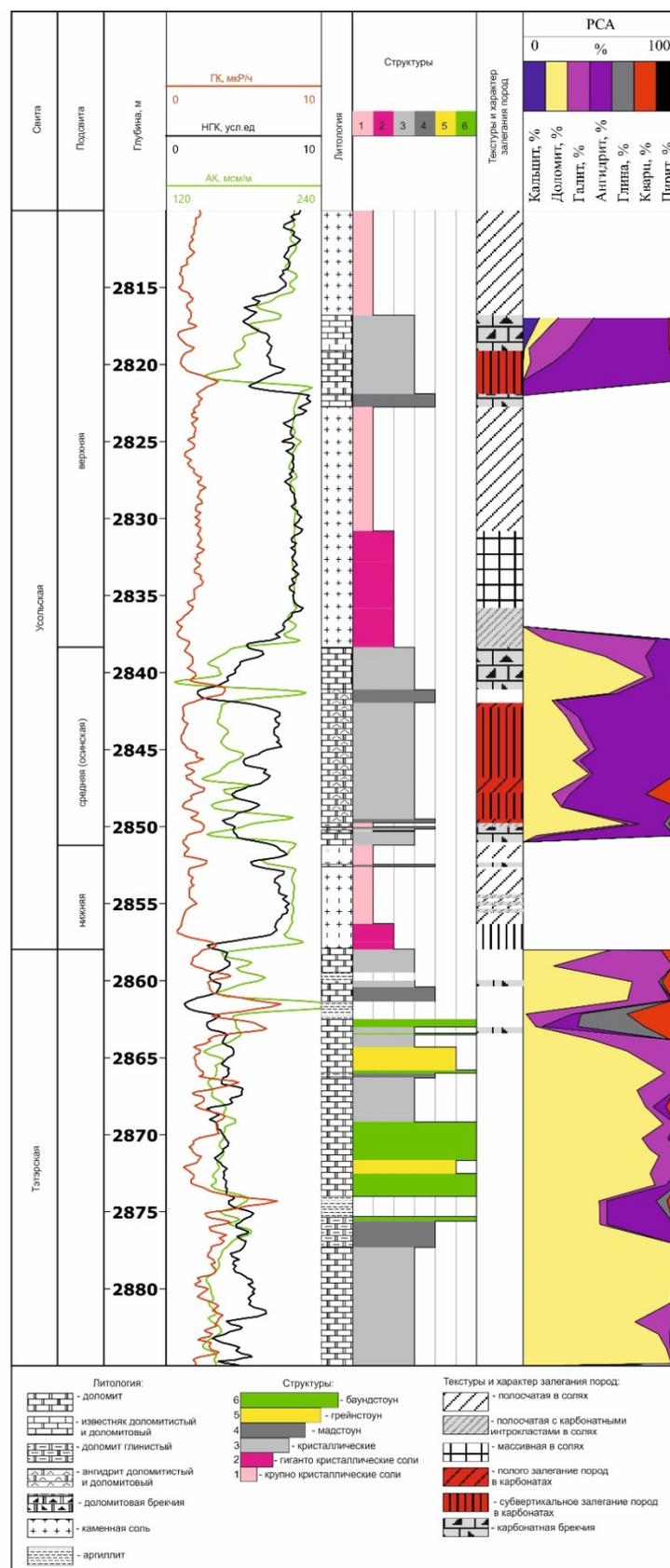


Рис. 4. Геолого-геофизический разрез скважины Аянская 88, характеризующий тип разреза карбонатного венда–кембрия под складкой солей

Fig. 4. Geological and geophysical section of the Ayanskaya 88, well characterizing the type of section of the carbonate Vendian–Cambrian under the salt fold

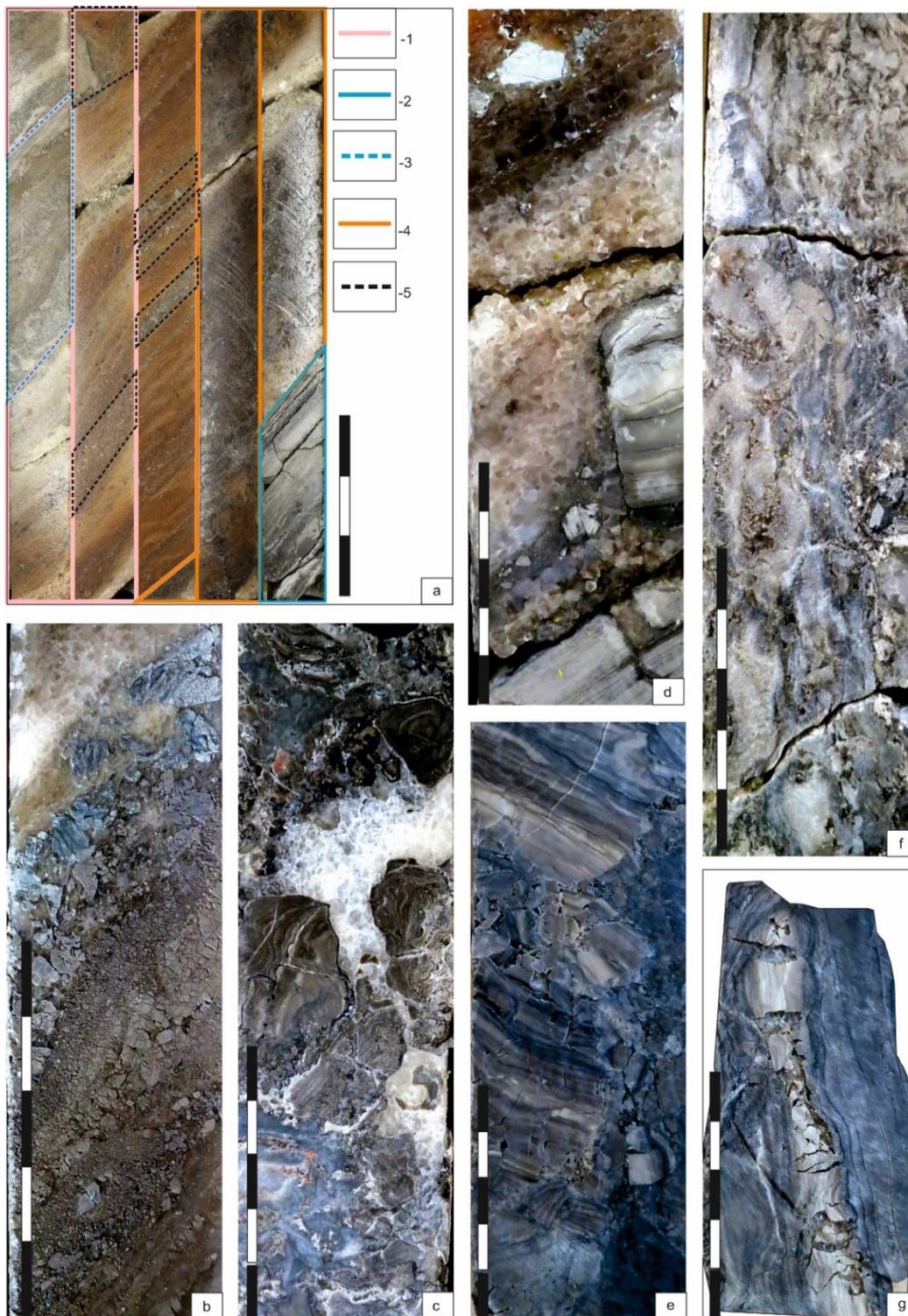


Рис. 5. Литотипы галогенно-карбонатных пород, приуроченных к зоне складок солей

а – фотографии ядра с выделенными литологическими типами каменных солей; 1 – крупнокристаллические полосчатой текстуры; 4 – гигантокристаллические массивной текстуры; 5 – крупнокристаллические с карбонатной брекчией; 2 – карбонатные породы; 3 – карбонатные брекчии. б–с – литотипы карбонатных брекчий; d – тектоническая трещина, залеченная каменной солью; е–g – литотипы карбонатных пород, характеризующих участки с субвертикальным и наклонным залеганием. Длина масштабной линейки: а – 30 см; б–g – 5 см

Fig. 5. Lithotypes of halogen-carbonate rocks confined to the salt fold

а – photographs of the core with the identified lithological types of rock salts; 1 – coarsely crystalline, banded texture; 4 – giant crystalline massive texture; 5 – coarsely crystalline with carbonate breccia; 2 – carbonate rocks; 3 – carbonate breccias. б–с – lithotypes of carbonate breccias; d – tectonic fissure healed with rock salt; е–g – lithotypes of carbonate rocks characterizing areas with subvertical and oblique occurrence. The length of the scale bar: а – 30 cm; б–g – 5 cm

2. Доломиты разнокристаллические с реликтовой микробиальной структурой, реже кристаллические с несохранившейся структурой, с брекчиевидной текстурой без следов перемещения, с многочисленными субвертикальными и горизонтальными стилолитизированными трещинами. Единичное пространство между обломками открытое, занятое черным глинистым органическим веществом, реже залечено галитом (рис. 5, e).

3. Доломиты сульфатизированные, разнокристаллические, с несохранившейся структурой, реже с реликтовой микробиальной структурой, с субвертикальной, наклонной тонкослоистой волнистой и микробиальной текстурой (субвертикальное и наклонное залегание) (рис. 6, f).

4. Доломиты глинистые и сульфатизированные, разнокристаллические, с несохранившейся первичной структурой, с тонкой волнистой субвертикальной, наклонной текстурой, с субвертикальными трещинами шириной до 1–2 см, по которым развиты окремнение и галитизация (рис. 6, g).

Стадийность минералообразования в нижнекембрийском резервуаре

Седиментационная стадия характеризует особенности осадконакопления в позднеосинское время на переходе к главной фазе усольского соленакопления. Так, на регрессивной стадии возвышающиеся участки карбонатной платформы были выведены в условия субэриальной экспозиции и подвергались процессам поверхностного карстования с образованием специфического комплекса пород и минералов. Описание всего разнообразия вторичных преобразований в одной работе не представляется возможным. Более подробно о строении и вторичном преобразовании коллекторов средней (осинской) подбиты усольской свиты можно познакомиться в работе авторов [Токарев и др., 2021]. На притопленной части платформы из воды постепенно выпадали минералы, как реакция на изменения солёности: ангидрит => галит. На изучаемой площади закартированы отложения сульфатной лагуны (рис. 6, a; 7, a). Мощность солей верхней подбиты усольской свиты показана на рис. 6, b.

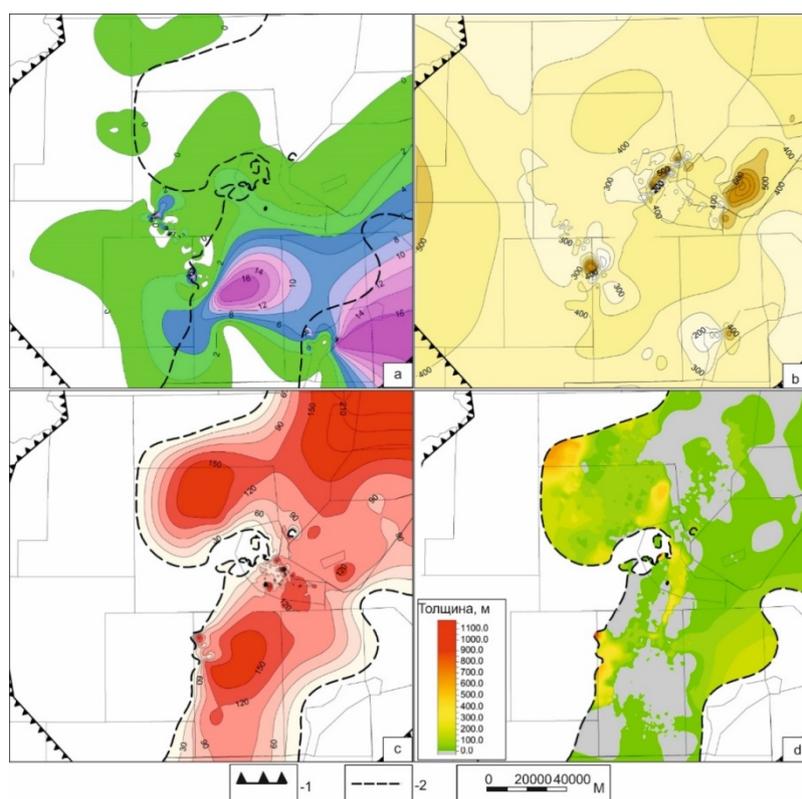


Рис. 6. Мощность отложений сульфатной лагуны (a); мощность верхней подбиты усольской свиты (усольских солей) (b); распространение и мощность пород траптовой формации (c); расстояние от кровли осинской подбиты до подошвы магматических пород (d)

1 – границы НБА; 2 – границы пород траптовой формации

Fig. 6. Thickness of sediments of the sulfate lagoon (a); thickness of the upper subformation of the Usolskaya suite (Usolsky salts) (b); distribution and thickness of trap magmatism (c); distance from the roof of the Osinsky subformation to the bottom of igneous rocks (d)

1 – borders of the NBA; 2 – trap rock boundaries

На стадии диа- и катагенеза происходило преобразование пород и перераспределение вещества. По мнению исследователей [Вожов, Чернова, 1999], процесс взаимного преобразования пород и рассолов при диагенезе в изучаемом районе был весьма продолжителен и оценивается в 100–200 млн лет. В этот период

в уплотняющихся под действием литостатического давления водно-солевых осадках осуществлялось взаимное преобразование. При этом восходящие и нисходящие рассолы взаимодействовали с осадками и вмещающими породами, изменяя их емкостные свойства в направлении улучшения, реже – ухудшения.

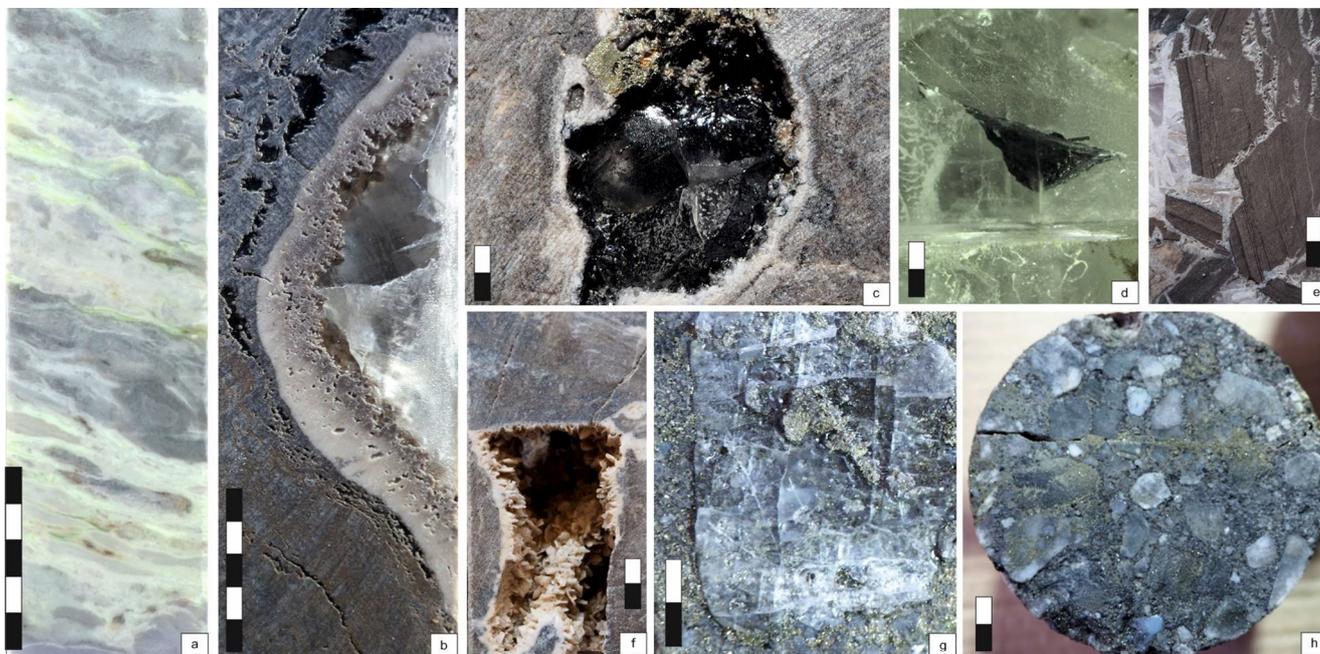


Рис. 7. Фотографии керна

а – ангидрит с полосчатыми зонами деструкции серы; б – известняк доломитистый с широкой зоной вторичных преобразований термальной стадии; с – пещеристая полость в доломите, залеченная галитом с включениями УВ; d – капля УВ в кристалле галита; е – доломитовая брекчия, сцементированная гидротермальным доломитом, пустоты которого залечены галитом; f – кристаллические жилы крупнокристаллического гидротермального доломита по стенкам карстовой полости; g – песчаник гравелитистый с субвертикальной трещиной, залеченной пиритом; h – поверхности трещины песчаной гравелитистого с обильной пиритизацией и поздней галитизацией. Масштабная линейка: а–b – 5 см; с–h – 2 см

Fig. 7. Photos of the core

а – anhydrite with banded zones of sulfur destruction; b – dolomitic limestone with a wide zone of secondary transformations of the thermal stage; c – cavernous cavity in dolomite healed with halite with HC inclusions; d – a drop of hydrocarbons in a halite crystal; e – dolomitic breccia cemented by hydrothermal dolomite, voids of which are filled with halite; f – crystalline veins of coarse-grained hydrothermal dolomite along the walls of the karst cavity; g – gravelly sandstone with subvertical fractures healed with pyrite; h – fracture surfaces of gravelly sandstone with abundant pyritization and late replacement of empty porosity with halite. Scale bar: a–b – 5 cm; c–h – 2 cm

На качественно новом этапе происходили процессы взаимодействия пород с рассолами во время траппового магматизма (термальный катагенез), нарушившего сложившиеся равновесные температурный и барический режимы. Следствия этих процессов в виде вторичных полиминеральных образований установлены по всему венд-нижнекембрийскому терригенному и галогенно-карбонатному разрезам.

Отдельно стоит остановиться на термальном катагенезе, который связан с прогревом и новым этапом циркуляции подземных вод и их последую-

щем остывании. В исследуемом районе данный процесс зафиксирован в отложениях осинской подсвиты в непосредственной близости с породами трапповой формации. Далее по тексту будет кратко описан механизм вторичного преобразования пород и УВ.

Как известно, в конце палеозоя – начале мезозоя на территории Сибирской платформы происходили грандиозные тектонические события, связанные как с интрузивным, так и эффузивным магматизмом. На исследуемой территории породы трапповой формации занимают уровень верхней подсвиты усольской свиты, а также бельской свиты нижнего кембрия.

Площадь распространения, составленная по результатам интерпретации данных глубокого бурения и сейсморазведки, показана на рис. 6, *c, d*.

Внедрение базитового расплава происходило по ослабленным участкам пород чехла. В нашем случае – это граница карбонатных и галогенных пород усольской свиты. Механические деформации произошли благодаря влиянию герцинской складчатости Байкало-Патомской области и образованием аллохтонов и автохтонов в позднем палеозое [Александров, 1990]. По мнению авторов, это и объясняет распространение пород трапповой формации именно на этом уровне.

В период траппового магматизма из-за возросшей проницаемости осадочного чехла происходили процессы миграции подземных вод и общей гидродинамической перестройки в том числе и в венд-кембрийском комплексе. Минерализация подземных вод увеличивалась за счет растворимости галита при общем повышении температуры недр. При последующем охлаждении недр из таких пересыщенных рассолов происходило выпадение соли, в первую очередь, в наилучших, сохранившихся от трапповых воздействий коллекторах, по которым была возможна циркуляция рассолов. Ухудшение коллекторских свойств имело место не только вблизи силлов и не только в период магматизма, но и вдали от магматических образований и в посттрапповое время, тем не менее, эти процессы все же были инициированы трапповым магматизмом [Гажула, 2008].

Трапповый магматизм сопровождался паровым фронтом, из которого образовывались большие объемы воды. Она в свою очередь, при взаимодействии с породами чехла, могла переходить в рассолы хлоридного или сульфатного состава. Этот фронт по ослабленным зонам мог растворять большое количество солей и ангидритов, тем самым формируя пространство для образования субвулканических тел (рис. 7, *a*).

Фильтрации вод в нижележащие горизонты способствовали уже имеющиеся разломы и трещины Байкало-Патомского надвига. По мере остывания вод происходило постепенное образование минералов: арагонит – кальцит – доломит – ангидрит – галит. Данные минералы наблюдаются в крупных кавернах и пещеристых полостях в осинских карбонатах (рис. 7, *b*). Непосредственно близко с галитом отмечены сульфидные минералы, представленные главным образом, пиритом (рис. 7, *c*). В кристаллах каменной соли наблюдаются запечатанные капли УВ. Это может свидетельствовать о том, что на момент гидродинамической перестройки залежи УВ уже были сформированы (рис. 7, *d*).

На контакте долеритов и карбонатов осинского горизонта наблюдается значительное уплотнение

пород, без их перекристаллизации, с признаками деструкции УВ в пустотно-поровом пространстве.

Отдельно стоит обратить внимание на сернистые воды. Их взаимодействие с УВ привело к образованию сернистых УВ, которые характерны для юга НБА района Марковского и Большетирского ЛУ. Концентрации H_2S в пробах нефти изменяется от 0,01 до 400 ppm, с максимальными концентрациями под контуром пород трапповой формации (рис. 8).

Необходимо отметить, что к зонам, где долериты лежат на осинских карбонатных породах, приурочены участки с высокими пластовыми давлениями [Вахромеев, 2008]. Авторы считают, что вместе с внедрением расплава произошла большая гидродинамическая перестройка в резервуаре, которая могла сопровождаться аномально высокими пластовыми давлениями, приводящими к образованию гидротермокарста.

В литературе можно встретить множество определений термина «карст». Чтобы избежать терминологической путаницы, авторы вслед за Г.А. Максимовичем [Максимович, 1963] понимают под карстом процесс химического и отчасти механического воздействия подземных и поверхностных вод на растворимые проницаемые горные породы. Гидротермокарст – это процесс выщелачивания горных пород нагретыми растворами с образованием и последующим заполнением полостей [Дублянский, 1985]. В карбонатных породах гидротермокарст может сопровождаться интенсивным доломитовым метасоматозом [Warren, 2000]. В литературе границу между холодными и термальными водами проводят в интервале от 10 до 20 °С, таким образом термальными считаются воды с температурой более 20 °С и до фазового перехода раствор–флюид. Для развития карстового процесса необходима совместная реализация четырех условий [Соколов, 1962]: наличие растворимых пород, наличие их трещинной и поровой проницаемости, наличие движущихся вод, наличие у вод агрессивности по отношению к породам. Наблюдаемые гидротермокарстовые зоны в керне скважин принадлежат морфологическому типу пещеры-щели, сформированными восходящими потоками по тектоническим трещинам. Пустоты сформированы под действием термальных растворов, с высокими абсолютными значениями растворенной в воде CO_2 и солей.

В результате гидротермокарста образованы породы, представленные разнокристаллическими доломитами с характерными признаками: изогнутой (седловидной) формой кристаллов, которыми инкрустированы каверны и пещеристые полости высотой до 40 см, шириной превышающей диаметр керна; зебровидной и пятнистой окраской, которая прису-

ща измененным вмещающим породам; развитием разнокристаллических жил, развитым по трещинам видимой длиной до 3 м шириной до 5–10 см; неравномерным развитием крупных и мелких кристаллов,

а так же прожилков пирита (рис. 7, е, ф). Первичная структура пород, подвергнутых гидротермальному метасоматозу, нередко практически не сохраняется.

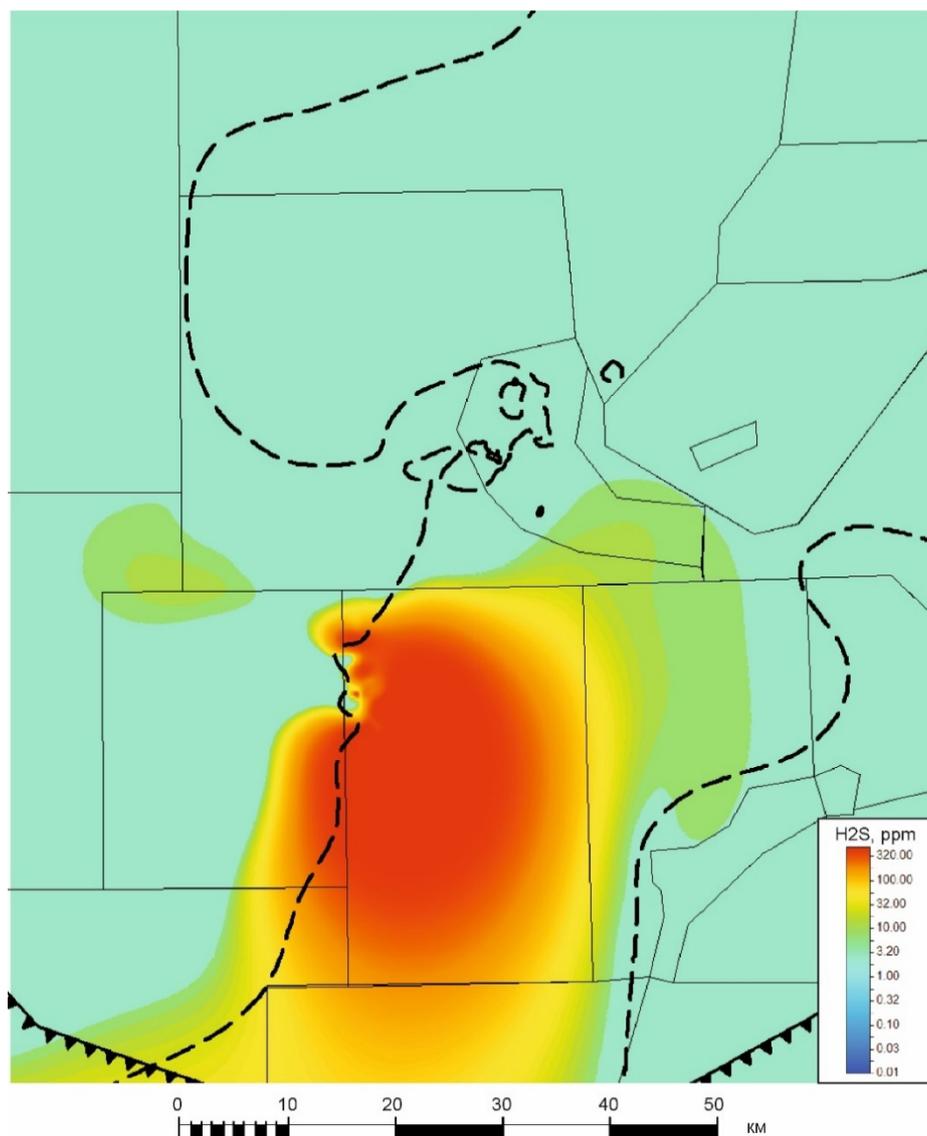


Рис. 8. Карта концентрации H₂S в осинском продуктивном пласте с контурами распространения пород трапповой формации

Fig. 8. Map of distribution of H₂S in Osinskiy reservoir with contours of distribution of rocks of the trap formation

В нижней части осинского пласта наблюдается зона интенсивного дробления пород, карстовые полости заполнены доломитовым щебнем и брекчией с многочисленными трещинами, с жилами и пустотами белого грубокристаллического седловидного доломита. Мощность зоны 15 м. Выше выделяются доломиты с многочисленными разноориентированными залеченными трещинами. Мощность зоны 55 м.

Далее следует зона мощностью 20 м с пещеристыми полостями, инкрустированными доломитом. Перекрывают ее доломиты с залеченными трещинами до контакта с верхнеусольскими солями.

Формирование гидротермокарста должно быть тесно связано с внедрением долеритов и по времени совпадает с главной фазой траппового магматизма Восточной Сибири. Выделяемый интрузиями пар-

вой фронт и CO_2 при смешении могли создать агрессивные воды высокой температуры, которые растворяли соли и карбонатные породы. Вновь образованные пустоты благоприятно повлияли на петрофизические свойства пласта.

По мере проникновения сернистых вод в нижележащие пласты происходило уменьшение концентрации сероводорода. Оставшиеся воды реагировали в терригенных пластах континентального и прибрежно-морского генезиса с железом, образуя пирит. Зоны пиритизации зачастую приурочены к субвертикальным трещинам, внутри которых также наблюдается более позднее галитовое заполнение (рис. 7, g, h).

Обсуждение

Детальная интерпретация сейсмических данных позволила описать строение структурных этажей, а также разделить подсоловой структурных этаж на две части: непский, преимущественно терригенный, и тирско-среднеусольский, преимущественно карбонатный, сейсмогеологические комплексы. Терригенный и терригенно-карбонатный структурные этажи являются наиболее жёсткими. Наиболее деформированной является осинская подсвита усольской свиты, которая расположена на границе с пластичным солевым комплексом. Она же является главной поверхностью сместителя. Деформации могли значительно влиять на резервуары – нарушать целостность, флюидопроводность и первичную пористость коллекторов, а также порождать блоковое строение залежей разных флюидалных контактов, что подтверждается испытаниями и работой скважин месторождений. На площади преобладают разрывные нарушения северо-восточного, реже северо-западного простирания. Плотность их по площади неодинакова – наибольшее количество приурочено к зонам развития линейной складчатости по подсоловым и надсоловым отложениям. Большинство разрывных нарушений относятся к числу малоамплитудных, сбросового и сдвигового типов, и распространены локально и зонально, однако, наблюдаются и сквозные серии тектонических нарушений (рис. 2, 3). Разрывные нарушения, вероятно, могли служить каналами миграции как углеводородов, так и термальных рассольных вод, которые приводили к вторичным изменениям пород.

Влияние соляной тектоники на осинский карбонатный пласт показано на примере разреза скважины Аянская 88. Выделенные структурно-текстурные особенности пород отражают историю развития территории. Деструкция карбонатного резервуара происходила под действием вышележащих солей. Про-

цессы складкообразования и разрушения залежей отмечены только в усольских карбонатных породах. Тэтэрские отложения характеризуются нормальным залеганием. По-видимому, наличие галогенной перемычки с вышележащими породами способствовали их сохранению, обеспечив скольжение вышележащего комплекса.

Для рассмотрения изменений на уровне коллектора приведена краткая история стадийности минералообразования. На стадии диа- и катагенеза происходило образование пород и перераспределение вещества. Авторы отдельно подчеркивают стадию термального катагенеза и связывают ее с влиянием траппового магматизма, породы которого залегают непосредственно на породах среднеусольской подсвиты. Трапповый магматизм способствовал новому этапу циркуляции подземных вод с последующим остыванием. Помимо вторичного минералообразования произошло заражение УВ сероводородом, источником которого были сульфатные породы, вступившие в реакцию с окислителем-водой от парового фронта. В целом вторичное минералообразование значительно ухудшило первичные петрофизические свойства пластов, главным образом, вследствие галитизации и сульфатизации. Отдельно стоит выделить участки гидротермокарста, которые привели к значительному увеличению пустотного пространства.

Заключение

Основными факторами, повлиявшими на резервуары южной части НБА, являются:

1. *Тектонический фактор.* Влияние Байкало-Патомского надвига отразилось на разнопорядковых тектонических нарушениях структурных этажей и деформации, главным образом, соленосного структурного этажа, проявившейся в интенсивном развитии дизъюнктивных и пликативных нарушений, связанных с проявлением соляной тектоники. На примере разреза скважины Аянская 88 показано влияние складок усольских солей на нижележащий подсоловой структурный этаж. В зонах уменьшенных толщин (до 60 м) осинского продуктивного горизонта под складками солей следует ожидать зоны дробления и разрушения залежей УВ. Рассматривая толщины порядка 70–100 м, следует ожидать интенсивную трещиноватость, которая может благоприятно повлиять на коллекторские свойства пласта.

2. *Геодинамический фактор.* В результате траппового магматизма произошла гидродинамическая перестройка, которая способствовала вторичному изменению пород. Наличие зон проработки восходящими горячими водами способствовало образованию гидротермокарста – положительное влияние на

коллекторские свойства. Вторичное минералообразование в пещеристых полостях, кавернах и порах таких минералов как ангидрит и галит, в процессе остывания вод, привели к ухудшению свойств коллекторов (постседиментационный фактор). Наличие

в переходной зоне ангидритов сульфатной лагуны способствовало образованию сернистых вод и дальнейшему заражению УВ в 10–15 км зоне. Наличие сернистых УВ значительно усложняет их добычу и переработку.

Список источников

- Александров В.К.** Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. Новосибирск : Наука, 1990. 100 с.
- Беляев С.Ю., Моисеев С.А., Титов Д.Ю.** Тектоническое развитие Непско-Ботуобинской антеклизы в венде и кембрии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2009. № 7. С. 32–34.
- Бондарев В.И., Крылатков С.М.** Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Екатеринбург, 2001. 193 с.
- Вахромеев А.Г.** Геодинамическая модель формирования аномально высоких давлений флюидов в разрезе осадочного чехла Сибирской платформы // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академия наук Республики Башкортостан. Уфа, 2008. № 12. С. 39–51.
- Вдовыкин Г.П., Бакаев Ю.Г., Зорькина В.А., Панов А.И., Иванов А.Г.** Трапповый магматизм древних платформ в связи с нефтегазоносностью // Обзор ВНИИЭМС: Геол., методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. М., 1983. 39 с.
- Вожов В.И., Кузьмин С.П., Букаты М.Б.** О возможности локализации углеводородных залежей под интрузивными траппами // Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы. Новосибирск : СНИИГГиМС, 1981. С. 87–94.
- Вожов В.И., Чернова Л.С.** Вторичное минералообразование в венд-нижнекембрийских отложениях Непско-Ботуобинской антеклизы // Геология нефти и газа. 1999. № 11. С. 10–16.
- Гажула С.В.** Особенности траппового магматизма в связи с условиями нефтегазоносности Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3, № 1. С. 1–8.
- Гайдук В.В., Прокопьев А.В.** Методы изучения складчато-надвиговых поясов. Новосибирск : Наука, 1999. 160 с.
- Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука.** М. : Недра, 1981. 552 с.
- Дублянский Ю.В.** Гидротермокарст как рудоподготовительный процесс. Новосибирск : Институт геологии и геофизики АН СССР, 1985. 18 с.
- Косыгин Ю.А.** Тектоника. М. : Недра, 1969. 616 с.
- Косыгин Ю.А.** Соляная тектоника Сибирской платформы. Новосибирск : Наука, 1973. № 63. 166 с.
- Лобанов М.П., Сизых В.И., Синцов А.В., Терещенко А.Н., Хренов П.М.** Поясное покровно-складчатое строение юга Сибирской платформы в связи с проблемой минерализации и нефтегазоносности // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. Иркутск, 1991. С. 14–15.
- Максимович Г.А.** Основы карстологии. Т. 1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь : Пермское книжное издательство, 1963. 443 с.
- Мельников Н.В., Воробьев В.П., Ефимов А.О.** Внедрение интрузий долеритов // Геология и нефтегазоносность Лено-Тунгусской провинции. М. : Недра, 1977. С. 103–108.
- Мельников Н.В.** Венд-кембрийский солеродный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия, история развития). Новосибирск : СО РАН, 2009. 148 с.
- Мигурский А.В.** Трапповый магматизм и непские дислокации // Тектоника нефтегазоносных отложений Сибири : сборник научных трудов. Новосибирск : СНИИГГиМС, 1983. С. 97–103.
- Мигурский А.В.** Динамическое воздействие траппового магматизма на нефтегазоносность Непско-Ботуобинской антеклизы // Тектонические критерии прогноза нефтегазоносности Сибирской платформы : сборник научных трудов. Новосибирск : СНИИГГиМС, 1986. 102 с.
- Мигурский А.В., Старосельцев В.С.** Шарьяжное строение зоны сочленения Сибирской платформы с Байкало-Патомским нагорьем // Советская геология. 1989. № 7. С. 9–15.
- Мигурский А.В.** Масштабные латеральные перемещения пород и флюидов на Сибирской платформе // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири : сборник научных трудов. Новосибирск : СНИИГГиМС, 2010. № 1. С. 53–57.
- Плюснин А.В., Гёкче М.И.** Состав и строение непской и тирской свиты Приленско-Непской структурно-фациальной зоны Непско-Ботуобинской антеклизы по результатам изучения кернового материала // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. № 1. С. 75–89.
- Решения** четвертого Межведомственного регионального стратиграфического совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и кембрия внутренних районов Сибирской платформы. Новосибирск : СНИИГГиМС, 1989. 64 с.
- Семинский И.К., Буддо И.В., Мурзина Е.В., Сеяев В.А.** Возможности электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопроисловых задач на юге Сибирской платформы // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2019. № 3. С. 84–92.
- Сметанин А.В.** Предбайкало-Патомский надвиговой пояс // Геология нефти и газа. 2000. № 1. С. 14–20.
- Соколов Д. С.** Основные условия развития карста. М. : Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
- Старосельцев В.С., Лебедев В.М.** Связь интрузивного магматизма с тектоникой Тунгусской синеклизы // Тектоника нефтегазоносных областей Сибири. Новосибирск, 1975. С. 100–108.
- Тектоническая карта** нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. Масштаб 1 : 5 000 000. Новосибирск : СНИИГГиМС, 2005.
- Токарев Д.А., Плюснин А.В., Терлеев А.А., Иванова Н.А., Вараксина И.В., Липянина А.В.** Новые результаты комплексного литолого-фациального и биостратиграфического изучения осинского горизонта нижнего кембрия юга Сибирской платформы (Большегирская скв. 7) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2021. № 2. С. 11–20.
- Фролов Б.М., Ефимов М.И., Белозерова Н.Н., Иванова Л.К.** Основные черты тектоники осадочного чехла южной части Сибирской платформы // Сборник научных трудов ВНИГРИ. Л., 1976. № 36. 112 с.

Чамов Н.П. Вопросы связи литологии и тектоники при изучении осадочных бассейнов // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 4. С. 377–395.

Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазонасыщенности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). Новосибирск : СО РАН, 2007. 467 с.

Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations // Earth-Science Reviews. 2000. P. 1–81.

References

- Aleksandrov V.K. *Nadvigovye i shar'yazhnye struktury Pribajkal'ya* [Thrust and thrust structures of the Baikal region]. Novosibirsk. The science. 1990. 100 p. In Russian
- Belyaev S.Yu., Moiseev S.A., Titov D.Yu. *Tektonicheskoe razvitiye Nepsko-Botuobinskoj anteklizy v vende i kembrii* [Tectonic development of the Nepa-Botuoba antecline in the Vendian and Cambrian] // *Geodinamicheskaya evolyuciya litosfery Central'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. Materialy nauchnogo soveshchaniya po Programme fundamental'nyh issledovanij ONZ RAN [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent). Proceedings of the scientific meeting on the Program of Fundamental Research of the ONZ RAS]. Irkutsk: IZK SO RAN. 2009. No. 7. pp. 32–34. In Russian
- Bondarev V.I., Krylatkov S.M. *Osnovy obrabotki i interpretacii dannyh sejsmorazvedki* [Fundamentals of processing and interpretation of seismic data]. Yekaterinburg. 2001. 193 p. In Russian
- Vahromeev A.G. *Geodinamicheskaya model' formirovaniya anomal'no vysokih davlenij flyuidov v razreze osadochnogo chekhla Sibirskoj platformy* [Geodynamic model of the formation of anomalously high fluid pressures in the section of the sedimentary cover of the Siberian Platform] // *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnyh resursov Akademii nauk Respubliki Bashkortostan* [Geol. Proceedings of the Department of Earth Sciences and Natural Resources Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan]. Ufa. 2008. No.12. pp. 39–51. In Russian
- Vdovykin G.P., Bakaev Yu.G., Zor'kina V.A., Panov A.I., Ivanov A.G. *Trampovyj magmatizm drevnih platform v svyazi s neftegazonosnost'yu* [Trump magmatism of ancient platforms due to oil and gas potential] // *Obzor VNIIGiMS: Geol., metody poiskov i razvedki mestorozhdenij nefiti i gaza* [Review of VNIIGiMS: Geol., methods of prospecting and exploration of oil and gas fields]. Moscow. 1983. 39 p. In Russian
- Vozhov V.I., Kuz'min S.P., Bukaty M.B. *O vozmozhnosti lokalizacii uglevodorodnyh zalezhej pod intruzivnymi trappami* [On the possibility of localization of hydrocarbon deposits under intrusive traps] // *Geologiya i neftegazonosnost' Sibirskoj platformy* [Geology and oil and gas potential of the Siberian platform]. Novosibirsk: SNIIGiMS. 1981. pp. 87–94. In Russian
- Vozhov V.I., Chernova L.S. *Vtorichnoe mineraloobrazovanie v vend-nizhnkemabrijskih otlozheniyah Nepsko-Botuobinskoj anteklizy* [Secondary mineral formation in the Vendian-Lower Cambrian deposits of the Nepa-Botuoba antecline] // *Geologiya nefiti i gaza* [Geology of oil and gas]. 1999. V. 11. pp. 10–16.
- Gazhula S.V. *Osobennosti trappovogo magmatizma v svyazi s usloviyami neftegazonosnosti Sibirskoj platformy* [Peculiarities of trap magmatism in connection with the oil and gas potential of the Siberian platform] // *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. [Neftegazovaya geologiya. Theory and practice]. 2008. V. 3, No. 1. pp. 1–8. In Russian
- Gaiduk V.V., Prokopiiev A.V. *Methods for studying fold-thrust belts* [Metody izucheniya skladchato-nadvigovyh pojasov]. Novosibirsk. Nauka. 1999. 160 p. In Russian
- Geologiya nefiti i gaza Sibirskoj platformy* [Geology of Oil and Gas of the Siberian Platform] / Pod red. A.E. Kontorovicha, V.S. Surkova, A.A. Trofimuka. Moscow : Nedra. 1981. 552 p. In Russian
- Dublyanskiy Ju.V. *Hydrothermal karst as process of the ore conditioning*. Novosibirsk: Institut geologii i geofiziki AN SSSR. 1985. 18 p. In Russian
- Kosygin Yu.A. *Tektonika* [Tectonics]. Moscow : Nedra. 1969. 616 p. In Russian
- Kosygin Yu.A. *Solyanaya tektonika Sibirskoj platformy* [Salt tectonics of the Siberian platform]. Novosibirsk: Science. 1973. No. 63. 166 p. In Russian
- Lobanov M.P., Sizykh V.I., Sincov A.V., Tereshchenko A.N., Hrenov P.M. *Poyasnoe pokrovno-skladchatoe stroenie yuga Sibirskoj platformy v svyazi s problemoj mineragenii i neftegazonosnosti* [Belt folded cover structure of the south of the Siberian platform in connection with the problem of minerageny and oil and gas potential] // *Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoj Sibiri* [Geology and minerals of Eastern Siberia]. Irkutsk. 1991. pp. 14–15. In Russian
- Maximovich G.A. *The basics of karst science*. V. 1: Questions of karst morphology, speleology and hydrogeology of karst. Perm. 1963. 443 p. In Russian
- Melnikov N.V. *Vend-kembrijskij solerodnyj bassejn Sibirskoj platformy (Stratigrafiya, istoriya razvitiya)* [Vendian-Cambrian salt pool of the Siberian platform (Stratigraphy, history of development)]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2009, 148 p. in Russian
- Melnikov N.V., Vorob'ev V.P., Efimov A.O. *Vnedrenie intruzij doleritov* [The introduction of dolerite intrusions] // *Geologiya i neftegazonosnost' Leno-Tungusskoj provincii* [Geology and oil and gas potential of the Lena-Tunguskaya province]. Moscow : Nedra. 1977. pp. 103–108. In Russian
- Migurskij A.V. *Trappovyj magmatizm i nepskie dislokacii* [Trap magmatism and Nepa dislocations] // *Tektonika neftegazonosnyh otlozhenij Sibiri: Sbornik nauchnyh trudov* [Tectonics of oil and gas deposits in Siberia: Collection of scientific papers]. Novosibirsk. SNIIGiMS. 1983. pp. 97–103. In Russian
- Migurskij A.V. *Dinamicheskoe vozdejstvie trappovogo magmatizma na neftegazonosnost' Nepsko-Botuobinskoj anteklizy* [Dynamic impact of trap magmatism on the oil and gas potential of the Nepa-Botuoba antecline] // *Tektonicheskie kriterii prognoza neftegazonosnosti Sibirskoj platformy: Sbornik nauchnyh trudov* [Tectonic criteria for predicting the oil and gas potential of the Siberian Platform: Collection of scientific papers]. Novosibirsk: SNIIGiMS. 1986. 102 p. In Russian
- Migurskij A.V., Starosel'cev V.S. *Shar'yazhnoe stroenie zony sochleneniya Sibirskoj platformy s Bajkalo-Patomskom nagor'em* [Shar'yazhnoe structure of the junction zone of the Siberian platform with the Baikal-Patom highlands] // *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology]. 1989. No. 7. pp. 9–15. In Russian
- Migurskij A.V. *Masshtabnye lateral'nye peremeshcheniya porod i flyuidov na Sibirskoj platforme* [Large-scale lateral displacements of rocks and fluids on the Siberian platform] // *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri: Sbornik nauchnyh trudov* [Geology and mineral resources of Siberia: Collection of scientific papers]. Novosibirsk: SNIIGiMS. 2010. No. 1. pp. 53–57. In Russian

Plyusnin A.V., Gyokche M.I. *Sostav i stroenie nepskoi i tirskei svity Prilensko-Nepskoi strukturfatsial'noi zony Nepsko-Botuobinskei anteklizy po rezul'tatam izucheniya kernovogo materiala* [composition and structure of the Nepsky and Tirskei formation of the Prilensk-Nepsky structural-facies zone of the Nepa-Botuoba antecline by the results of core material studies] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*. 2020. No. 2. pp. 75–89.

Resheniya chetvertogo Mezhdovedstvennogo regional'nogo stratigraficheskogo soveshchaniya po utochneniyu i dopolneniyu stratigraficheskikh skhem venda i kembriya vnutrennih rajonov Sibirskoy platformy [Decisions of the Fourth Interdepartmental Regional Stratigraphic Meeting on Refinement and Supplementation of the Vendian and Cambrian Stratigraphic Schemes of the Inner Regions of the Siberian Platform]. Novosibirsk: SNIIGiMS. 1989. 64 p. In Russian

Seminskij I.K., Buddo I.V., Murzina E.V., Selyaev V.A. *Vozmozhnosti elektrorazvedki metodom zondirovaniya stanovleniem polya v blizhnej zone pri reshenii neftegazoposkovykh zadach na yuge Sibirskoy platformy* [Possibilities of electrical exploration by the method of sounding by the formation of the field in the near zone when solving oil and gas prospecting problems in the south of the Siberian Platform] // *Vestnik VGU [Vestnik VGU]*. Seriya: Geologiya. 2019. No. 3. pp. 84–92. In Russian

Sokolov D.S. *Osnovnye usloviya razvitiya karsta* [Basic conditions for the development of karst]. Moscow. Gosgeoltekhizdat. 1962. 322 p. In Russian

Starosel'cev V.S., Lebedev V.M. *Svyaz' intruzivnogo magmatizma s tektonikoj Tunguskoj sineklizy* [Connection of intrusive magmatism with the tectonics of the Tunguska syneclise] // *Tektonika neftegazonosnykh oblastej Sibiri [Tectonics of oil and gas bearing regions of Siberia]*. Novosibirsk. 1975. pp. 100–108. In Russian

Starosel'cev B.C. *Aktual'nye problemy tektoniki neftegazoperspektivnykh regionov* [Actual problems of tectonics of oil and gas promising regions]. Novosibirsk: Science. 2008. 212 p. In Russian

Tectonic map of the oil and gas provinces of the Siberian Platform. Scale 1 : 5 000 000. Novosibirsk. SNIIGiMS. 2005

Tokarev D.A., Plyusnin A.V., Terleev A.A., Ivanova N.A., Varaksina I.V., Lipyanina A.V. *Novye rezul'taty kompleksnogo litologo-fatsial'nogo i biostratigraficheskogo izucheniya osinskogo gorizonta nizhnego kembriya yuga Sibirskoy platformy (Bol'shetirskaya skv. 7)* [New results of complex lithological-facies and biostratigraphic study of the Osinsky horizon of the Lower Cambrian of the southern Siberian platform (well Bol'shetirskaya №. 7)] // *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri [Geology and mineral resources of Siberia]*, 2021. V. 2, pp. 11–20.

Frolov B.M., Efimov M.I., Belozerova N.N., Ivanova L.K. *Osnovnye cherty tektoniki osadochnogo chekhla yuzhnoj chasti Sibirskoy platformy* [The main features of the tectonics of the sedimentary cover of the southern part of the Siberian platform] // *Sbornik nauchnykh trudov VNIGRI [Collection of scientific works of VNIGRI]*. Leningrad. 1976. No. 36. 112 p. In Russian

Chamov N.P. *Voprosy svyazi litologii i tektoniki pri izuchenii osadochnykh bassejnov* [Issues of connection between lithology and tectonics in the study of sedimentary basins] // *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Minerals]*. 2008. No. 4. pp. 377–395. In Russian

Shemin G.G. *Geologiya i perspektivy neftegazonosnosti venda i nizhnego kembriya central'nykh rajonov Sibirskoy platformy (Nepsko-Botuobinskaya, Bajkitskaya anteklizy i Katangskaya sedlovina)* [Geology and oil and gas potential of the Vendian and Lower Cambrian in the central regions of the Siberian platform (Nepsko-Botuobinskaya, Baikit anteclines and Katanga saddle)]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2007, 467 p. in Russian

Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*. 2000. pp. 1–81.

Информация об авторах:

Плюснин А.В., канд. геол.-минерал. наук, седиментолог, ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия; старший научный сотрудник лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия.

E-mail: a.v.plyusnin@mail.ru

Гёкче М.И., геолог, ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия.

E-mail: gyokche_mi@irkutskoil.ru

Шаваров Р.Д., геолог, ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия.

E-mail: shavarov_rd@irkutskoil.ru

Никулин Е.В., заместитель директора департамента проектирования разработки месторождений, ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия.

E-mail: nikulin_ev@irkutskoil.ru

Вклад авторов: совокупный вклад А.В. Плюснина и М.И. Гёкче – 40 %, остальные соавторы – по 10 %.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Plyusnin A.V., Cand.Sci. (Geol.-Miner.), sedimentologist, Irkutsk Oil Company LLC, Irkutsk, Russia; Senior Researcher, Laboratory of Sedimentology and Paleobiosphere Evolution, Tyumen, Russia.

E-mail: a.v.plyusnin@mail.ru

Gokche M.Ig., geologist, Irkutsk Oil Company LLC, Irkutsk, Russia.

E-mail: gyokche_mi@irkutskoil.ru

Shavarov R.D., geologist, Irkutsk Oil Company LLC, Irkutsk, Russia.

E-mail: shavarov_rd@irkutskoil.ru

Nikulin E.V., Deputy Director of the Department, Field Development Design Department, Irkutsk Oil Company LLC, Irkutsk, Russia.

E-mail: nikulin_ev@irkutskoil.ru

Contribution of the authors: cumulative contribution of A.V. Plyusnin and M.I. Gokce are 40 %, the other co-authors 10 % each.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.02.2022; одобрена после рецензирования 29.09.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 09.02.2022; approved after reviewing 29.09.2022; accepted for publication 13.03.2023

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ, СТРАТИГРАФИЯ

Научная статья

УДК 562.551.763.3 (571.1)

doi: 10.17223/25421379/26/3

ПОЗДНЕТУРОНСКАЯ ЗОНА ФОРАМИНИФЕР – ПОГРАНИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ СРЕДНЕГО МЕЛА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Вера Михайловна Подобина¹



¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, podobina@ggf.tsu.ru

Аннотация. Приведены новые сведения по систематическому составу и распространению в пределах северного палеобиогеографического района Западно-Сибирской провинции позднетуронского комплекса фораминифер с *Pseudoclavulina hastata*. Одноименная зона выделяется в верхней части кузнецовского горизонта и является пограничной для среднего отдела меловой системы. Комплекс фораминифер этой зоны Западно-Сибирской провинции сопоставлен с подобным комплексом Канадской провинции, охарактеризованным позднетуронскими моллюсками.

Ключевые слова: фораминиферы, зона, верхний турон, кузнецовский горизонт, Западная Сибирь

Для цитирования: Подобина В.М. Позднетуронская зона фораминифер – пограничные отложения среднего мела Западной Сибири // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 36–50. doi: 10.17223/25421379/26/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/26/3

UPPER TURONIAN FORAMINIFERAL ZONE - BOUNDARY DEPOSITS OF WEST SIBERIAN MIDDLE CRETACEOUS

Vera M. Podobina¹

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, podobina@ggf.tsu.ru

Abstract. Turonian Foraminifera have been established in Kusnetzovskian Horizon of West Siberian province as two assemblages: *Gaudryinopsis angustus* (lower) and *Pseudoclavulina hastata* (upper). Layers with these assemblages have been distinguished in two of the same name zones. The *Pseudoclavulina hastata* zone is the boundary between Turonian and Coniacian stages offering to Middle Order of Cretaceous system. The Turonian foraminifera of two assemblages consist of agglutinated quartz-siliceous shells of the similar systematic composition. Several characteristic species as *Ammoscalaria antis* Podobina, *Trochammina arguta* Podobina and others belong to upper turonian substage. The *Pseudoclavulina hastata* zone have spread almost on the all territory of the West Siberian province. The new data about this zone have been known in the northern paleobiogeographical district – Van-Eganskaya, South-Russkaya and Vyangapurovskaya areas. More various composition species have been known from section well 700 Vyangapurovskaya area, where upper Turonian foraminifera have been established in rocks from deeps 966,81 and 966,07 m. Summery assemblage from these deeps consist of 20 species: *Psammosphaera laevigata* White; *Saccamina complanata* (Franke); *Thurammina papillata* Brady; *Reophax inordinatus* Young; *Labrospira fraseri* (Wickenden) stata Podobina; *L. collyra* (Nauss); *Haplophragmoides rota* Nauss sibiricus Zaspelova; *H. crickmayi* Stelck et Wall; *Recurvoidella sewellensis* (Olsson) parvus (Belousova); *Ammobaculites agglutinoides* Dain; *Ammoscalaria antis* Podobina; *Trochammina arguta* Podobina; *T. wetteri* Stelck et Wall; *T. subbotinae* Zaspelova; *Miliammina manitobensis* Wickenden; *Pseudobolivina contorta* Bulatova; *Gaudryinopsis angustus* Podobina; *Asarotamina antis* Podobina; *Pseudoclavulina hastata* (Cushman); *Cibicides westsibiricus* Balakhmatova. Paleont. tab. I–VI. This assemblage consisting of different systematic composition have habited in more deep water basin, above Coltogorsky-Urengoi sky megathrough in regenerative living conditions. Due to similar assemblages of West Siberian and Canadian provinces the age of Kusnetzovskian horizon have been confirmed as Turonian. These provinces with similar foraminiferal systematic composition have been offered to one Arctic paleobiogeographical realm.

Keywords: Foraminifera, zone, Upper Turonian, Kuznetsovsky horizon, Western Siberia

For citation: Podobina V.M. (2023) Upper Turonian foraminiferal zone - boundary deposits of West Siberian Middle Cretaceous. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 36–50. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/3

Введение

Позднетуронские фораминиферы распространены в верхних слоях кузнецовского горизонта Западно-Сибирской провинции. Слои, их включающие, выделены автором в зону *Pseudoclavulina hastata* [Подобина, 1966, 1975, 1989, 2000, 2009, 2018]. Комплекс фораминифер этой зоны по систематическому составу значительно отличается от раннетуронского с *Gaudryinopsis angustus*, распространенного в нижних слоях кузнецовского горизонта, известных как одноименная зона. Позднетуронский комплекс в разных палеобиогеографических районах несколько отличается по облику и систематическому составу. В окраинных районах раковины иногда более грубозернисты, светлее по цвету и в систематическом составе менее разнообразны. В этих районах присутствуют, кроме агглютинированных, секреторно-известковые раковины некоторых характерных видов. В центральном районе [Подобина, 1995; Подобина, 2021] раковины в основном агглютинированные, кварцево-кремнистые, мелкозернистые, серого цвета, пиритизированные.

Новые сведения по фораминиферам, полученные из керна разрезов скважин северного палеобиогеографического района (Ван-Еганская, Южно-Русская, Вынгапуровская площади) дали возможность исследовать позднетуронский комплекс, несколько отличающийся по составу от ранее изученных. Особенно следует отметить разрез скв. 700 Вынгапуровской площади, где в данном комплексе присутствуют агглютинированные, мелкозернистые, серого цвета раковины разнообразного систематического состава (20 видов).

По серому цвету, облику, их видовому составу можно судить, что эти фораминиферы обитали в восстановительной обстановке углубленного бассейна по сравнению с таковым других районов Западно-Сибирской провинции. Фораминиферы позднего турона этой провинции наиболее сходны по систематическому составу с одновозрастным туронским Канадской провинции (Северная Аляска, Канада), обитавших, по-видимому, в бассейнах этих провинций Арктической палеобиогеографической области.

Фораминиферы зоны *Pseudoclavulina hastata* по систематическому составу отличаются от вышележащих из отложений коньяка. В северном районе вышеуказанной зоны фораминиферы этого возраста отсутствуют в отличающихся по литологии опоках седельниковского горизонта.

В целом позднетуронские отложения зоны *Pseudoclavulina hastata* представляют верхнюю границу среднего отдела меловой системы.

Краткие сведения и методы исследования

Туронский ярус в 1960-х гг. установлен в кузнецовском горизонте Западной Сибири. Впервые исследования биостратиграфии этого яруса, основанные на палеонтологических данных, известны по работам ВСЕГЕИ [Глазунова и др., 1960]. Почти одновременно туронскую биостратиграфию и микрофауну, в частности фораминиферы, изучала сотрудница Новосибирского геологического управления З.И. Булатова [Булатова и др., 1957]. С 1961 г. В.М. Подобина продолжает изучение биостратиграфии и фораминифер туронского яруса этого региона [Подобина, 1961, 1966, 1975, 1989, 2000, 2009, 2018]. Известная сводка по биостратиграфии и фораминиферам, в том числе по туронским, опубликована под руководством Н.Н. Субботиной [Фораминиферы..., 1964]. Во всех указанных сводках, кроме работ В.М. Подобиной, в кузнецовском горизонте был установлен один комплекс фораминифер с *Gaudryina filiformis*. В.М. Подобиной в этом горизонте выделены два комплекса фораминифер: *Gaudryinopsis angustus* (нижний) и *Pseudoclavulina hastata* (верхний), относимых, соответственно, к нижнему и верхнему турону. Одним из доказательств предполагаемого возраста первого комплекса являются находки раннетуронского *Inoceramus labiatus* Schothheim (определение М.Д. Поплавский, скв. 3-р Тазовская площадь). Со вторым комплексом (*Pseudoclavulina hastata*) в разрезе Уватской скв. 1-р В.И. Бодылевским определен позднетуронский *Baculites romanowski* Archangelski. Эти сведения и многие другие данные, а также находки характерных моллюсков учтены при датировании возраста туронских комплексов фораминифер, обнаруженных в кузнецовском горизонте.

В последнее время по данным изучения моллюсков предполагается датировать зону *Pseudoclavulina hastata* средним и поздним туроном [Маринов и др., 2019].

В северном палеобиогеографическом районе Западно-Сибирской провинции автором впервые установлены морские фации среднего мела (апт, альб, сеноман, турон) [Подобина, 2018]. Туронские морские фации, входящие в состав среднего мела, распространены в пределах почти всей территории данной провинции. Эти фации вмещают в основном кварцево-кремнистые фораминиферы различной степени сохранности, а в окраинных районах к ним прибавляются секреторно-известковые формы. Совместно с ними автором выделены локально распространенные комплексы на востоке, такие как *Gaudryinopsis angustus*, *Neobulimina albertensis* (нижний турон) и *Pseudoclavulina hastata*, *Cibicides westsibiricus* (верхний турон). В последние годы в

северном районе автором исследованы туронские комплексы фораминифер в разрезах скважин Ван-Еганской, Парусовой, Южно-Русской, Вынгапуровской и в ряде скважин площадей п-ва Ямал.

Необходимо отметить, что более полно представлены раннетуронские комплексы фораминифер, так как нижняя часть кузнецовской свиты в большинстве разрезов опробована образцами на микропалеонтологический анализ. Позднетуронские комплексы фораминифер изучены в северном районе ограниченно, в основном в разрезах скважин Ван-Еганской, Южно-Русской и Вынгапуровской площадей.

Ранее установленные автором туронские комплексы фораминифер в пределах почти всей территории Западно-Сибирской провинции прослежены, как указано, и в северном районе. Однако количество образцов, отобранных из кузнецовского горизонта в этом районе – всего более 70. В разрезах скважин указанных выше площадей установлены в основном отложения нижнего турона с известным комплексом фораминифер – *Gaudryinopsis angustus*. Верхнетуронские отложения с комплексом *Pseudoclavulina hastata* в исследуемом северном районе изучены по небольшому количеству образцов, отобранных из разрезов скважин указанных трех площадей. В целом систематический состав позднетуронского комплекса северного района менее разнообразен, кроме разреза скв. 700 Вынгапуровской площади, по сравнению с таковым из разрезов центрального и других районов Западно-Сибирской провинции.

Отечественная систематика ископаемых фораминифер основывается на 4 основных критериях, впервые разработанных А.В. Фурсенко [1978]: морфологическом, онтофилогенетическом, геохронологическом, географическом. Кроме того, добавлен пятый палеобиогеографический критерий [Подобина, 1998].

Для построения по фораминиферам зональной биостратиграфической схемы верхнего турона (как ранее для верхнего мела; Подобина, 2009) использованы пять основных методов: 1) анализ комплексов фораминифер; 2) создание филогенетических схем; 3) палеобиогеографические исследования; 4) установление ритмостратонов; 5) перерывы в осадконакоплении.

Первый метод – анализ комплексов фораминифер – является одним из ведущих, на котором основано установление биостратиграфических, в том числе зональных подразделений [Подобина, 1966, 1975, 1989, 2000].

Вторым методом для построения зональной схемы, в том числе верхнего турона, является создание филогенетических схем по наиболее распространен-

ным в Западной Сибири семействам фораминифер: *Nauphragmoididae*, *Textulariidae*, *Ataxophragmiidae* [Подобина, 1978].

Третий метод – палеобиогеографические исследования [Podobina, 1995; Подобина, 2000, 2021].

В бассейнах Арктической области бентосные фораминиферы образуют две группы: западносибирскую и канадскую, рассматриваемые в пределах одноименных двух провинций. К последней относятся комплексы фораминифер Северной Аляски и Канады. Сходство фораминиферовых сообществ указанных провинций на родовом и видовом уровнях и преобладание среди них агглютированных раковин дают основание предполагать, что эта фауна существовала также в центральном районе Арктического бассейна и затем распространилась в более низкие широты. Для относительно мелководных эпиконтинентальных бассейнов Западно-Сибирской провинции характерно широкое распространение агглютированных кварцево-кремнистых фораминифер, что обусловлено беспрепятственной их миграцией из Арктического бассейна.

Западносибирские позднетуронские комплексы фораминифер включают значительное количество эндемичных видов. Их число не превышает половины общего видового состава. В отложениях этого возраста выделены как общие западносибирские и канадские виды, так и многие западносибирские подвиды ранее известных канадских видов фораминифер или их विकарианты (заменители).

Четвертым методом является установление ритмостратонов. В северном районе Западно-Сибирской провинции на протяжении среднего мела, в том числе и в позднем туроне, развивались преимущественно бентосные фораминиферы. Они чутко реагировали на малейшие изменения физико-географических и биономических условий среды обитания и поэтому являются ценными показателями этих изменений. Изучение ритмичности в распределении фораминифер по разрезу среднего мела, в том числе турона, с выделением ритмостратонов основано на количественном и качественном распространении фораминифер и особенностях трансгрессивно-регрессивных циклов бассейна, взаимосвязанных с тектоническим режимом данной территории (колымская фаза киммерийской эпохи тектогенеза). Осадконакопление позднетуронского бассейна на фоне трансгрессивно-регрессивных ритмов (циклов) выразилось в чередовании немного отличающихся по литологическим особенностям пород (в основном серых глин и алевролитов), а также в количественном и качественном содержании отдельных таксонов фораминифер, их распространении в пределах Западно-Сибирской провинции. Это дало возможность более детально

стратифицировать разрез турона, выделяя местные биостратиграфические (фораминиферовые) зоны [Подобина, 1989, 2018].

Пятым является метод перерывов в осадконакоплении [Наливкин, 1974; Подобина и др., 2006]. Слои с позднетуронскими фораминиферами известны как зона с *Pseudoclavulina hastata*. В северном районе позднетуронская зона также выделяется в верхах кузнецовского горизонта и здесь выше отсутствуют самые нижние слои коньякского яруса. Эти слои известны в верхах кузнецовского горизонта на юго-западе (южный район) и в западном районе в понижениях рельефа (Омская впадина, Зауралье и др.). Позднетуронская зона фораминифер в северном и других районах является пограничной, а выше отмечается перерыв в осадконакоплении, соответствующий нижним слоям коньякского яруса. Этот перерыв между туронским и коньякским ярусами, по-видимому, прослеживается в пределах большей части территории Западно-Сибирской провинции.

Результаты исследований

Туронский ярус – K_{2t} Кузнецовский горизонт

В пределах Ван-Еганской площади изучены образцы керн из двух разрезов скважин: 1002 и 2031, в которых обнаружены фораминиферы двух туронских комплексов: *Gaudryinopsis angustus* (нижний турон) и *Pseudoclavulina hastata* (верхний турон). Вмещающие породы – темно-серые аргиллиты с прослоями серых алевролитов кузнецовского горизонта. В разрезах скважин Парусовой 1016, Малыгинской 50 (п-в Ямал) и Западно-Тамбейской 124 (п-в Ямал) исследованы фораминиферы только раннетуронского комплекса с *Gaudryinopsis angustus*, так как вскрыты нижние слои горизонта.

Позднетуронские фораминиферы обнаружены в разрезах скв. Ван-Еганской, Южно-Русской и Вынгапуровской площадей. В разрезе Вынгапуровской скв. 700 установлен наиболее разнообразный позднетуронский комплекс фораминифер по сравнению с таковым в площадях северного и других районах Западной Сибири.

Фораминиферы из пород разрезов скважин рассматриваемых площадей – в основном агглютинированные, кварцево-кремнистые с мелко- и среднезернистой стенкой, хорошей сохранности раковины [Подобина, 2012, 2018; Подобина, Татьяна, 2021].

Верхний подъярус – K_{2t2}

В пяти образцах разреза скв. 1002 (Ван-Еганская площадь), отобранных из интервала 942,15–934,4 м, обнаружены фораминиферы позднетуронского ком-

плекса с *Pseudoclavulina hastata*. Фораминиферы обладают агглютинированной, кварцево-кремнистой, мелко- и среднезернистой стенкой, хорошей сохранности. Вмещающие породы – темно-серые глины и аргиллиты с тонкими прослоями серых алевролитов верхних слоев кузнецовского горизонта. В составе сводного комплекса, составленного из фораминифер пяти образцов указанного интервала, определены виды: *Psammospaera laevigata* White, *Ammodiscus cretaceous* (Reuss), *Lituotuba confusa* (Zaspelova), *Labrospira fraseri* (Wickenden) stata Podobina, *L. collyra* (Nauss), *Haplophragmoides rota* Nauss sibiricus Zaspelova, *H. crickmayi* Stelck et Wall, *Ammoscalaria antis* Podobina, *Trochammina wetteri* Stelck et Wall, *T. arguta* Podobina, *Gaudryinopsis angustus* Podobina, *Pseudoclavulina hastata* (Cushman).

В одном из образцов с глубины 937,1 м обнаружен экземпляр вида *Cibicides westsibiricus* (Balakhmatova), ранее известного в позднетуронском комплексе восточного района Западной Сибири.

Из семи образцов керн разреза скв. 2031 (Ван-Еганская площадь), отобранных из интервала 935,3–929,0 м, выделены многочисленные фораминиферы позднетуронского комплекса с *Pseudoclavulina hastata*. Стенка раковин агглютинированная, кварцево-кремнистая, мелко- и среднезернистая, хорошей сохранности.

Вмещающие породы – темно-серые аргиллиты с прослоями серого алевролита. В составе комплекса определены: *Rhizammina indivisa* Brady, *Psammospaera fusca* (Schultze), *P. laevigata* White, *Hyperammina aptica* (Dampel et Mjatluk), *Reophax inordinatus* Young, *Labrospira collyra* (Nauss), *Haplophragmoides rota* Nauss sibiricus Zaspelova, *H. crickmayi* Stelck et Wall, *Ammoscalaria antis* Podobina, *Trochammina arguta* Podobina, *T. wetteri* Stelck et Wall, *Pseudoclavulina hastata* (Cushman). В комплексе появились виды фораминифер, характерные для верхнего турона: *Ammoscalaria antus* Podobina, *Trochammina arguta* Podobina, увеличилось в комплексе количество экземпляров зонального вида-индекса *Pseudoclavulina hastata* (Cushman). В количественном отношении преобладают виды семейств Haplophragmiidae и Ataxophragmiidae, что указывает на относительно глубоководные и благоприятные для фораминифер условия существования в холодноводном с восстановительной обстановкой бассейне.

В одном образце из разреза скв. 62 Южно-Русской площади с гл. 887,32 м, отобранном из верхних слоев кузнецовской свиты, обнаружены фораминиферы хорошей сохранности, спикулы губок и пиритизированные шары. Комплекс фораминифер с *Pseudoclavulina hastata* представлен видами: *Psammospaera laevigata* White, *Labrospira collyra* (Nauss), *L. fraseri* (Wickenden)

stata Podobina, *Haplophragmoides rota* Nauss *sibiricus* Zaspelova, *H. crickmayi* Stelck et Wall, *H. sp. indet.*, *Ammoscalaria antis* Podobina, *Trochammina wetteri* Stelck et Wall, *T. arguta* Podobina, *T. subbotinae* Zaspelova, *Gaudry-inopsis angustus* Podobina, *Pseudoclavulina hastata* (Cushman).

Раковины фораминифер агглютинированные кварцево-кремнистые хорошей сохранности. Преобладают в комплексе представители родов *Labrospira*, *Haplophragmoides* и *Pseudoclavulina*. Из них, кроме зонального вида, характерны для верхнего турона Западной Сибири виды *Ammoscalaria antis* Podobina и *Trochammina arguta* Podobina. Подобный комплекс фораминифер характерен для верхнего турона (верхние слои кузнецовской свиты).

В пределах Вынгапуровской площади, в разрезе скв. 700 установлен разнообразный комплекс фораминифер в интервале пород 970,0–958,2 м в двух образцах (гл. 966,81 и 966,07 м). Сводный комплекс фораминифер из двух указанных глубин состоит из следующих 20 видов: *Psammospaera laevigata* White (x); *Saccamina complanata* (Franke) (·); *Thurammina papillata* Brady (·); *Reophax inordinatus* Young (·); *Labrospira fraseri* (Wickenden) *stata* Podobina (x); *L. collyra* (Nauss) (x); *Haplophragmoides rota* Nauss *sibiricus* Zaspelova (x); *H. crickmayi* Stelck et Wall (o); *Recurvoidella sewellensis* (Olsson) *parvus* (Belousova) (·); *Ammobaculites agglutinoides* Dain (·); *Ammoscalaria antis* Podobina (x); *Trochammina arguta* Podobina (x); *T. wetteri* Stelck et Wall (o); *T. subbotinae* Zaspelova (·); *Miliammina manitobensis* Wickenden (·); *Pseudobolivina contorta* Bulatova (x); *Gaudryinopsis angustus* Podobina (x); *Asarotammina antis* Podobina (x); *Pseudoclavulina hastata* (Cushman) (o); *Cibicides westsibiricus* Balakhmatova (·) (палеонт. табл. I–VI).

Кроме последнего вида (секреционно-известковая раковина) все 19 видов состоят из агглютинированных мелко- и среднезернистых кварцево-кремнистых пиритизированных раковин. (Условные обозначения: (·) – кол-во экземпляров от 1 до 5; (x) – от 5 до 15; (o) – от 15 и более.)

Как видно, обнаруженный в разрезе скв. 700 поздне-туронский комплекс – наиболее разнообразного видового состава. Находки подобных серых пиритизированных раковин указывают на восстановительные условия обитания в довольно глубоководном бассейне. Можно представить, что здесь было углубление дна бассейна, соответствующее расположению над Колтогорско-Уренгойским мегапрогибом.

Корреляция туронских фораминиферовых зон Западно-Сибирской и других провинций

По опубликованным работам и имеющимся коллекционным материалам автором изучены новые и

обобщены ранее известные сведения по фораминиферам турона Западно-Сибирской провинции. В процессе исследования фораминифер выявлено их значительное сходство с одновозрастными таксонами Канадской провинции.

Ранее проведенные палеобиогеографические исследования позволили определить положение Западно-Сибирской совместно с Канадской провинциями в пределах Арктической области и уточнить стратиграфическое положение исследуемых стратонтов, в частности, кузнецовского горизонта. Автором проведены сопоставления туронских комплексов с одновозрастными таксонами в пределах Северной Аляски [Таррап, 1962], также относимой к Канадской провинции. Этой провинции соответствует Канада (Альберта) [Stelck, Wall, 1954; Wall, 1967], где также наблюдается сходство систематического состава туронских фораминифер с североаляскинскими и западносибирскими. Среди сравниваемых туронских комплексов намечается сходство таксонов на родовом и видовом уровне. Все сведения по региональным и местным стратиграфическим подразделениям с корреляцией микрофаунистических (фораминиферовых) зон показаны в табл. 1.

Следует отметить, что преобладание кварцево-кремнистых агглютинированных фораминифер в пределах Западно-Сибирской провинции объясняется, кроме непосредственного влияния Арктического бассейна, еще и другими причинами. Одной из таких причин, по-видимому, является поступление из нижерасположенного глубинного разлома высококремнистых вод, повлиявших на повышенное содержание кремнистого материала в бассейне и образование преимущественно кварцево-кремнистых раковин. Можно также отметить, что широко распространенные агглютинированные фораминиферы в местах обнаружения промышленных залежей нефти и газа указывают не только на выход глубинных высококремнистых вод, но и на поднятия по этому разлому в определенные времена углеводородов, которые распределились в соответствующих породах-коллекторах под регионально распространенными глинистыми крышками. Одной из таких крышек являются рассматриваемые отложения турона и в частности его верхнего подъяруса.

В окраинных районах Западно-Сибирской провинции (восточный и другие районы) кроме агглютинированных кварцево-кремнистых обнаружены характерные для Восточно-Европейской провинции туронские секреционно-известковые раковины. Подобные находки позволили провести их предполагаемое сопоставление с одновозрастными таксонами ряда провинций Бореально-Атлантической области [Podobina, 1995; Подобина, 2021] (табл. 2).

Таблица 1

Схема корреляции микрофаунистических зон Западно-Сибирской и Канадской провинций Арктической палеобиогеографической области

Table 1

Correlation scheme of microfaunistic zones of West Siberian and Canadian provinces of the Arctic paleobiogeographical realm

Ярус	Подъярус	Горизонт	Западно-Сибирская провинция	Канадская провинция					
			[Подобина, 2018]	Северная Аляска	Канада				
			Северные районы [Tappan, 1962]	Peace River, Alberta [Stelck and Wall, 1954]		Central Alberta [Wall, 1967]			
Турон	Верхний	Кузнецовский	Микрофаунистические зоны	Формация и пачки	Микрофаунистические зоны	Формация	Микрофаунистические зоны	Формация и пачки	Микрофаунистические зоны
			Pseudoclavulina hastata	Seabee (Сибирь) Аууак member	Pseudoclavulina hastata, Arenobulimina (?) torula	Каскапу (Каскапо)	Не выделена	Opabin mem. Haven mem.	Pseudoclavulina sp. (P. hastata)
			Gaudryinopsis angustus	Lower member	Не выделена	Каскапу (Каскапо)	Pelagic Haplophragmoides spiritensis	Blackstone (Блекстоун) Vimy mem.	Lower Pelagic

Таблица 2

Схема предполагаемой корреляции туронских фораминиферовых зон Западно-Сибирской с двумя провинциями – Восточно-Европейской и Казахстанской из Бореально-Атлантической палеобиогеографической области

Table 2

Scheme of the supposed correlation of the Turonian foraminiferal zones of the West Siberian with two provinces – East European and Kazakhstania belong to Boreal-Atlantic paleobiogeographical realm

Ярус	Подъярус	Западно-Сибирская провинция [Подобина, 2018]	Восточно-Европейская провинция	Казахстанская провинция
			[Практическое руководство, 1991]	
ТУРОН	Верхний	Pseudoclavulina hastata	Gavelinella ammonoides	Gavelinella praeinfrasantonica
			Gavelinella moniliformis	Gavelinella moniliformis
Нижний	Gaudryinopsis angustus	Gavelinella nana	Globorotalites hangensis	Hedbergella holzli

Из указанных опубликованных работ автора по палеобиогеографическому районированию следует, что более надежным и продуктивным является сравнение комплексов фораминифер провинций из одной области. Такими сходными в отношении туронских таксонов являются Западно-Сибирская и Канадская провинции Арктической области (см.

табл. 1). Сравнение разных по систематическому составу туронских комплексов фораминифер Западно-Сибирской с двумя провинциями – Восточно-Европейской и Казахстанской из Бореально-Атлантической области не дает надежной датировки возраста вмещающих отложений кузнецовской свиты (горизонта (см. табл. 2).

Рисунки фораминифер с природы выполнены художницей О.М. Лозовой. Экземпляры хранятся в лаборатории микропалеонтологии Сибирского палеонтологического научного центра (СПНЦ) ТГУ.

Все экземпляры фораминифер отобраны из керна разреза скв. 700 Вынгапуровской площади Западной Сибири; кузнецовский горизонт, туронский ярус, верхний подъярус.

Условные обозначения:

a – вид с боковых сторон или со спинной стороны; *б* – вид с брюшной стороны; *в* – вид со стороны устья.

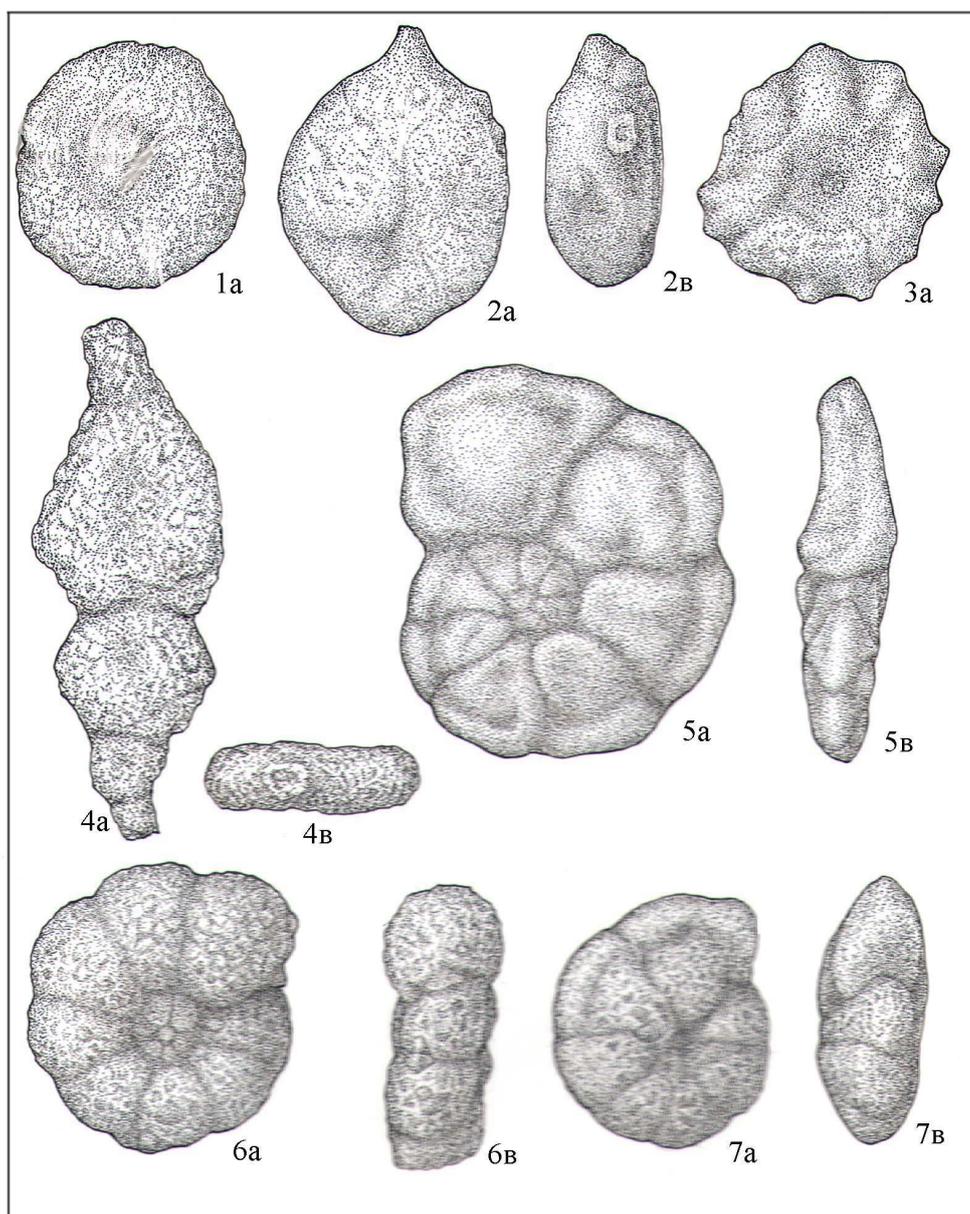
Drawings of foraminifera from nature were made by the artist O.M. Lozovaya. The specimens are kept in the laboratory of micropaleontology of the Siberian Paleontological Research Center (SPRC) of TSU.

All foraminifera specimens were sampled from the core of the section of borehole no. 700 Vyngapurovskaya area of Western Siberia; Kuznetsovsky horizon, Turonian stage, upper substage.

a – view from the sides or from the dorsal side; *b* – view from the ventral side; *v* – view from the aperture

ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА I

PALEONTOLOGICAL TABLE I



Фиг. 1. *Psammospaera laevigata* White. Экземпляр № 3400; скв. 700, гл. 966,81 м; ×60

Фиг. 2. *Saccamina complanata* (Franke). Экземпляр № 3401; скв. 700, гл. 966,07 м; ×60

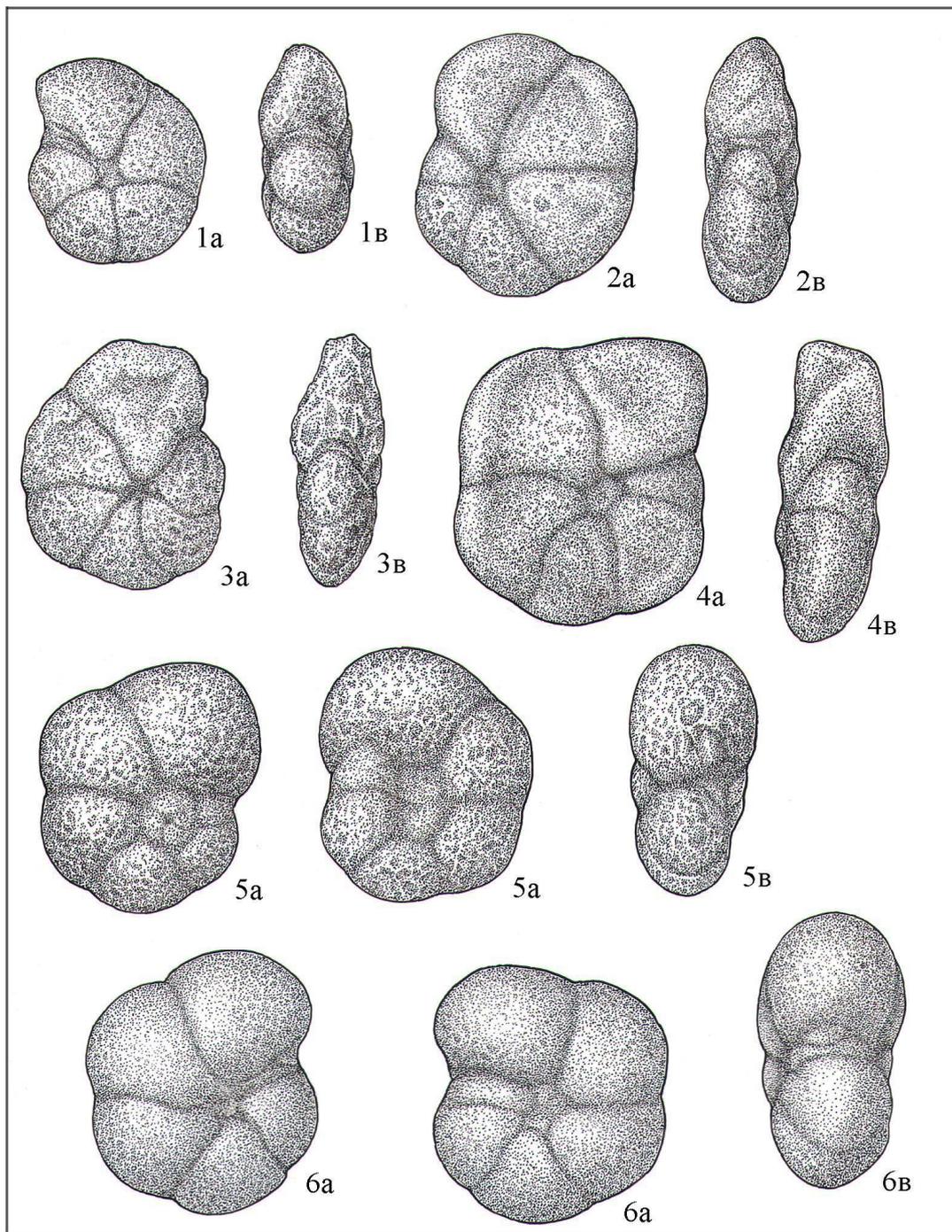
Фиг. 3. *Thurammmina papillata* Brady. Экземпляр № 3402; скв. 700, гл. 966,81 м; ×60

Фиг. 4. *Reophax inordinatus* Young. Экземпляр № 3403; скв. 700, гл. 966,81 м; ×60

Фиг. 5. *Labrospira fraseri* (Wick.) *stata* Pod. Экземпляр № 3404; скв. 700, гл. 996,07 м; ×60

Фиг. 6. *Labrospira collyra* (Nauss). Экземпляр № 3405; скв. 700, гл. 966,07 м; ×60

Фиг. 7. *Naplopragmoides rota* Nauss *sibiricus* Zaspelova. Экземпляр № 3406; скв. 700, гл. 366,07 м; ×60

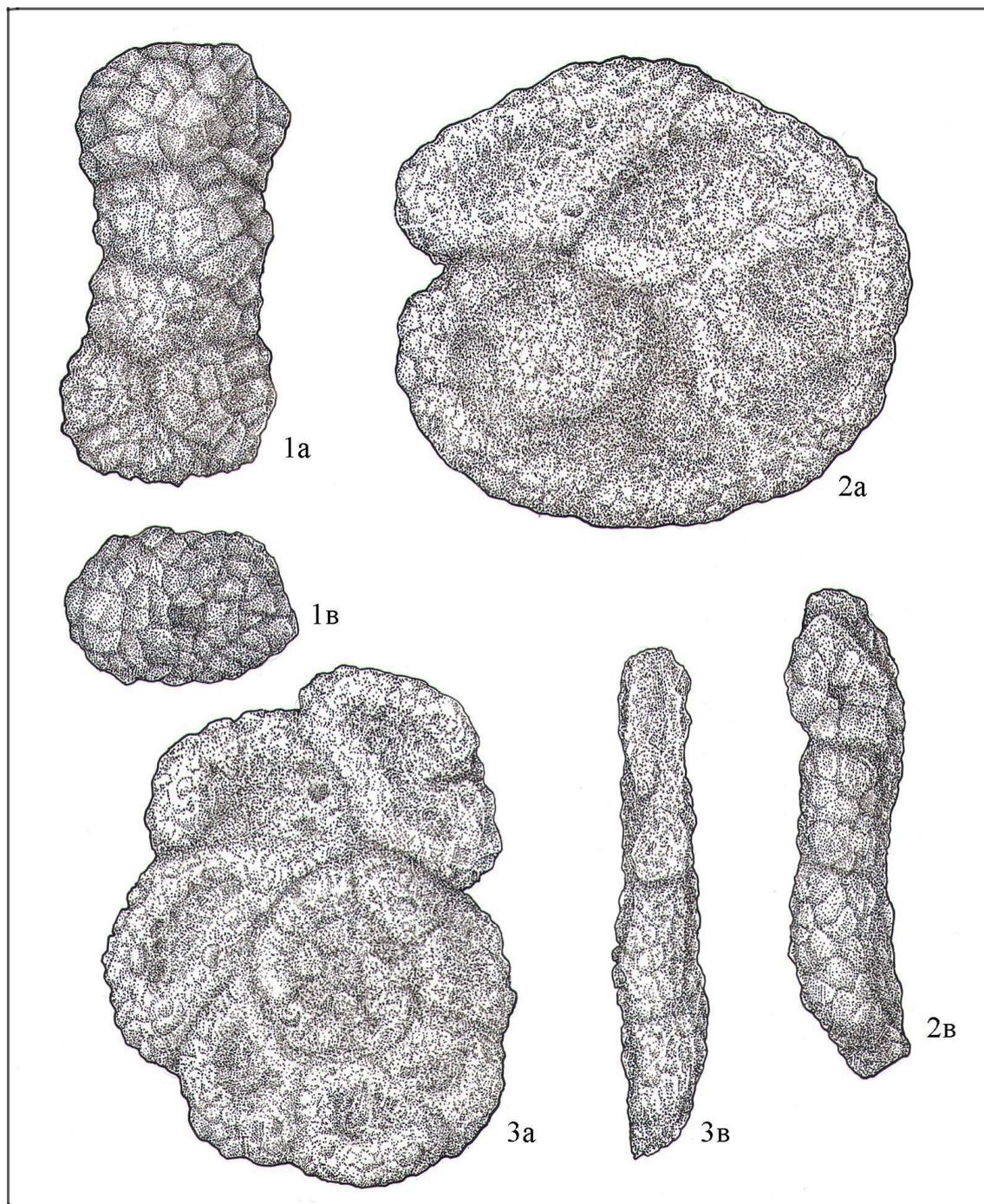


Фиг. 1–4. *Haplophragmoides crickmayi* Stelck et Wall

Экземпляр № 3407; скв. 700, гл. 966,07 м; экземпляр № 3408, гл. 966,81 м; экземпляр № 3409, гл. 966,07 м; экземпляр № 3410, гл. 966,07 м; ×60

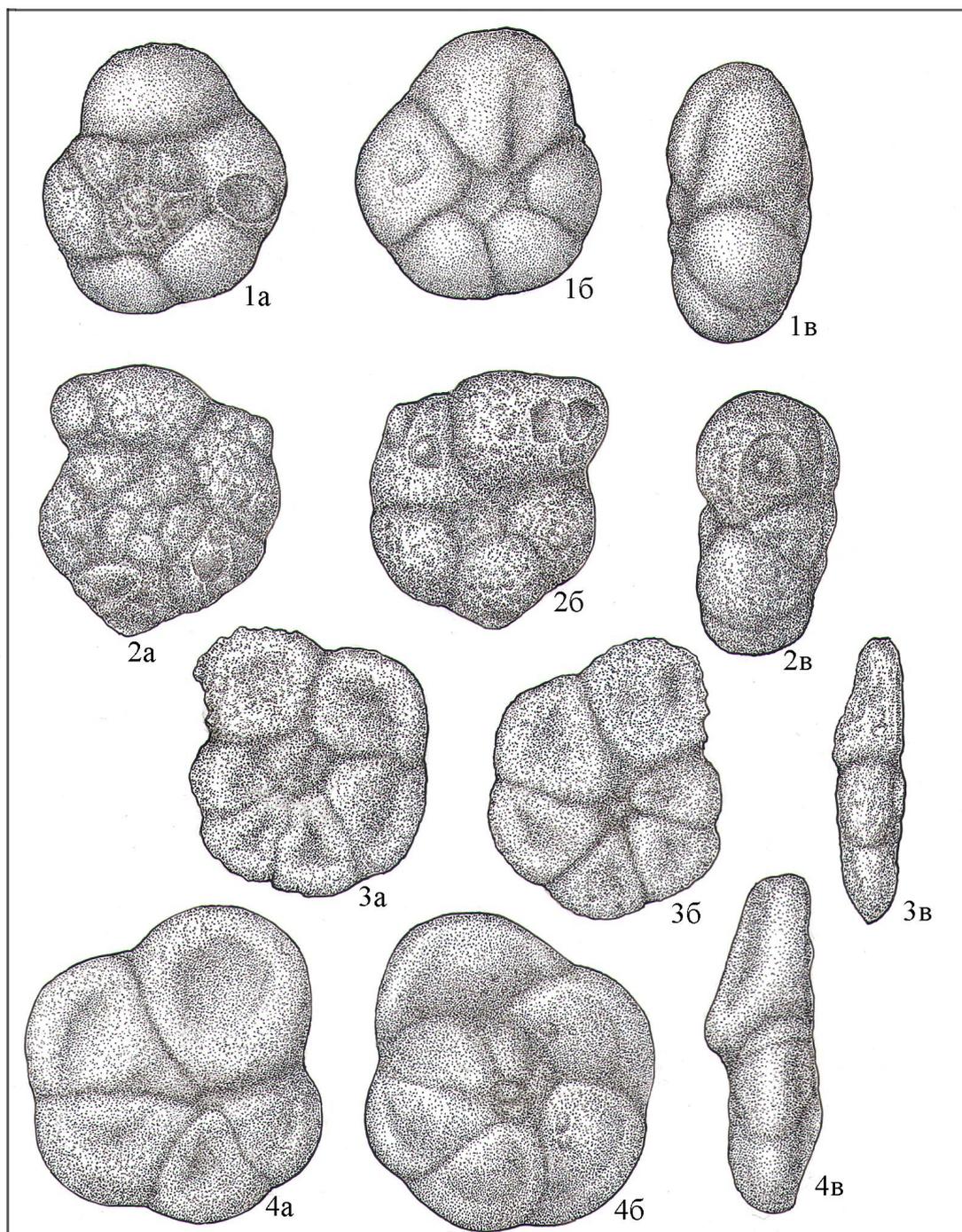
Фиг. 5, 6. *Recurvoidella sewellensis* (Olsson) *parvus* (Belousova)

Экземпляр № 3411, экземпляр № 3412; скв. 700, гл. 966,81 м; ×60



Фиг. 1. *Ammobaculites agglutinoides* Dain
Экземпляр № 3413; скв. 700, гл. 966,81 м; ×80

Фиг. 2, 3. *Ammoscalaria antis* Podobina
Экземпляр № 3414; экземпляр № 3415; скв. 700, гл. 966,07 м; ×80

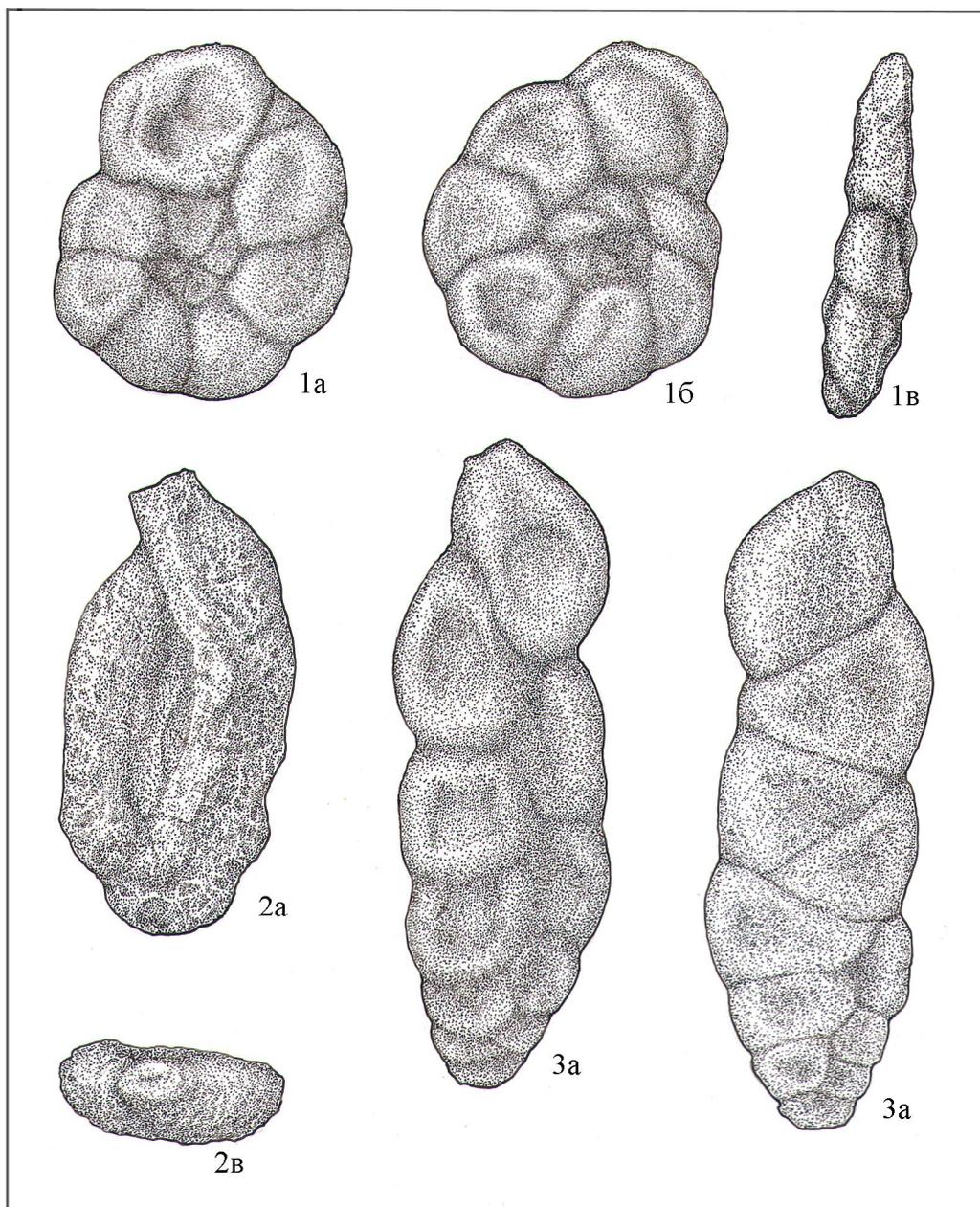


Фиг. 1, 2. *Trochammina arguta* Podobina

Экземпляр № 3416; экземпляр № 3017; скв. 700, гл. 966,81 м; ×60

Фиг. 3, 4. *Trochammina wetteri* Stelck et Wall

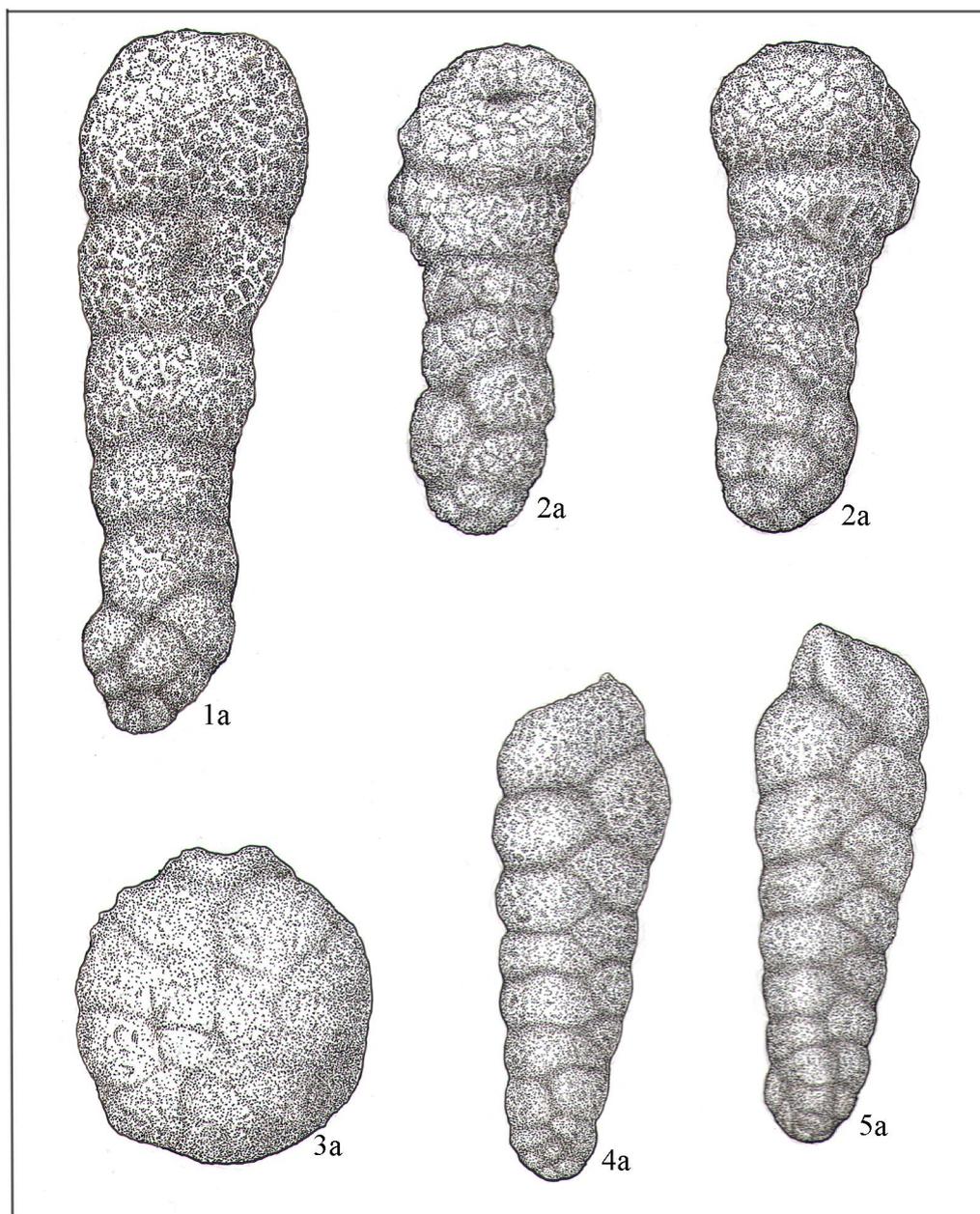
Экземпляр № 3418; экземпляр № 3419; скв. 700, гл. 966,81 м; ×60



Фиг. 1. *Trochammina subbotinae* Zaspelova
Экземпляр № 3420; скв. 700, гл. 966,81 м; ×80

Фиг. 2. *Milliammina manitobensis* Wickenden
Экземпляр № 3421; скв. 700, гл. 966,81 м; ×80

Фиг. 3. *Pseudobolivina contorta* Bulatova
Экземпляр № 3422; скв. 700, гл. 966,07 м; ×80



Фиг. 1, 2. *Pseudoclavulina hastata* (Cushman)

Экземпляр № 3423; экземпляр № 3424; скв. 700, гл. 966,07 м; гл. 966,81 м; х80

Фиг. 3. *Asarotamina antisa* Podobina

Экземпляр № 3425; скв. 700, гл. 966,07 м; х60

Фиг. 4, 5. *Gaudryinopsis angustus* Podobina

Экземпляр № 3426; экземпляр № 3427; скв. 700, гл. 966,81 м; х80

Кроме того, по опубликованным работам проведено сопоставление туронских фораминифер Западно-Сибирской провинции с таковыми Средней Азии [Фораминиферы..., 1964].

Заключение

Туронские фораминиферы широко распространены в пределах Западно-Сибирской провинции.

По некоторому сходству систематического состава они объединены с нижерасположенными апт-альб-сеноманскими в одну ассоциацию организмов, а вмещающие отложения автором выделяются как средний отдел меловой системы [Подобина, 2018]. Позднетуронские фораминиферы объединены в комплекс с *Pseudoclavulina hastata*, а слои, их вмещающие, выделяются как одноименная зона. Эта зона прослежена в верхней части кузнецовского горизонта. В ранее опубликованных работах автора [Подобина, 1966, 1975, 1989, 2000, 2009, 2018] доказывается позднетуронский возраст этой зоны.

В центральном и северном палеобиогеографических районах Западно-Сибирской провинции позднетуронские фораминиферы состоят из сравнительно разнообразного систематического состава, кварцево-кремнистых мелко- и среднезернистых, пиритизированных раковин. В разрезе скв. 700 Вынгапуровской площади видовое разнообразие агглютированных раковин этого возраста наиболее значительно (19 видов). Раннеконьякский комплекс выделен в разрезах скважин самых верхних слоев кузнецовского горизонта в пределах Омской впадины и других понижений в рельефе (Зауралье). В северном и других районах данный комплекс отсутствует, что доказывает образование перерыва в осадконакоплении в раннеконьякское время. Позднетуронская зона *Pseudoclavulina hastata* в этих районах, в том числе и в северном, является пограничной и с перерывом подстилает вышележащие коньякские отложения.

Во всех районах Западно-Сибирской провинции к позднему турону, судя по составу и облику фораминифер, а также литологии вмещающих пород (в верхах кузнецовского горизонта увеличение содержания алевроито-песчаного материала) намечается спад трансгрессии позднетуронского бассейна. Однако в

углублении дна бассейна над меридионально расположенным глубинным разломом (Ново-Васюганская опорная скважина, Вынгапуровская площадь) фораминиферы более разнообразны по систематическому составу, имеют мелкозернистую, хорошей сохранности стенку раковин.

Позднетуронские комплексы фораминифер на родовом и видовом уровнях сходны с одновозрастными Канадской провинции (Северная Аляска, Канада). Почти половина видов в туроне Канадской провинции являются общими с западносибирскими. Кроме того, установлены западносибирские подвиды канадских видов и их विकарианты (заменители). При палеобиогеографических исследованиях необходимо находить общие биохории, в которых таксоны комплексов являются сходными, как, например, в указанных провинциях. Они установлены в пределах Арктической палеобиогеографической области, где преобладают сходные комплексы, благодаря которым можно было провести детальное сравнение таксонов, при этом уточнив возраст вмещающих отложений.

В окраинных районах Западно-Сибирской провинции совместно с агглютированными обнаружены характерные туронские секреционно-известковые раковины. Некоторые из этих видов присутствуют в позднетуронских комплексах провинций Бореально-Атлантической области (Восточно-Европейская, Казахстанская провинции). Все биостратиграфические, палеогеографические и палеобиогеографические исследования характеризуют пограничную позднетуронскую зону с перерывом в осадконакоплении в низах коньякского яруса, относимого в отличие от турона (средний отдел) к верхнему отделу (коньяк-маастрихт) меловой системы Западно-Сибирской провинции.

Список источников

- Булатова З.И., Войцель З.А. и др.** Стратиграфия мезозоя и кайнозоя Западно-Сибирской низменности. М. : Гостоптехиздат, 1957. 148 с., 141 палеонт. табл.
- Глазунова А.Е., Балахматова В.Т., Липман Р.Х. и др.** Стратиграфия и фауна меловых отложений Западно-Сибирской низменности // Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер. 1960. Т. 29. С. 3–346, 60 палеонт. табл.
- Маринов В.А., Агалаков С.Е., Косенко И.Н., Урман О.С., Потапова Е.А., Розбаева Г.Л.** Стратиграфия нижнего и среднего турона (верхний мел) Приенисейской (левобережной) части Западной Сибири по иноцерамам и фораминиферам // Стратиграфия, геологическая корреляция. 2019. Т. 27, № 4. С. 40–58.
- Наливкин Д.В.** Проблемы перерывов // Этюды по стратиграфии. М. : Наука, 1974. С. 10–21.
- Подобина В.М.** Новый комплекс фораминифер в туронских отложениях восточной части Западно-Сибирской низменности. Решения и труды межведомственного совещания по доработке и уточнению унифицированных и корреляционных стратиграфических схем Западно-Сибирской низменности (г. Новосибирск, 15–20 февраля 1960 г.). Л. : Гостоптехиздат, 1961. С. 202–204.
- Подобина В.М.** Фораминиферы верхнего мела Западно-Сибирской низменности. М. : Наука, 1966. 148 с., 19 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Фораминиферы верхнего мела и палеогена Западно-Сибирской низменности, их значение для стратиграфии. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1975. 264 с., 40 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Систематика и филогения гаплофрагмиидей. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1978. 91 с., 17 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Фораминиферы и зональная стратиграфия верхнего мела Западной Сибири. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1989. 175 с., 35 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Фораминиферы и биостратиграфия палеогена Западной Сибири. Томск : Изд-во НТЛ, 1998. 338 с., 62 палеонт. табл.

- Подобина В.М.** Фораминиферы и биостратиграфия верхнего мела Западной Сибири. Томск : Изд-во НТЛ, 2000. 388 с., 80 палеонт. табл., 13 рис.
- Подобина В.М.** Фораминиферы, биостратиграфия верхнего мела и палеогена Западной Сибири. Томск : Том. гос. ун-т, 2009. 432 с., 73 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Новые сведения по биостратиграфии и фораминиферам турона Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 364. С. 181–184, 4 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Фораминиферы и биостратиграфия среднего мела Западной Сибири. Томск : Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2018. 137 с., 25 палеонт. табл.
- Подобина В.М.** Палеобиогеографическое районирование средне- и поздне меловых бассейнов Западной Сибири и других акваторий Северного полушария (по данным изучения фораминифер). Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2021. 184 с., 40 фиг.
- Подобина В.М., Татьяна Г.М.** Пограничные отложения турона-коньяка Западной Сибири по данным изучения фораминифер // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2021. № 1. С. 25–31, 2 палеонт. табл., 3 рис.
- Подобина В.М., Ксенева Т.Г., Татьяна Г.М.** Фораминиферы как индикаторы перерывов в осадконакоплении (на примере палеогена Западной Сибири). Современная палеонтология: классическая и нетрадиционная // Тезисы докладов III сессии Палеонтологического общества при РАН (3–7 апреля 2006 г., Санкт-Петербург). СПб., 2006. С. 103–105.
- Практическое** руководство по микрофауне СССР. Л. : Недра, 1991. Т. 5: Фораминиферы мезозоя. С. 170–198, палеонт. табл. 76–97.
- Фораминиферы** меловых и палеогеновых отложений Западно-Сибирской низменности / под ред. Н.Н. Субботиной. Л. : Недра, 1964. С. 153–178, палеонт. табл. 17–23 (Тр. ВНИГРИ, вып. 234).
- Фурсенко А.В.** Введение в изучение фораминифер. Новосибирск : Наука, 1978. 243 с.
- Podobina V.M.** Paleozoogeographic regionalization of Northern Hemisphere Late Cretaceous basin based on Foraminifera // Proc. 4th Int. Workshop on Agglutinated Foraminifera. Spec. Publ., 1995. No. 3. P. 239–247, 5 figs.
- Stelck C., Wall J.** Kaskapau Foraminifera from Peace River Area of Western Canada // Res. Council Alberta. 1954. Rep. 68, 38 p., 2 pls., 5 text figs.
- Тарпан Н.** Foraminifera from the Arctic slope of Alaska. Pt. 3: Cretaceous Foraminifera // U.S. Geol. Survey. Prof. Paper. 1962. No. 236. P. 91–209, pls. 29–58.
- Wall J.** Cretaceous Foraminifera of the Rocky Mountain Foothills, Alberta // Res. Council Alberta. 1967. Bull. 20. 185 p., 15 pls.

References

- Bulatova Z.I., Vojcel' Z.A. et al. *Stratigrafiya mezozoya i kajnozoya Zapadno-Sibirskoj nizmennosti* [Stratigraphy of the Mesozoic and Cenozoic of the West Siberian Lowland]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1957. 148 p., 141 paleont. tabl. In Russian
- Glazunova A.E., Balahmatova V.T., Lipman R.H. i dr. *Stratigrafiya i fauna melovyh otlozhenij Zapadno-Sibirskoj nizmennosti* [Stratigraphy and fauna of Cretaceous deposits of the West Siberian Lowland] // Trudy VSEGEI. Nov. ser., 1960. V. 29. pp. 3–346, 60 paleont. tabl. In Russian
- Marinov V.A., Agalakov S.E., Kosenko I.N., Urman O.S., Potapova E.A., Rozbaeva G.L. *Stratigrafiya nizhnego i srednego turona (verhnij mel) Prienisejskoj (levoberezhnoj) chasti Zapadnoj Sibiri po inoceramam i foraminiferam* [Stratigraphy of the Lower and Middle Turonian (Upper Cretaceous) of the Yenisei (left-bank) part of Western Siberia according to Inocerami and foraminifera] // Stratigrafiya, geologicheskaya korrelyaciya. 2019. T. 27, No. 4. pp. 40–58. In Russian
- Nalivkin D.V. *Problemy pereryvov* [Interruption issues] // *Etyudy po stratigrafii* [Studies in stratigraphy]. Moscow: Nauka, 1974. pp. 10–21. In Russian
- Podobina V.M. *Novyj kompleks foraminifer v turonskih otlozheniyah vostochnoj chasti Zapadno-Sibirskoj nizmennosti* [A new complex of foraminifera in the Turonian deposits of the eastern part of the West Siberian lowland]. *Resheniya i trudy mezvedomstvennogo soveshchaniya po dorabotke i utocnieniu unificirovannyh. i korrelyacionnyh stratigraficheskikh skhem Zapadno-Sibirskoj nizmennosti (g. Novosibirsk, 15–20 fevralya 1960 g.)*. Leningrad: Gostoptekhizdat, 1961. p. 202–204. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery verhnego mela Zapadno-Sibirskoj nizmennosti* [Foraminifera of the Upper Cretaceous of the West Siberian Lowland]. Moscow: Nauka, 1966. 148 p. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery verhnego mela i paleogena Zapadno-Sibirskoj nizmennosti, ih znachenie dlya stratigrafii* [Foraminifera of the Upper Cretaceous and Paleogene of the West Siberian Lowland, their significance for stratigraphy]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1975. 264 p. In Russian
- Podobina V.M. *Sistematika i filogeniya gaplofragmiidej* [Systematics and phylogeny of haplophragmiids]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1978. 91 p. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery i zonal'naya stratigrafiya verhnego mela Zapadnoj Sibiri* [Foraminifera and zonal stratigraphy of the Upper Cretaceous of Western Siberia]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1989. 175 p. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery i biostratigrafiya paleogena Zapadnoj Sibiri* [Foraminifera and Biostratigraphy of the Paleogene of Western Siberia]. Tomsk: Izd-vo NTL, 1998. 338 p. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery i biostratigrafiya verhnego mela Zapadnoj Sibiri* [Foraminifera and Biostratigraphy of the Upper Cretaceous of Western Siberia]. Tomsk: Izd-vo NTL, 2000. 388 p. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery, biostratigrafiya verhnego mela i paleogena Zapadnoj Sibiri* [Foraminifera, Upper Cretaceous and Paleogene biostratigraphy of Western Siberia]. Tomsk: Tom. gos. un-t, 2009. 432 p. In Russian
- Podobina V.M. *Novye svedeniya po biostratigrafii i foraminiferam turona Zapadnoj Sibiri* [New information on biostratigraphy and foraminifera of the Turonian of Western Siberia] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. No. 364. pp. 181–184. In Russian
- Podobina V.M. *Foraminifery i biostratigrafiya srednego mela Zapadnoj Sibiri* [Foraminifera and Biostratigraphy of the Middle Cretaceous of Western Siberia]. Tomsk: Izd. Dom Tom. gos. un-ta, 2018. 137 p. In Russian
- Podobina V.M. *Paleobiogeograficheskoe rajonirovanie sredne- i pozdne melovyh bassejnov Zapadnoj Sibiri i dru-gih akvatorij Severnogo polushariya (po dannym izucheniya foraminifer)* [Paleobiogeographic regionalization of the Middle and Late Cretaceous

basins of Western Siberia and other water areas of the Northern Hemisphere (according to the study of foraminifera)]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2021. 184 p. In Russian

Podobina V.M., Tat'yanin G.M. *Pogranichnye otlozheniya turona-kon'yaka Zapadnoj Sibiri po dannym izucheniya foraminifer* [Boundary deposits of the Turonian-cognac of Western Siberia according to the study of foraminifera] // *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia]. 2021, No. 1. pp. 25–31. In Russian

Podobina V.M., Kseneva T.G., Tat'yanin G.M. *Foraminifery kak indikatory pereryvov v osadkonakoplenii (na primere paleogena Zapadnoj Sibiri. Sovremennaya paleontologiya: klassicheskaya i netradicionnaya* [Foraminifera as indicators of interruptions in sedimentation (on the example of the Paleogene of Western Siberia. Modern paleontology: classical and unconventional] / *Tezisy dokladov LII sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN (3–7 aprelya 2006 g., Sankt-Peterburg)*. St.Petersburg, 2006. pp. 103–105. In Russian

Prakticheskoe rukovodstvo po mikrofaune SSSR [Practical Guide to the Microfauna of the USSR]. Leningrad: Nedra. 1991. V. 5: Foraminifery mezozoya. pp. 170–198. In Russian

Foraminifery melovyh i paleogenovyh otlozhenij Zapadno-Sibirskoj nizmennosti [Foraminifera of Cretaceous and Paleogene deposits of the West Siberian Lowland] / Pod red. N.N. Subbotnoj. Leningrad: Nedra, 1964. pp. 153–178 (Tr. VNIGRI, vyp. 234). In Russian
Fursenko A.V. *Vvedenie v izuchenie foraminifer* [An introduction to the study of foraminifera]. Novosibirsk: Nauka, 1978. 243 p. (Tr. IGiG SO AN SSSR, vyp. 391). In Russian

Podobina V.M. Paleozoogeographic regionalization of Northern Hemisphere Late Cretaceous basin based on Foraminifera // *Proc. 4th Int. Workshop on Agglutinated Foraminifera. Spec. Publ.*, 1995. No. 3. pp. 239–247

Stelck C. and Wall J. Kaskapau Foraminifera from Peace River Area of Western Canada // *Res. Council Alberta*, 1954. Rep. 68, 38 p.

Tappan H. Foraminifera from the Arctic slope of Alaska. / Pt. 3, Cretaceous Foraminifera // *U.S. Geol. Survey. Prof. Paper*. 1962. No. 236. pp. 91–209.

Wall J. Cretaceous Foraminifera of the Rocky Mountain Foothills, Alberta // *Res. Council Alberta*. 1967. Bull. 20. 185 p., 15 pls.

Информация об авторе:

Подобина В.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра палеонтологии и исторической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: podobina@ggf.tsu.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Podobina Vera M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Department of Paleontology and Historical Geology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: podobina@ggf.tsu.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.10.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 26.10.2021; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 13.03.2023

Original article

doi: 10.17223/25421379/26/4

METAPODIAL PATHOLOGY OF ANCIENT UNGULATES

Andrei V. Shpansky¹, Anastasia V. Aidos (Novik)², Larisa S. Sapunova³,
Sergei V. Saveliev⁴, Aleksei A. Bondarev⁵



^{1,2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

³ Cancer Clinic of Tomsk National Research Medical Centre SB RAS, Tomsk, Russia

⁴ Institute of Human Morphology the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵ Omsk regional branch of the Russian Geographical Society, Omsk, Russia.

¹ Shpansky@ggf.tsu.ru; andreypshpansky@yandex.ru

² novik.anastasia@mail.ru

⁴ embrains@hotmail.com

⁵ gilgamesh-lugal@mail.ru

Abstract. This report describes pathological changes of twelve metapodial bones of ancient large ungulates (*Bison priscus*, *Cervus elaphus*, *Megaloceros giganteus*, *Equus ex gr. gallicus*) from various sites in West Siberia. Two basic types of deteriorations were observed: proximal epiphyseal deformity resulting from arthrosis, and periosteal proliferations on diaphysis. All of these likely are related to trauma. The most probable causes of the injuries include unsuccessful hunting activity of cave lions and environment-associated sharp or blunt force.

Keywords: metapodial, traumatic pathology, periostosis, palaeoecology, predation, *Panthera spelaea*

Acknowledgments: Authors express a sincere gratitude to Dennis F. Lawler (Adjunct in paleopathology, Illinois State Museum; Adjunct Professor of Biology, Southern Illinois University; Associate Editor, International Journal of Paleopathology) for their help in analysis of the described cases of pathologic changes and proofreading. Authors are thankful to the head of radiology department of №2 of the Multipurpose centre of modern medicine "Evromed" D.A. Skripkin for the help in CT research, and the head of the "Arkhaika" studio N.V. Peristov for providing the samples from Ishym district of Omsk province for research.

Source of financing: The research was supported by RSF (project No. 22-17-00140).

For citation: Shpansky A.V., Aidos (Novik) A.V., Sapunova L.S., Saveliev S.V., Bondarev A.A. (2023) Metapodial pathology of ancient Ungulates. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 51–67. doi: 10.17223/25421379/26/4

Научная статья

УДК 569.6

doi: 10.17223/25421379/26/4

ПАТОЛОГИИ МЕТАПОДИЙ ДРЕВНИХ КОПЫТНЫХ

Андрей Валерьевич Шпанский¹, Анастасия Вячеславовна Айдос (Новик)²,
Лариса Станиславовна Сапунова³, Сергей Вячеславович Савельев⁴,
Алексей Анатольевич Бондарев⁵

^{1,2} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Онкологический диспансер Томского национального исследовательского медицинского центра СО РАН, Томск, Россия.

⁴ Институт морфологии человека РАН, Москва, Россия

⁵ Омское региональное отделение Русского географического общества, Омск, Россия

¹ Shpansky@ggf.tsu.ru; andreypshpansky@yandex.ru

² novik.anastasia@mail.ru

⁴ embrains@hotmail.com

⁵ gilgamesh-lugal@mail.ru

Аннотация. Описано 12 случаев патологических изменений на метаподиальных костях крупных копытных (*Bison priscus*, *Cervus elaphus*, *Megaloceros giganteus*, *Equus ex gr. gallicus*) мамонтовой фауны из местонахождений Западной Сибири. Изменения на костях двух типов – деформации проксимальных эпифизов в результате развития артрозов и раз-

растания на диафизах. Возникновение всех патологий связывается с травмированием животных. Наиболее вероятной причиной получения травм являются неудачные охоты *Panthera spelaea*.

Ключевые слова: метаподии, травматические патологии, периостит, палеоэкология, охоты, *Panthera spelaea*

Благодарности: Авторы выражают искреннюю благодарность Деннису Ф. Лоулеру (адъюнкт-профессор палеопатологии Государственного музея Иллинойса; адъюнкт-профессор биологии Университета Южного Иллинойса; заместитель редактора International Journal of Paleopathology) за его помощь в анализе описанных случаев патологических изменений и корректуре текста. Авторы выражают благодарность заведующему отделением лучевой диагностики № 2 МЦСМ «Евромед» Д.А. Скрипкину за помощь в проведении томографического исследования, руководителю студии «Архаика» Н.В. Перистову за предоставление коллекционных образцов (Усть-Ишимский р-н Омской области) для исследования.

Источник финансирования: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00140).

Для цитирования: Shpansky A.V., Aidos (Novik) A.V., Sapunova L.S., Saveliev S.V., Bondarev A.A. (2023) Metapodial pathology of ancient Ungulates // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 51–67. doi: 10.17223/25421379/26/4

1. Introduction

Pathological changes occur rather frequently on teeth and postcranial bones of large fossil mammals, including Quaternary fauna. However, descriptions of such pathological changes for fossil mammals are rare in literature. Therefore, their causes have not been studied, despite the long history of this research [Moodie, 1923; Tasnadi-Kubacska, 1962; Rothschild, Martin, 1993]. The majority of the pathologies have been noted previously, either for teeth of *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799) from Siberia [Mashchenko, Shpansky, 2005; Shpansky, 2014a], or on the backbone of *Megaloceros giganteus* (Blumenbach, 1799) [Shpansky, 2014b], *M. primigenius*, and *Mammuthus trogontherii trogontherii* (Pohlig, 1885) [Bondarev, 2006; Shpansky et al. 2015b]. The unique case of an ankle (hock) joint fusion in *Mammuthus trogontherii chosaricus* Dubrovo, 1966 also has been described [Shpansky et al., 2015a]. In the latter, the cause of the bone ankyloses in this individual could have been the valgus subluxation of the pes, followed by purulent inflammation of the degenerating cartilage of the joint and a fusion of the adjacent articular surfaces. It is possible also that this feature occurred without purulence, since advanced arthrosis does not require infection and pus production. Fused fractures and osteoarthritis have been mentioned for metapodials of artiodactyls and horses [Gadjiev, Gadjiev, 1955; Yatsko, 1962; Skorik, 1979; Roberts et al., 2004; Udrescu, Van Neer, 2005; Dzierzecka et al., 2008; Thomas, Grimm, 2011; Bendrey, 2014; Salmi, Niinimäki, 2016], and tibia of the bison [Kierdorf et al., 2012], as results of different injuries.

In this report, we consider a case series of pathological changes on metapodials of large artiodactyls and horses, from the localities of West Siberia are considered in the present paper. The analysis of pathologies on the fossil material can help assessment of environmental

conditions, animal behaviour, and biotic relationships among different taxa in the ecosystems. One of the probable causes of the metapodial pathology of the Late Pleistocene large ungulates could be unsuccessful hunts of large carnivores that include, first of all, the cave lion, and probably cave hyena and wolf as well.

Institutional Abbreviation – PM TSU, Paleontological Museum of Tomsk State University (Tomsk); OSMHRS, Omsk State Museum of History and Regional Studies (Omsk).

2. Materials and methods

Twelve large ungulate metapodials with pathologies were selected from various localities in south-east of West Siberia: nine specimens from Krasniy Yar locality (Tomsk Province) and three specimens from Ust'-Ishym (Omsk Province). Eleven bones with completely fused epiphyses (listed below) are referred to as adult individuals. One specimen (PM TSU 5/3263) a juvenile. The specimens were chosen due to close geological ages (Late Pleistocene; Shpansky, Kuzmin, 2021), anatomical position in the skeleton (metapodials), similar changes in the bones (asymmetrical abnormal observations) and thus, perhaps common reasons for the pathology.

Bison priscus Bojanus: metacarpal PM TSU 5/3386; metatarsals PM TSU 5/3264, 5/4283, 5/5226, 5/3265, 5/3263, 5/2485 Krasniy Yar (Tomsk Province); OSMHRS 15914/1 PK 2254 (Ust'-Ishym district, Omsk Province).

Megaloceros giganteus Blumenbach: metacarpal PM TSU 5/3377 Krasniy Yar (Tomsk Province).

Cervus elaphus Linnaeus: metatarsal OSMHRS 15914/2 PK 2255 (Ust'-Ishym district, Omsk Province).

Equus ex gr. gallicus Prath: metatarsals PM TSU 5/5413, Krasniy Yar site (Tomsk Province), OSMHRS 15914/3 PK 2256 (Ust'-Ishym district, Omsk Province).

Several previously described similar distal limb pathologies of Pleistocene and recent ungulates have been

referred to for comparison: metatarsal of *Cervus elaphus* Linnaeus, 1758 [Gadjiev, Gadjiev, 1955]; metapodials of horses and moose [Skorik, 1979]; tibia of bison [Kierdorf et al., 2012]; metacarpals of the goat [Bendrey, 2014] and sheep [Thomas, Grimm, 2011]; and radii and metapodials of Late Pleistocene *Paracamelus* [Yatsko, 1962].

Methods. Evaluations included overall description of the bone and comparison with healthy analogues, assessment of typology of the remains, foci of pathological changes, and specific pathology characteristics (inner and outer changes in the bone, and morphometry). In the most complex cases, spiral computer tomography was applied to examine the internal bone structure. The same approach was used for a healthy bison bone (PM TSU 5/5117) for comparison.

Imaging studies were carried out using Computed Tomography (Siemens Emotion 6CT 2007E; Cancer Clinic of Tomsk National Research Medical Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk) and Siemens Somatom Definition Flash (Multi-purpose centre of modern medicine "Euromed", Omsk). The standard software was used in the processing of images. The thickness of the slice in the dorsal (axial) plane for specimens PM TSU 5/2485, 5/3263, 5/3264, 5/4283 was 1.0 mm; for PM TSU 5/3265 and 5/5117 is 0.8 mm; and for OSMHRS 15914/1 PK 2254 is 0.4 mm. Post-processing included modelling of images in sagittal and transversal planes, and 3D reconstructions in the InVesalius 3.0 program. Measurements of bones and pathologies were made using a calliper with accuracy to 0.1 mm. Dimensional characteristics of abnormal bones were compared with a representative series of similar "normal" bones of *Bison priscus*, *Equus ex gr. gallicus*, *Megaloceros giganteus*, and *Cervus elaphus* from Krasniy Yar (Tomsk Province).

Palaeoecological analysis was based on (a) physical and geographical features of the environment at the end of the Late Pleistocene in the territory of West Siberian Plane; (b) on the anatomy and exterior features of the large ungulates that we evaluated; and (c) on comparative typology of pathological changes on the studied bones, including sizes, shapes, positions of changes on the bones, and anatomical position of the pathological bones in the skeleton. On this bases were developed several hypotheses regarding the possible causes for the pathological changes.

Panthera spelaea (Goldfuss, 1810) was the largest and the most active carnivore of Mammoth fauna. Observations of the modern lion (*Panthera leo* (Linnaeus, 1758) were used as an ecological analogue. Hunting strategies and attacks on victims of the modern African lion were examined by one of the authors (S.V. Saveliev) in the territory of Kruger National Park (Republic

of South Africa) in 1998-1999. Documentary video materials were used to support our evaluations. The strategy of modern lions' hunting was described briefly by Kingdon [1977]. Topographic distribution of trauma to giraffes, according to frequency of lion attacks, was presented on the materials from Serengeti National Park [Strauss, Packer, 2013]. The analysis of cave lion hunting techniques was carried out considering the natural conditions in the Late Pleistocene in the south of West Siberian Plane, and morphology and appearance of the hunting objects (*Bison priscus*, *Megaloceros giganteus* and *Equus ex gr. gallicus*). The data considering the hunting of cave lions, gathered by R. Guthrie [1990] during the study of the bison "Blue Babe" carcass from Alaska in 1979, were used in the palaeoecological analysis. Collagen radiocarbon age of that specimen is 36,425 BP (QC-891), estimated Blue Babe's age-at-death to be 8 to 9 years.

3. Results

In our view, a probable important cause of the lesions was hunting activities of large predators, although other environment-sourced trauma do remain a part of the differential diagnoses as well.

3.1. Description of bones

Bison priscus: Left metatarsal (Fig. 1) PM TSU 5/3386. The bone has two local lesions of the cortical layer. One of them is thin, linearly elongated, roller-shaped, oriented perpendicular to the long axis on the dorsal surface of the diaphysis proximal third. The lesion is 31 mm long and 10 mm wide. The second lesion is oval-shaped (33 × 18 mm). It is located in the middle of the diaphysis, medially to the dorsal longitudinal groove, oriented along the diaphysis. The distance between the two lesions is 27 mm. The overall sizes of the bone correspond to male individual of the average size from Krasniy Yar (Table 1).

Right metatarsal (Fig. 2) PM TSU 5/3264. A round-shaped lesion on the lateral side in the middle third of diaphysis is 44 mm in diameter.

Right metatarsal (Fig. 3) PM TSU 5/4283. An oval-shaped lesion is on the lateral side in the middle third of diaphysis (45 × 37 mm).

Left metatarsal (Fig. 4) PM TSU 5/5226. The diaphysis carries the longitudinal ridge-shaped lesion on the left side. It extends from the distal epiphyseal suture up to the first third of the diaphysis length (42 × 15 mm).

Left metatarsal (Fig. 5) PM TSU 5/3265. The bone has a large oval-shaped lesion. The length is 96 mm, the transverse diameter is 79 mm. The surface on the medial side is smooth, while on the medio-plantar it is tuberos with developed grooves and ridges. The joint surface is not deformed (Fig. 5, d).

Left metatarsal (Fig. 6) PM TSU 5/3263 from a semi-adult animal, aged 2–3 years. The distal epiphysis is not fused, but nevertheless the bone is large. Its length without the distal epiphysis is comparable to one of the adult, also measured on the distal end of the diaphysis. The proximal part of the bone is deformed due to remodelling of the upper part of diaphysis and proximal epiphysis. Most of the changes occurred on the dorsal and medial sides. Articular surfaces are rimmed (photo d) suggesting a degree of osteoarthritis. The joint facet for centrotarsale is concave and surrounded by the heavy hyperostosis of the cortical layer. Joint surfaces are smooth.

Left metatarsal (Fig. 7) PM TSU 5/2485. The distal part of the bone is damaged; lateral and medial condyles were broken during the burial process or thereafter. The proximal part reveals deformity. There is a large knob-shaped mass on the medial side. The dorsal and lateral parts of the epiphysis are greatly widened and flattened. It appears that the fusion process between the metatarsale III–IV and centrotarsale may have started, as suggested by the lack of the joint facet with centrotarsale and the tuberculous finely serrated surface of the proximal end. There appears to have been significant loss of overlying joint cartilage. The width of the proximal end on the outer edge of the lesion is 88 mm, while the diaphysis width (42.5 mm) is typical for the average male individuals (Table 2).

Right metatarsal (Fig. 8) OSMHRS PK 2254. The bone reveals an oval-shaped lesion along the long axis of the diaphysis (60 × 25 mm). The lesion is located dorsolaterally on the proximal half of the diaphysis. Its upper margin is 65 mm from the proximal end of the bone, and it is convex more laterally than dorsally. It reaches the maximum height (around 4.5–5 mm relative to the intact bone surface) at 80–86 mm from the proximal end of the bone. The bone surface also reveals a poorly defined ridge that stretches above the lesion along the lateral side of the diaphysis. The edge of the lesion is smooth, straight along the dorsal groove and penetrating into the groove up to 2 mm, forming a slightly visible shelf. There is a poorly defined longitudinal crest on the medial edge of the dorsal groove at the same level of the lesion, which probably is a part of the pathological process. The total width of the diaphyseal lesion, including this crest, is 34 mm. There are two vessel foramina about 1 mm in diameter each on the proximal margin along the longitudinal axis of the bone. The lateral surface of the lesion is furrowed with thin transverse grooves.

General parameters of *B. priscus* metatarsals are listed in the table 2. All of the bones are comparable to the male individuals from Krasniy Yar locality (Tomsk Province) [Shpansky et al., 2016].



Fig. 1. Metacarpal of *Bison priscus* PM TSU 5/3386 from Krasniy Yar (Tomsk Province)
 a – dorsal view; b – medial view; c – diaphysis with marked areas of hyperostosis

Рис. 1. Пястная кость *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/3386 из Красного Яра (Томская область)
 а – вид сзади; б – вид медиальный; в – диафиз с отмеченными участками гиперостоза

Table 1

Metacarpals of *Bison priscus* from Krasniy Yar (Tomsk Province)

Таблица 1

Промеры метакарпальных костей *Bison priscus* из Красного Яра (Томская область)

Measurements, mm	Pathology	Normal [Shpansky et al., 2016]		
	PM TSU 5/3386 left	♀, PM TSU 8/16 left, 8/38 right	♀, PM TSU, n = 41	♂, PM TSU, n = 94
Largest length	232	236	220–249	217.5–261
Media-lateral width of the proximal end	82.5	83, 84	70–83	76.6–103
Largest transversal width of the proximal end	45	46.5, 47	38.5–49.5	42–60
The smallest media-lateral width of the diaphysis	57.4	45, 45.4	43–52	50–67
Media-lateral width of the distal end	89.6	84.5, 86	74–90	80–108
Transversal width of the distal end	44	45, 46	37.3–47	39.5–57
Index of breadth of the diaphysis (4 : 1)	24.7	19.1, 19.2	17.9–22	22.2–27.4



Fig. 2. Metacarpal of *Bison priscus* PM TSU 5/3264 from Krasniy Yar (Tomsk Province)

a – dorsal view; b – lateral view; the fragment of CT image: c – in frontal plane; d – in axial plane

Рис. 2. Пястная кость *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/3264 из Красного Яра (Томская область)

a – вид сзади; b – вид сбоку; фрагмент КТ-изображения: c – во фронтальной плоскости; d – в осевой плоскости



Fig. 3. Metatarsal of *Bison priscus* PM TSU 5/4283 from Krasniy Yar (Tomsk Province)

a – dorsal view; b – lateral view; c – the fragment of CT image in axial plane

Рис. 3. Плюсна *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/4283 из Красного Яра (Томская область)

a – вид сзади; b – вид сбоку; фрагмент КТ-изображения: c – во фронтальной плоскости; d – в осевой плоскости

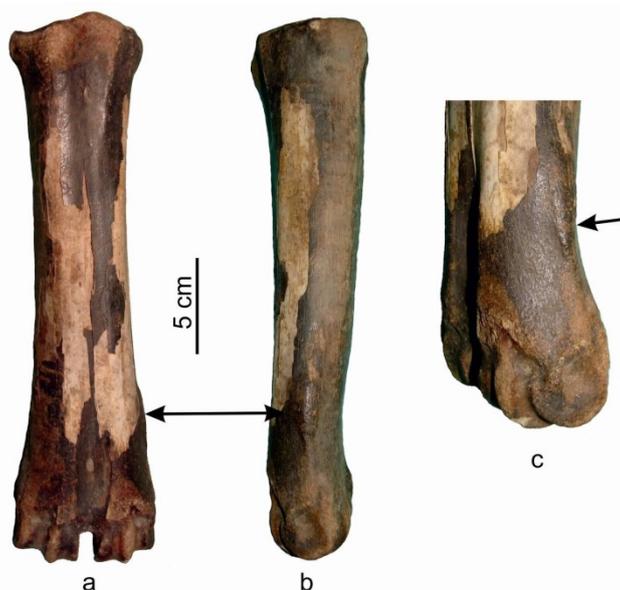


Fig. 4. Metatarsal of *Bison priscus* PM TSU 5/5226 from Krasniy Yar (Tomsk Province)
 a – dorsal view; b – lateral view; c – lateral side of the distal part

Рис. 4. Плюсна *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/5226 из Красного Яра (Томская область):
 а – вид сзади; и – вид сбоку; с – боковая сторона дистальной части

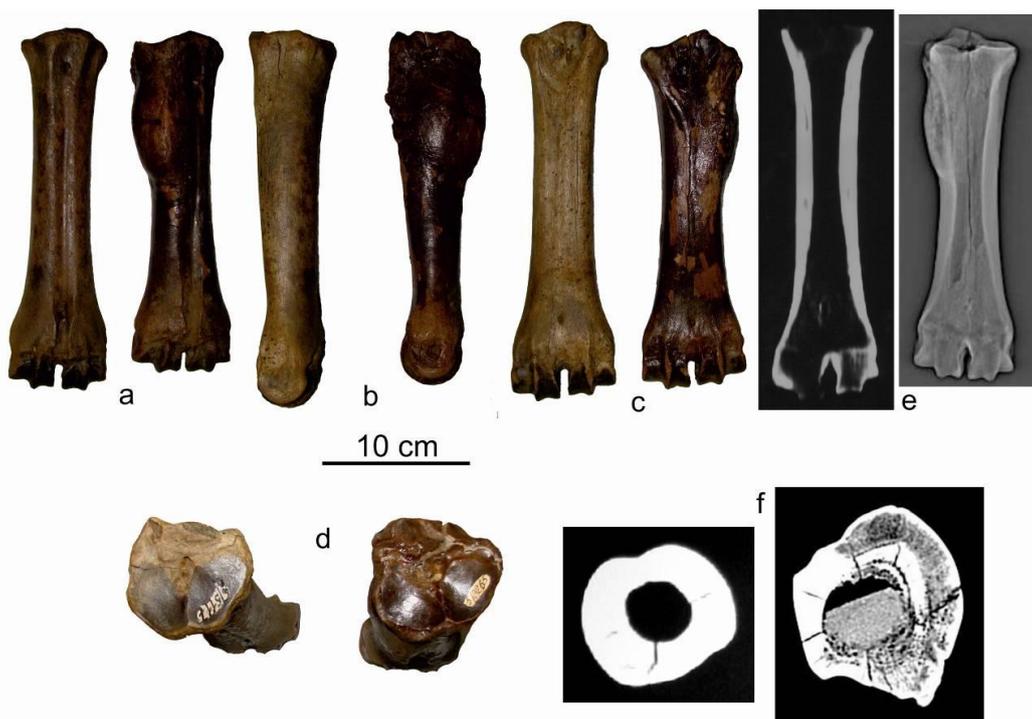


Fig. 5. Metatarsals of *Bison priscus* PM TSU 5/3265 (a₂–f₂)
и PM TSU 5/5117 (a₁–f₁) from Krasniy Yar (Tomsk Province)
 a – dorsal view; b – medial view; c – plantar view; d – proximal view; CT image fragment: e – in frontal plane; f – in axial plane

Рис. 5. Плюсневые кости *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/3265 (a₂–f₂) и ПМ ТГУ 5/5117 (a₁–f₁)
из Красного Яра (Томская область)
 а – вид сзади; б – медиальный вид; с – подошвенный вид; д – проксимальный вид; Фрагмент КТ-изображения: е – во фронтальной плоскости; ф – в осевой плоскости

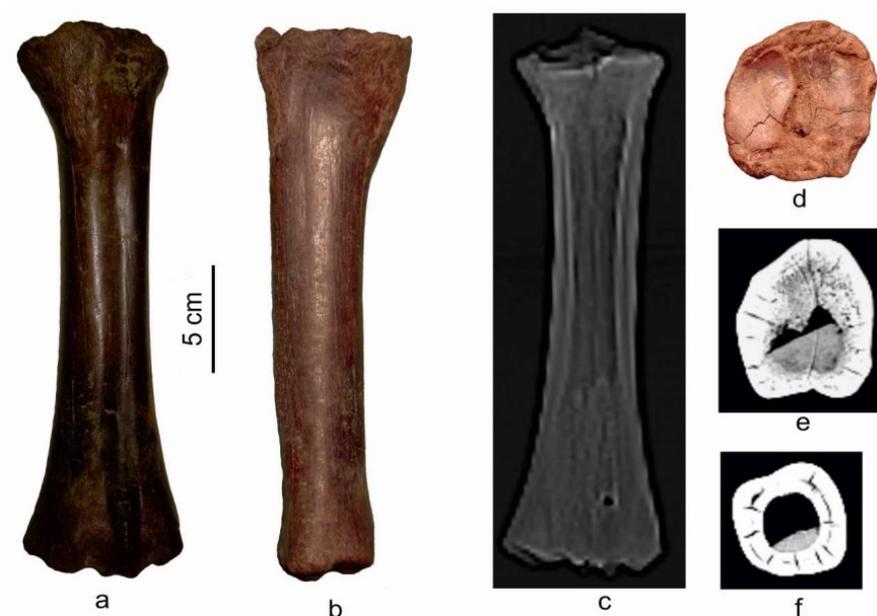


Fig. 6. Metatarsal of *Bison priscus* PM TSU 5/3263 from Krasniy Yar (Tomsk Province)

a – dorsal view; b – medial view; d – proximal view; CT image fragment: c – in frontal plane; in axial plane: e – in proximal part of the diaphysis; f – in the middle of diaphysis

Рис. 6. Плюсна *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/3263 из Красного Яра (Томская область)

a – вид сзади; b – вид медиальный; d – вид проксимальный; фрагмент КТ-изображения: c – во фронтальной плоскости; в аксиальной плоскости: e – в проксимальной части диафиза; f – в середине диафиза



Fig. 7. Metatarsal of *Bison priscus* PM TSU 5/2485 from Krasniy Yar (Tomsk Province):

a – plantar view; b – dorsal view; d – proximal view; CT image fragment: c – in frontal plane; e – proximal part of the diaphysis in axial plane

Рис. 7. Плюсна *Bison priscus* ПМ ТГУ 5/2485 из Красного Яра (Томская область)

a – вид спереди; b – вид сзади; d – вид проксимальный; фрагмент КТ-изображения: c – во фронтальной плоскости; e – проксимальная часть диафиза в аксиальной плоскости

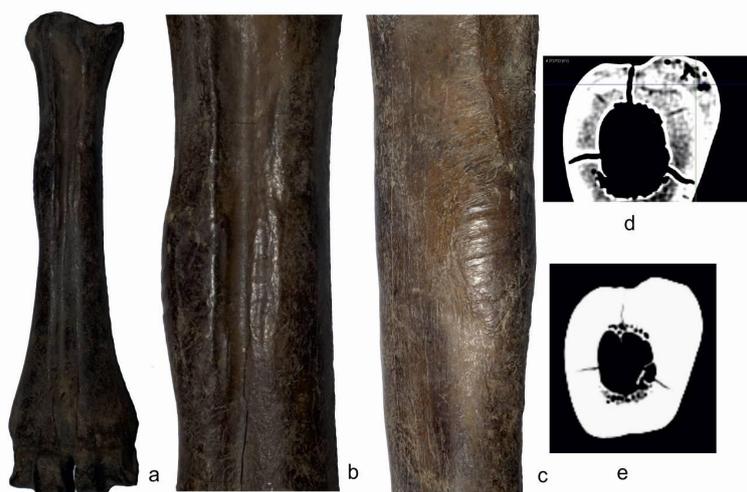


Fig. 8. Metatarsal of *Bison priscus* OSMHRS 15914/1 PK 2254 from Ust'-Ishym district (Omsk Province)

a – dorsal view; b – the area of diaphysis with hyperostosis, dorsal view; c – lateral view; CT image fragment in axial plane: d – in the area of hyperostosis; e – below the hyperostosis

Рис. 8. Плюсна *Bison priscus* OSMHRS 15914/1 ПК 2254 из Усть-Ишимского района (Омская область)

a – вид сзади; b – область диафиза с гиперостозом, вид сзади; c – вид сбоку; фрагмент КТ-изображения в осевой плоскости: d – в области гиперостоза; e – ниже гиперостоза

Table 2

Metatarsals of *Bison priscus* from Krasniy Yar (Tomsk Province)

Таблица 2

Промеры метатарсальных костей *Bison priscus* из Красного Яра (Томская область)

Measurements, mm	Pathological							Normal	
	Krasniy Yar (Tomsk province) PM TSU						Omsk province	Krasniy Yar (Tomsk Province) PM TSU	
	5/3264	5/4283	5/5226	5/3265	5/3263	5/2485	OSMHRS 15914/1 PK 2254	♂ n = 94	♀ n = 45
Largest length	300.5	300	293	284	C259	C267	280.5	258.2–335.7	262–311
Media-lateral width of the proximal end	71.5	67	67	75.3	63	88	57.7	56–78	53.1–69.4
Largest transversal width of the proximal end	67	60.5	65.5	70	67,5		57.2	58–77.5	51–66
The smallest media-lateral width of the diaphysis	47.4	53.5	46,5	48	39	42,5	36.5	41–58	34.3–43.5
Media-lateral width of the distal end	84	83	78.6	85	C72		76.3	63.5–93	66.5–81.5
Transversal width of the distal end	46	43	44.3	47.5	C41.5		41.5	40.6–55	36–49
Index of breadth of the diaphysis (4:1)	15.8	17.8	15.9	16.9			13.0	14.4–18.3	12.1–14.8

Megaloceros giganteus: left metatarsal PM TSU 5/3377 of an adult animal (Fig. 9). The bone bears a broad oval-shaped lesion on the medial side of the diaphysis, on its lower third. The lesion spreads on the dorsal side, closing the dorsal groove in four places with intermittent bone bridges. The lesion (54 × 42 mm) is located 180 mm from the proximal bone end and

110 mm from the distal end. The post-burial damage to the bone involves absence of the palmar wall of the diaphysis. The diaphysis cavity, opened by the damage, does not reveal morphological abnormalities of the internal structure in the area of the outer bone lesion (Fig 9, b). The overall size of the specimen is very large, compared with specimens from localities in West

Siberia south-east, exceeding the sizes of isolated bones from giant deer from the Krasniy Yar locality and from the skeleton of the male individual from Dzambul (Table 3), dated $43\ 600 \pm 550$ ka BP (OxA-20250) [Shpansky, 2014b].

Cervus elaphus: left metatarsal (Fig. 10) OSMHRS 15914/2 PK 2255. The bone has a deformity of the proximal part on the dorsal and partially lateral surface of the diaphysis and proximal epiphysis. It is wide, with maximal size on the dorsal edge of the centrotarsale facet up to 9 mm, and 5 mm on its lateral edge, covering two-thirds of length of the facet's lateral edge. The lesion along the dorsal edge of the facet for tarsale 2+3 is 3.5 mm wide and does not cover the medial surface of the bone. The lesion rises above the surface of the joint facets up to 6–7 mm, thus probably restricting joint mobility. The proximal end is uneven, smooth, and could have been in contact with an analogous centrotarsale lesion. The dorsal longitudinal groove reaches the normal length at the distance of 45 mm from the proximal edge of the bone (including the lesion). Above this point, it is more flat and less easily seen. Because of the deformity of the proximal epiphysis, the proximal metatarsal canal is obliterated. The joint facets of the proximal epiphysis are coarsely denticulated and appear to have increased prominence of the articular margins. The facet for centrotarsale is widened medially and its medial edge is lifted and sharpened. Rough

proximal epiphyseal, metaphyseal, and articular bone suggests joint injury, resulting in severe osteophyte rimming of articular surfaces: articular and periarticular osteoarthritis. Linear dimensions of OSMHRS 15914/2 PK 2255 are comparable to metatarsals of fossil red deer from Krasniy Yar (Novosibirsk Province) [Vasiliev, Ovodov, 2013] (Table 4).

Equus ex gr. gallicus: left metatarsal PM TSU 5/5413 of the adult animal (Fig. 11). There is an oval-shaped lesion of the cortical layer on the dorso-lateral side of the diaphysis above its middle part. The lesion is oriented lengthwise. The distance from the distal end of the bone to the lesion is 150 mm, and 90 mm from the proximal bone end to the lesion. The surface is rough and tuberos. The length is 50 mm, and its width is 25 mm. Below this first lesion is a second one. It is 40 mm from the first, is shorter and comb-shaped, and is located on the dorso-lateral-side, across the epiphysis. Its length is 25 mm, and width is 9 mm. The dorsal surface of the bone reveals thin (about 1 mm in width), longitudinal grooves that are rare on the plantar surface. These changes may have occurred after the death of the animal, as a result of dissolution of the bone surface. Similar features were observed on some bones without pathologies including specimens from horses and other mammals from the Krasniy Yar locality. There are no visible changes in the proportions of the specimen PM TSU 5/5413.

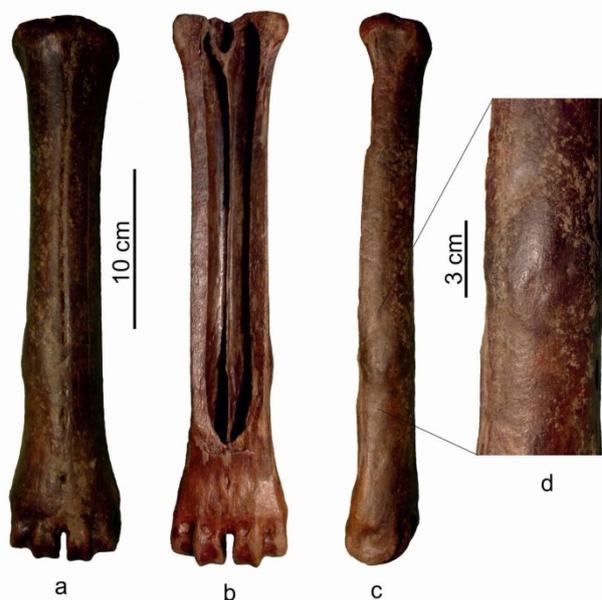


Fig. 9. Metacarpal of *Megaloceros giganteus* PM TSU 5/3377 from Krasniy Yar (Tomsk Province)

a – dorsal view; b – palmar view; c – medial view; d – diaphysis with hyperostosis on the medial side

Рис. 9. Пястная кость *Megaloceros giganteus* ПМ ТГУ 5/3377 из Красного Яра (Томская область)

a – вид сзади; b – вид с пальмарной стороны; c – вид медиальный; d – диафиз с гиперостозом на медиальной стороне

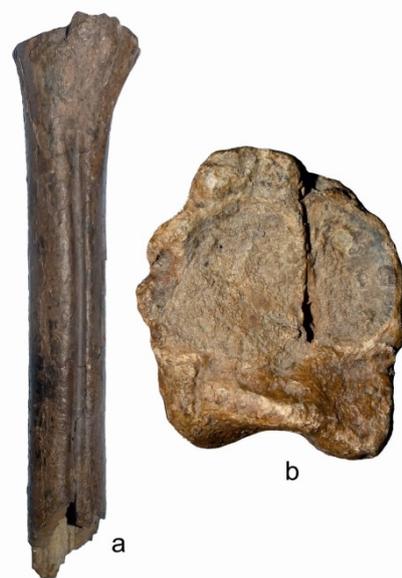


Fig. 10. Metatarsal of *Cervus elaphus* OMK 15914/2 ПК 2255 from Ust'-Ishym district (Omsk Province)

a – dorsal view; b – proximal view

Рис. 10. Плюсовая кость *Cervus elaphus* OSMHRS 15914/2 ПК 2255 из Усть-Ишимского района (Омская область)

a – вид сзади; b – вид проксимальный

Table 3

Metacarpals of *Megaloceros giganteus* from localities of West Siberia

Таблица 3

Промеры метакарпальных костей *Megaloceros giganteus* из местонахождений Западной Сибири

Measurements, mm	Pathological	Normal	
	Krasniy Yar (Tomsk Province) PM TSU 5/3377 left	Dzhambul (Pavlodar Province) POIKM KP 7191 [Shpansky, 2014b]	Krasniy Yar (Tomsk Province) PM TSU, n = 5 [Shpansky, 2011]
Largest length	347	335	322–343
Media-lateral width of the proximal end	71.7	73	60.5–67.7
Largest transversal width of the proximal end	C42	51.4	40–42.8
The smallest media-lateral width of the diaphysis	46.5	44.9	36–41
Media-lateral width of the distal end	75	72.1	67–68.6
Transversal width of the distal end	43	43.5	40–41.4

Table 4

Metatarsals of *Cervus elaphus* from localities of West Siberia

Таблица 4

Промеры метатарсальных костей *Cervus elaphus* из местонахождений Западной Сибири

Measurements, mm	Pathological	Normal	
	OSMHRs 15914/2 PK 2255	Krasniy Yar (Novosibirsk Province) [Vasilev, Ovodov, 2013]	Khakassia, Grot of Proskuryakov
Largest length	C250	365–5	330–352.3 (341.7)
Media-lateral width of the proximal end	52.8	43,5–52.2 (49.2)	43–54.1 (48.6)
Largest transversal width of the proximal end	56.5	47–56.5 (51.8)	49–57,4 (52.9)
The smallest media-lateral width of the diaphysis	33.2	33	26,7–33.1 (29.9)

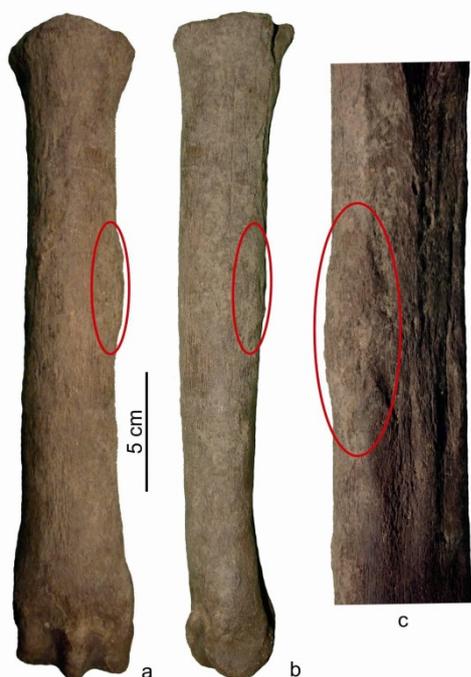


Fig. 11. Metatarsal of *Equus ex gr. gallicus* PM TSU 5/5413 и from Krasniy Yar (Tomsk Province)

a – dorsal view; b – dorso-lateral view; c – diaphysis on plantar-lateral side

Рис. 11. Плюсна *Equus ex gr. gallicus* ПМ ТГУ 5/5413 и из Красного Яра (Томская область)

a – вид сзади; b – вид сзади сбоку; c – диафиз на плантарно-боковой стороне

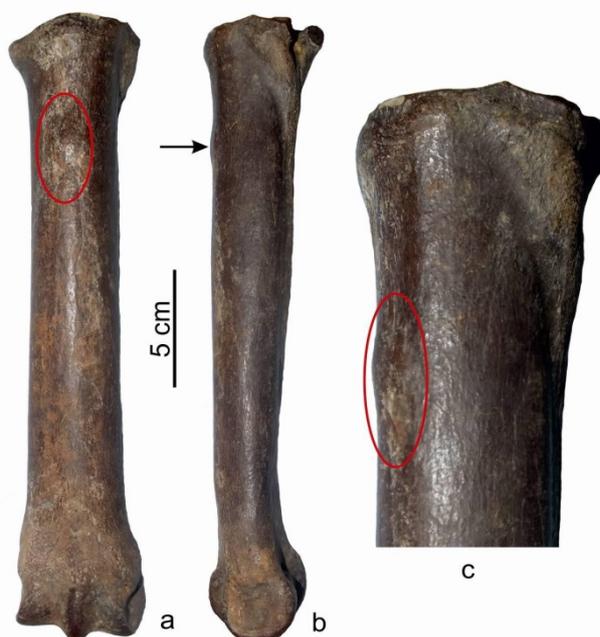


Fig. 12. Metatarsal of *Equus ex gr. gallicus* OMK 15914/3 ПК 2256 from Ust'-Ishym district (Omsk Province)

a – dorsal view; b – lateral view; c – proximal part with hyperostosis, latero-dorsal view

Рис. 12. Плюсна *Equus ex gr. gallicus* OSMHRs 15914/3 ПК 2256 из Усть-Ишимского района (Омская область)

a – вид сзади; b – вид сбоку; c – проксимальная часть с гиперостозом, вид сбоку

Metatarsals of *Equus ex gr. gallicus* from localities of Western SiberiaПромеры метатарсальных костей *Equus ex gr. gallicus* из местонахождений Западной Сибири

Measurements, mm	Pathological		Normal
	Krasniy Yar (Tomsk Province) PM TSU 5/5413	OSMHRS 15914/3 PK 2256	Krasniy Yar (Tomsk o Province) PM TSU, <i>n</i> = 60
Largest length	289	271	263.3–305.0
Media-lateral width of the proximal end	57.2	56.8	45.4–62.7
Largest transversal width of the proximal end	49.6	47.0	41.0–54.0
The smallest media-lateral width of the diaphysis	38.8	37.8	32.5–43.0
Media-lateral width of the distal end	52.8	55.3	50.0–62.3
Transversal width of the distal end	40.0	41.4	37.0–46.4

Left metatarsal (Fig. 12) OSMHRS 15914/3 PK 2256. The bone possesses an irregular-rounded lesion (18 × 19 mm) on the proximal part of the diaphysis, on its dorsal side. The upper edge is 41 mm below the proximal bone end. The height relative to the joint surface is 2–3 mm. The surface is tuberos. Measurements of metatarsals of horses are presented in Table 5.

3.2. Imaging studies

Bones with evident pathologies were imaged using computed tomography; these included PM TSU 5/2485, 5/3263, 5/3264, 5/3265, 5/4283, OSMHRS 15914/1 PK 2254 and a healthy specimen PM TSU 5/5117.

The right metatarsal PM TSU 5/4283 revealed filling of the medullary canal by cancellous bone, from the distal metaphysis to the level of the upper third of the diaphysis (Fig. 3, c). The proximal part of the medullary canal is hollow. A separation of the cortical layer into two parts is observed on the upper diaphysis, approximately at the level of the middle thickness of the compact bone (Fig. 3, c, d). The separation is observed along the full circle of the diaphysis. The most prominent separation occurs on the lateral and medial sides of the diaphysis. The space inside the separated compact tissue is filled with cancellous bone. The semi-fusiform lesion has maximal height of 10 mm above the surface of the diaphysis, and it is associated with the focal lesion in the middle third of the diaphysis, on its lateral side. There is a lamellar separation of the cortical layer along the outer part of the compact layer from the latero-plantar side in the area of the lesion maximum.

The appearance of the pathological changes of the right metatarsal PM TSU 5/3264 are very similar to PM TSU 5/4283. The semi-fusiform lesion [on 5/3264] (the maximal height is 12 mm above the surface of the diaphysis) formed by the area of the focal lesion in the middle third of the diaphysis, on its lateral side, which led to the local hyperostosis of the cortical layer. The changes of the endosteum are not mentioned because the

free volume of the medullary canal is preserved (Fig. 2, c). The cancellous bone is developed on the level of the distal epiphysis and corresponds to normal bone (Fig. 5, e). The compact tissue of the epiphysis has a longitudinal separation from the medial and lateral sides. The medial separation above the outer lesion splits to mediadorsal and mediplantar. On the lateral side, the gap inside the separated compact tissue is filled by cancellous bone, while from the medial, especially the mediplantar, it is not filled. The separation comprises middle and proximal parts of the bone from the lower edge of the lesion to the proximal epiphysis.

The outer changes on PM TSU 5/3265 (Fig. 5, e, f) are the most developed of the presented set. The imaging study revealed a significant development of the spongy bone in the upper third of the medullary canal (75 mm). Looks like thinning of cortex under the lesion, and a somewhat radiating pattern on image 'f'. Also present is a discreet external margin. I wonder if this was a benign tumor or maybe ossifying fibrous tissue. Filling of the distal medullary canal by spongy bone starts along the plantar wall of the diaphysis, gradually increasing in volume, and filling the cavity of the medullary canal by $\frac{3}{4}$ in its proximal part (Fig. 5, e, f). The cancellous bone in the proximal half of the medullary canal is fine-pored in the center, while along the periphery, near the walls the compact bone, it becomes coarse. The cortical layer on the upper third of the diaphysis was resorbed from the inside. It is permeated with large canals and large pores (Fig. 5, f). The maximum replacement is observed from the medioplantar side. The longitudinal separation of the compact bone, as in the PM TSU 5/4283 and 5/3264, is not observed. The replacement of compact bone by cancellous bone (from distal to proximal part) starts from the dorsal side, close to outer part of the compact bone, then it spreads deep into the compact, becoming coarse it covers the plantar side (Fig. 5, f).

CT imaging of OSMHRS 15914/1 PK 2254, PM TSU 5/3263, and 5/2485 showed absence of internal changes of the diaphysis. The filling of the medullary canal by cancellous bone in PM TSU 5/2485 is on the level of normal bones (Fig. 7, *c*). Changes involve only the proximal epiphysis and upper half of the diaphysis (Fig. 7, *d*, *e*). In PM TSU 5/3263 the distal part of the medullary canal is filled by the trabecular bone as in the normal bones, but the rest of the diaphysis is still present as a thin layer along the plantar wall up to 3–5 mm (Fig. 6, *f*). The changes involve the proximal epiphysis and the adjacent diaphysis (Fig. 6, *e*). The cortical layer is getting considerably thinner on the dorsal side and becomes porous. In OSMHRS 15914/1 PK 2254 the spongy bone also presented in the upper two-thirds of the medullary canal and forms a layer (up to 3–5 mm) along the plantar and dorsal walls (Fig. 8, *e*). The changes of the cortical layer in the middle part of the diaphysis have more features in common with metatarsals PM TSU 5/3264 and 5/4283. In these three specimens, the volume of the spongy bone in the proximal part of the medullary canal gradually increases, filling two-thirds of the volume on the level of the lesion. The proximal part of the diaphysis in the area of development of the lesion is characterized by replacement of the compact tissue by the spongy on the dorsal side. The development of the process is from the inside of compact layer out.

3.3. Evaluation of bone lesions by localization and morphology

The observations may be divided into two groups: the first one includes metatarsals of *B. priscus* with proximal lesions (PM TSU 5/3263 and 5/2485) and a metatarsal of *Cervus elaphus* (OSMHRS 15914/2 PK 2255) with analogous deformity. The second group unites the rest of metatarsals with changes located on diaphysis.

We presume that injury of the rear limb in the area of tarsal joint characterizes the first group. This led to the following changes of the bone tissue and development of osteoarthritis. The specimen PM TSU 5/2485 clearly shows the development of ankylosis of tarsal joint as a result of osteoarthritis. Fig. 7 *a*, *d* shows that proximal epiphysis does not remain its natural articular surface. It confirms our hypothesis about complete ankylosis and joint immobility. Earlier [Shakalov, 1952] etiological bases for osteoarthritis in the majority were considered to be different infectious diseases. It may also happened as a result of external damage of the bone. Similar cases of osteoarthritis were mentioned by F.K. Skorik [1979] on carpal and tarsal joints of horses from the archeological sites of Ukraine [Skorik, 1979] and Poland [Dzierzecka et al., 2008]. The osteoarthritis with partial ankylosis, observed as a bony bridges and gaps of the joints, developed in the area of bone accretion. Devel-

oped exostoses are mostly observed on lateral sides, which allows author to connect these pathologies with legs traumas of horses [Skorik, 1979].

Metatarsals PM TSU 5/3263 and OSMHRS 15914/2 PK 2255 preserved the articular surfaces for centrotarsale and tarsale 2+3 (Fig. 6, 10), of joints is absent in spite of their considerable deformation and the presence of marginal exostoses. These features allow us to diagnosis the general condition of osteoarthritis in these joints. A similar case of pathology was described for a *C. elaphus* metatarsale from Binagady locality [Gadjiev, Gadjiev, 1955]. Osteoartheses emerge as a result of damage of cartilaginous areas of the articular surfaces. According to Shakalov [1952], osteoartheses of hock joint emerge as a result of chronic micro-traumas of the joint facets by constant sliding and compression of joint surfaces under the effect of animals' body mass in conditions of high load of limbs on uneven, hard, or slimy ground.

Metapodials of the second group (PM TSU 5/3377, 5/3386, 5/3264, 5/4283, 5/5226, 5/3265, 5/5413, OSMHRS 15914/1 PK 2254, OSMHRS 15914/3 PK 2256) reveal overgrowths, at relatively consistent foci. Metacarpals of bison (PM TSU 5/3386) and giant deer (PM TSU 5/3377) are affected mainly on the dorsomedial side of the bone. Metatarsals of bison and horses, except for PM TSU 5/3265, have lesions on the dorso-lateral side. Almost all of the described metatarsal lesions are located in the middle or proximal part of the diaphysis (Fig. 13). While metapodial diaphysis lack foci for muscle attachments, tendons are present, such as those of extensors ext. digitorum longus and ext. digitorum brevis on the dorsal aspect [Gambaryan et al., 1979]. Most of the lesions are rounded or broad oval-shaped. In PM TSU TTY 5/5226 and 5/3386 they present as smooth rollers. The lesions tend to be are flattened, tuberos, or smooth. We suggest that common outer similarity for specimens PM TSU 5/5226 and 5/3386, could suggest similar causes. Probably, animals got deep cut or puncture, accompanied by periostosis and varied healing morphologies.

PM TSU 5/3265 is presumed to be damaged on the distal bases of m. peroneus tertius, which attachment on the dorsomedial side of the metatarsal bone proximal end in bisons [Gambaryan et al., 1979] coincides with the lesion on this bone. This lesion could be termed enthesiophyte or plural enthesiophytes. Together with the damage to the joint capsule, an inflammatory process can result in bone proliferation, loss, and deformity.

A metacarpal from a giant deer (PM TSU 5/3377) with opened diaphysis shows absence of changes from the inside. Non-specific mostly smooth periosteal reaction, from environmental trauma or from a bite wound that may have resulted in a periosteal hematoma or infection.

Metacarpals of bison (PM TSU 5/3264, 5/4283, OSMHRS 15914/1 PK 2254) and horses (PM TSU 5/5413, OSMHRS 15914/3 PK 2256) are similar in external and internal pathological manifestations and lesion spatial localizations. Their most probable source is periosteal reaction that in turn could be caused by single injuries, wounds and bruises with damage to bone periosteum, perhaps complications resulting from periosteal hematoma, more severe inflammation, or infection, followed by organization and healing with morphological alterations.

Analogous cases of periostosis resulting from metapodials injury were mentioned by A. Skorik [1979] in *Alces alces* L. specimens from Medieval. Pathologies of two metacarpals were attributed to bone fractures: in specimen P-29 there is a fracture with slight displacement and deformity. In specimen P-28 there is a closed fracture without displacement. A larger series of 11 metacarpals and 14 metatarsals with periostosis in camels *Paracamelus alexejevi* Hav. was described by I. Yatsko [1962] from karst caves of Odessa. A similar case of hematoma development on the metatarsal bone has been described in a modern reindeer from the Taimyr Peninsula [Salmi, Niinimäki, 2016]. Pathological changes in metapodials described by these authors are analogous to the listed.

4. Discussion

4.1. Exterior and some morphological features of Late Pleistocene bison, deer and horses

Bison priscus inhabited the territory of the West Siberian Plane during the Late Pleistocene. It was a large animal. Withers height for females was up to 1.8 m, the weight is suggested to have been 700–900 kg. Males were more massive: withers height reached 2–2.2 m and the weight was up to 1 300–1 700 kg. Horn spread for females could be up to 100 cm (including horn covers, and 70 cm without them). Male horn spread could reach 150 cm (including horn covers, and 90–110 cm without them) [Shpansky et al., 2016]. Bison of the Middle Pleistocene even larger. Animals were covered with thick dense hair with guard hairs up to 30 cm in length [Flerow, 1979; Guthrie, 1990]. “Body in the winter fur is covered by long hairs, except for limbs below the forearm and heel, where the hair is shorter, straight” [Flerow, 1979]. The most dense and long hair was developed on the neck and shoulders, forming a kind of mane. “Beard and hanging hairs on the lower side of the neck and chest are very long. The length of hairs of the beard is up to 750 mm, while in neck hanging hairs are 500 mm. Hair on the neck and ventral side of the body is formed on the stomach, front, and rear of hind limbs from the stifle to the hock joint. Its length on the stom-

ach is about 200 mm, while on the limbs it is 150–200 mm. Limbs below the hock and metacarpal joints bear short, almost straight hairs, with awn length 35–40 mm” [Flerow, 1979; p. 76]. The snout of the animal is wide, nostrils are large.

The giant deer (*Megaloceros giganteus*) is the largest Quaternary deer. Its withers height for males could reach 1.7 m, weight up to 700–800 kg. Horn spread for old males could reach 3.5 m [Shpansky, 2014b]. There are no available corpses of these animals to date, therefore the distribution of fur on their bodies is hypothetical. We presume that the thickest and longest fur also was in the area of neck and the shoulder girdle.

The red deer (*Cervus elaphus*) is significantly smaller, but nevertheless the male individuals of some modern populations of Siberia can reach the weight of 400 kg, while the sizes of fossil deer from localities of West Siberia south-east were 10 % larger than modern ones [Vasiliev, Ovodov, 2013]. The integument of Late Pleistocene Asian red deer is unknown definitely. Probably, it was close or identical to the modern representatives of the Caspian red deer (*Cervus elaphus sibiricus*) from Altai or East Siberia. An important ecological feature of the modern red deer is its forest habitat. The Late Pleistocene deer of West Siberia inhabited the food-plain thicket of bushes and trees. These conditions are considerably more difficult for the movement of animals.

Horses (*Equus ex gr. gallicus*) inhabited the territory of West Siberia. This horse was a large, high-limbed animal, capable of high-speed movements. The withers height for male individuals could reach up to 1.4–1.6 m.

In order to facilitate further analysis and comparison, we present some characteristics for large African cavi-corns, which to some extent are ecological analogues for *Bison priscus*, *Megaloceros giganteus*, and *Cervus elaphus* also are prey for African lions. They are presented by eland *Taurotragus oryx* Pallas, 1766, big kudu *Tragelaphus strepsiceros* Pallas, 1776, roan antelope *Hippotragus equinus* Diesmarest, 1804, blue wildebeest *Connochaetes taurinus* Zimmermann, 1780 and African buffalo *Syncerus caffer caffer* Sparrman, 1779. Eland is the biggest and massive antelope, whose mass for males reaches 1 ton (400–600 kg for females), and withers height is 1.6–1.8 m. Other antelopes with relative large sizes have a considerably smaller mass. A roan antelope is about 300 kg, with withers height of males 1.6 m. Wildebeest is very close to Bovine by its exterior. The withers height for males is up to 1.5 m and the weight is 250 kg. Females are smaller, their withers height is 1.35 and weight is around 180 kg. The neck is covered with mane and long hairs on the underside. A big kudu is much smaller: male’s withers height is about 1.4 m and the weight is up to 250 kg. African buffalo is bigger than wildebeest and more massive. Its withers height for

males is up to 1.8 m (usually 1.5–1.6 m) and body length 3–3.4 m. Weight of the adult male is 600 kg. The biggest old males can be up to 900–1,000 kg. All of the listed species have relatively poor pelage. Thus, males of *Bison priscus* excels big African cavicorn by their weight and protection. Giant and red deer does not have direct morphological analogues in the modern African fauna. According to their constitution, biotope, ecology, they are close to eland, kudu and partially giraffe. An ecological analogue of the Late Neopleistocene horse can be a zebra. There are two species of zebra in the African savannah: *Equus grevyi* Oustalet, 1882 and *Equus quagga* Boddaert, 1785. Grévy's zebra is a little bigger. Its weight is 350–430 kg, body length is 3 m, and withers height is about 1.4 m. Burchell's zebra has a more compact body (withers height is 1.2–1.4 m, length is 2–2.4 m) and relatively wide hoof, its weight is 290–340 kg.

Given data show that the ungulates that lived during the Late Pleistocene on the territory of West Siberian Plain were very large and significantly superior to their ecological analogues from African savannah.

4.2. Probable causes of the outer injury of ungulates

Metapodial bones of ungulates are not well-protected from mechanical trauma because the overlying muscle mass is small, compared to humerus, radius, femur, or tibia. Hind limbs are significantly weaker than forelimbs, in both muscle and bone mass. Hair covering on the distal extremities also is much shorter than on the shoulders [Flerov, 1979]. Therefore, the impact force on distal extremities was relatively high. As a result, injury-related hematomas, open wounds, haemorrhage, direct periosteal damage, and soft tissue injury involving ligaments and joint capsules, all would be more likely. Thus, post-healing complications would be expected to be more common also.

One possible source of distal limb trauma in ungulates could be running into, or tripping over, obstacles in the environment (i.e. trunks of fallen trees). A second possible group of causes could be lower limb trauma induced by Palaeolithic humans. Finally, attacks by large predators must be considered (for example, cave lions).

The first and the second causes are doubtful. Lesions of the cortical layer on the specimens PMTSU 5/3386 and 5/5226 do not have the characteristic shape of hit by a blunt object. They have linearly elongated shape of the cortical layer hyperostosis, which is more consistent with the cutting or scarring effect on the soft tissue and periosteum. Position of bone outgrowth on the majority of specimens is significantly shifted laterally, which is also contradicts to dorsal effect on the bone, occurred because of the hit on obstacles. In addition, described lesions of metapodial diaphysis were mentioned on ani-

mals (bison, giant deer, horse) inhabited in open landscapes and, probably, avoided the forest areas, where their movements would be difficult.

A throw of the stick by a Palaeolithic man, focused to hit limbs of bison, large deer horse as a hunting strategy also looks doubtful, including the physical reasons. In order to cause the serious trauma (fracture or joint damage) or knock down a large animal like bison or giant deer, it requires very powerful and accurate throw. In the Late Palaeolithic man possessed very effective throwing spears. Therefore, it is doubtful the man used this technique of hunting, having the opportunity to hit the animal in the chest or abdomen.

The third cause – the attack of the large predator seems most likely. Modern African lions usually jump over the back of the large artiodactyls (wildebeest, buffalo, giraffe) in the hunt of pride. Asphyxiation is carried out by grabbing the victim's her muzzle or neck. A different strategy was observed during the hunt for giraffe on the territory of Kruger National park (RSA). The main concept of the lion hunt of three prides included not the driven hunt, well known from the literature, but in single ambushes [Estes, 1997]. In order to fulfil this, the predator had been hiding along the daily migration zones of victims and suddenly attacked from ambush. At the same time, fixation on the body of a prey never happened. Lions tried to break the prey's limb with one stroke and quickly run back. With a little luck the neck of the victim throttled immediately. Only third to fourth attack was successful.

In Late Pleistocene animals were covered with a thick and long fur, so the first way to attack (jumping on the back of the victim or the capture of the neck) was less effective. The mouth of a predator was filled by the hair (especially long on the neck), while the claws even punching the skin, were ineffective due to the fat layer and powerful muscular frame of victim. Capture the muzzle and asphyxiation of the animal is possible only when the victim is passive (in a static position), it is not in a motion. To fulfil the capture the victim should be stopped. The similar attack is reconstructed accurately by Guthrie [1990] on the frozen corpse of Bison «Blue Babe», found in Alaska. The bison really had serious damages of the facial bones of the skull. Blood clots are marked in the muzzle of bison, i.e. heart continued to pump blood, and thus the damage was in his lifetime, that proves the asphyxiation of victim by the predator. At the same time, Guthrie mentioned scratches on metapodials, which are, probably, the marks of lion's paw hit on the limb of the victim.

It was not easy to reach the neck of the horned animal (bison, red or giant deer) immediately. A prey was protected by the powerful horns that could repel the attack. Bison's and, probably, giant deer's neck were covered by

a thick mane (Fig. 13, a). It can be assumed that hit in the legs was the most effective way to stop and immobilize the victim. The described techniques of hunting of modern African lions for the big prey like giraffe show the causes of the most probable trauma of limbs. High frequency of modern lions' failed attacks on the big animals allows to presume the analogous genesis of the studied pathologies and regenerative processes. In large artiodactyls the most vulnerable areas for lions attacks were distal

ends of limbs, especially hind ones, being less protected and thin. Described traumas were gained in the result of clinging of the front paw of the predator on the limbs of ungulates to knock them down and possibly break metapodial, thereby immobilize the animal. Distribution of pathologies on metapodials of ungulates shows that hits on hindlimbs of bison and horse occurred at a height of 30 to 50 cm from the ground, while the hit on forelimbs happened 30–35 cm from the ground (Fig. 13).

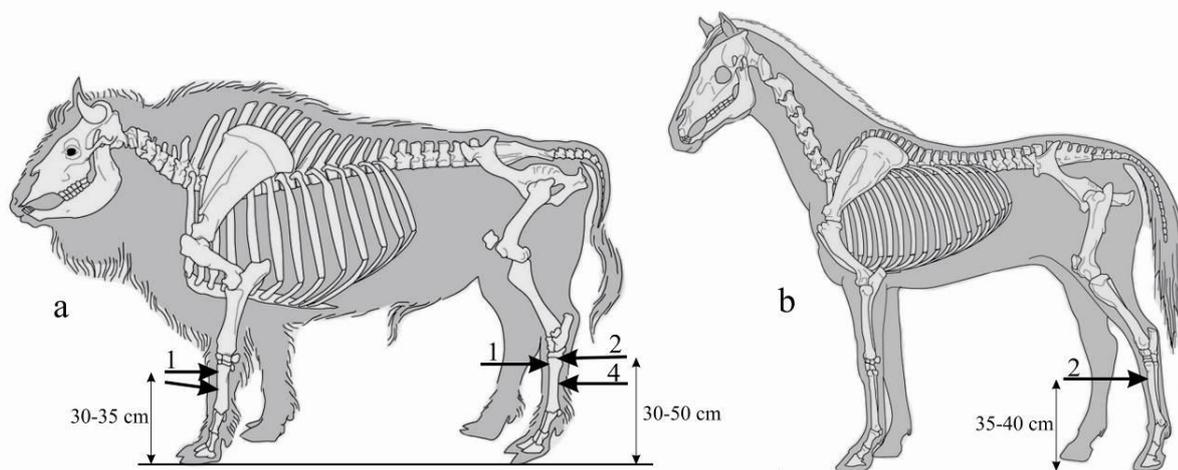


Fig. 13. The scheme of pathologies distribution on skeletons of bison (a) and horse (b)

Digits above the arrows represent the number of mentioned pathologies in this part of the skeleton

Рис. 13. Схема распределения патологий на скелетах бизона (a) и лошади (b)

Цифры над стрелками обозначают количество упомянутых патологий в этой части скелета

The habitat of the cave lion in West Siberian Plain had a set of specific features, comparing with African savannah. A hunting strategy of cave lion on the vast open areas of West Siberia with tundra-steppe landscapes differs from one of the modern African lion in savannah. Crouching and attack from the ambush at short distance were especially difficult in the cold season. In winter the herbage became sparse, trampled, and predator movement became more visible. Therefore, in our point of view, the cases of *Panthera spelaea* hunt on the large ungulates in the form of attack from the distance of several tens of meters were the most probable. It caused the necessity of persecution the prey, and thus attack of the predator from behind directing victim's legs to stop it. N.K. Vereshchagin [1971] pointed on the higher speed skills of cave lions.

Posture and amplitude of the hind limbs in motion of extant forest *Bison bonasus* and steppe *Bison bison* (analogue to *B. priscus*) are well-studied with the help of video and analysed in details [Gambaryan, Sukhanov, 1979]. In steppe-dwellers *B. priscus* and *B. bison* amplitude of motion and angles of hind limb deflection in the fulcrum is less than in the forest-dweller *B. bonasus*.

Such differences shows more upright position of the distal part of the hind limb relative to the ground in the steppe forms. Distal part of the limbs of *B. bonasus* is closer to the ground during the movement (in the moment of at the moment of touchdown and lift-off). Kierdorf et al. [2012] described the healed fracture of tibia of *B. menneri* which is a forest form of the bison. Authors suspect that the cause of it could be uneven or slippery ground, a large predator (i.e. *Homotherium crenatidens* or *Megantereon cultridens adroveri*) hunting not excluded. Predator's paw hit from the lateral side on the hind limb of bison. Striking above the ankle joint led to the fracture of tibia. Thus, the hit on the limbs was an effective way of hunting of cave lions for large Pleistocene ungulates. The studied specimens prove that not all of the hunts were successful and some animals survived the attack and could live for long enough after a heavy trauma. Attribution of all specimens to the males could be an indirect evidence for unsuccessful attack of the cave lions, as the causes for pathologies. A relatively large male individuals with a more powerful skeleton could survive after the predators' attack.

In spite of the series of the studied material from Krasniy Yar locality, its relation of “injured” bones to the total volume of the set of *B. priscus* is not high. There is only one case for overall quantity of 144 metacarpal specimens, which is 0.7 %. For 159 specimens of metatarsals, there are 6 cases of pathologies revealed, which is 3.8 %. There is only one case of pathology on metatarsal for *Equus* ex gr. *gallicus* from Krasniy Yar (1.7 %) for the total number of 60 specimens. Materials from Omsk Province are presented by isolated specimens and do not reflect the real frequency of pathology

occurrence. The rare occurrence of pathologies of the hit genesis on the fore limbs can be explained by visual control of the front sector, that allowed to avoid traumas even on the high speed. Cases of pathological changes on the other long bones (humerus, radius, femur and tibia) of the ungulates are not revealed in our materials. This feature is also unusual, because veterinary data show that tibial fractures for the cattle may reach 40–50 % of the total number of long bones fractures [Gangl et al., 2006; Ahmed, Al-Sobayil, 2012] while the portion of metapodial damage is 10–13 %.

References

- Ahmed, A.F., Al-Sobayil, F.A. Fractures in young, single-humped camels (*Camelus dromedarius*) // Turk. J. Vet. Anim. Sci. 2012. V. 36(1). pp. 1–8.
- Bendrey R. Care in the community? Interpretations of a fractured goat bone from Neolithic Jarmo // Iraq. International Journal of Paleopathology. 2014. V. 7. pp. 33–37.
- Bondarev, A.A. *Deformatsii pozvonkov Mammuthus sp.* [Deformations of *Mammuthus* sp. Vertebrae] // Trudy Zoologicheskoy Komissii ORO RGO. 2006. V. 3. pp. 121–125. In Russian
- Dzierzecka M., Charuta A., Kobryn H. Pathological changes of Horse bones in the Middle Ages in Poland – photographic records // Bull. Vet. Institute Pulawu. 2008. V. 52. pp. 689–694.
- Estes R.D. The Behavior Guide to African Mammals. Russel Friedman Books. South Africa. 1997. P. I-XXII, 611 p.
- Flerow C.C. *Sistematicheskoye polozheniye Bison v semeystve Bovidae. V kn.: Evropeyskiy bizon. Morfologiya, sistematika, evolyutsiya, ekologiya.* [Systematic status of Bison within the family Bovidae]. In: European Bison. Morphology, Systematics, Evolution, Ecology. Moscow: Nauka Publishers. 1979. pp. 9–127. In Russian:
- Gadzhiev G.V., Gadzhiev D.V. *Materialy k izucheniyu paleopatologii binagadinskih kopytnykh* [Materials of paleopathology research of Binagadinsk ungulates] // DAN AzSSR. 1955. V. 11(4). pp. 267–272. In Russian
- Gambaryan P.P., Gudkov V.M., Sukhanov V.B. *Skeletnyye myshtsy. V kn.: Evropeyskiy bizon. Morfologiya, sistematika, evolyutsiya, ekologiya* [Skeletal muscles. In: European Bison. Morphology, Systematics, Evolution, Ecology]. Moscow: Nauka Publishers. 1979. pp. 196–291. In Russian
- Gambaryan P.P., Sukhanov V.B. *K biomekhanike dvigatel'nogo apparata zubrov. V kn.: Evropeyskiy bizon. Morfologiya, sistematika, evolyutsiya, ekologiya* [On biomechanics of European bison locomotory apparatus. In: European Bison. Morphology, Systematics, Evolution, Ecology]. Moscow: Nauka Publishers. 1979. pp. 292–327.
- Gangl M., Grulke S., Serteyn D., Touati K. Retrospective study of 99 cases of bone fractures in cattle treated by external coaptation or confinement // Veterinary Record. 2006. V. 158. pp. 264–268.
- Guthrie R.D. Frozen Fauna of the Mammoth steppe. The Story of Blue Babe. University Chicago Press. Chicago and London. 1990. 367 p.
- Kierdorf U., Kahlke R.-D., Flohr S. Healed fracture of the tibia in a bison (*Bison menneri* Sher, 1997) from the late Early Pleistocene site of Untermassfeld (Thuringia, Germany) // International Journal of Paleopathology. 2012. V. 2. pp. 19–24.
- Kingdon J. East African Mammals. An Atlas of Evolution in Africa. V. 3, Part A: Univ. Chicago. 1977. 476 p.
- Mashchenko E.N., Shpansky A.V. Abnormal Dental Morphology in the Mammoth *Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799 // Paleontological Journal. 2005. V. 39(1). pp. 93–100.
- Moodie R.L. Palaeopathology. Illinois press. 1923. 567 p.
- Roberts C.A., Alves Cardoso F., Bernofsky K., Henderson C., Jakob T., Plomp K., Ponce P., Sharman J., Spenser R. Palaeopathology: Studying the origin, Evolution and Frequency of disease in Human remains from archaeological sites // Archaeology. 2004.
- Rothschild B.M., Martin L.D. Paleopathology. Disease in the Fossil Record. Boca Raton, CRC Press. 1993.
- Salmi A.-K., Niinimäki S. Enteseal changes and pathological lesion in draught reindeer skeletons – Four case studies from present-day Siberia // International Journal of Paleopathology. 2016. V. 14. pp. 91–99.
- Shakalov K.I. *Bolezni konechnostey loshadi* [Limbs' diseases of horse]. Moscow: Sel'hozgiz. 1952. 450 p. In Russian
- Shpansky A.V. The giant deer *Megaloceros giganteus* (Blum.) (Mammalia, Artiodactyla) from the southeastern West Siberian Plain // Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological series, 2011. V. 86(1), pp. 18–30. In Russian
- Shpansky A.V. Variations in teeth morphology in woolly mammoth *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799) (Mammalia, Elephantidae) // Trudy ZIN. 2014a. V. 318. No. 1. pp. 24–33. In Russian
- Shpansky A.V. Skeleton of the Giant Deer *Megaloceros giganteus giganteus* (Blumenbach, 1803) (Mammalia, Artiodactyla) from the Irtysh Region near Pavlodar // Paleontological Journal. 2014b. V. 48(5). pp. 534–550.
- Shpansky A.V., Kuzmin Y.V. The MIS 3 megafauna of the southeastern West Siberia and the possibility of late survival of steppe mammoth (*Mammuthus trogontherii chosaricus*) // Radiocarbon. 2021. V. 63. No. 2. pp. 575–584.
- Shpansky A.V., Sapunova L.S., Pilyukova A.V. A Traumatic Case in the Mammoth *trogontherii chosaricus* Dubrovo 1966 Elephant // Quaternary International. 2015a. V. 379. pp. 82–88.
- Shpansky A.V., Svyatko S.V., Reimer P.J., Titov S.V. Findings of *Bison priscus* Bojanus (Artiodactyla, Bovidae) skeletons in Western Siberia // Russian Journal of Theriology. 2016. V. 15(2). pp. 100–120.
- Shpansky A.V., Vasiliev S.K., Pecherskaya K.O. The Steppe Elephant *Mammuthus trogontherii* (Polig) from the Irtysh Region Near Omsk // Paleontological Journal. 2015b. V. 49(3). pp. 304–325.

- Skorik A.F. *Eksperiment po analizu sluchayev osteopatologii u iskopayemykh mlekopitayushchikh* [A trial to analyse cases of osteopathologies in fossil mammals] // *Vestnik zoologii*. [Bulletin of Zoology]. 1979. No. 3. pp. 63–66. In Russian
- Strauss M.K.L., Packer C. Using claw marks to study lion predation on giraffes of the Serengeti // *Journal of Zoology*. 2013. V. 289. pp. 134–142.
- Tasnadi-Kubacska A. *Paleopathology*. Jena: Veb Gustav Fischer Verlag. 1962. 269 p.
- Thomas R., Grimm J. The role of age, sex and body weight in the formation of “buttresses” on sheep metatarsals // *International Journal of Paleopathology*. 2011. V. 1. pp. 121–125.
- Udrescu M., Van Neer W. Looking for human therapeutic intervention in the healing of fractures of domestic animals. In: Davies J., Fabic M., Mainland I., Richards M., Thomas R. (Eds.), *Diet and Health in Past Animal Populations. Current Research and Future Directions. Proceedings of the 9th ICAZ Conference, Durham 2002*. Oxbow Books, Oxford, 2005. pp. 24–33.
- Yatsko I.Ya. *Sledy bolezney na iskopayemykh skeletakh pliocenovyykh verbyudov iz karstovykh peshcher v okrestnostyakh Odessy* [Traces of diseases on fossil skeletons of Pliocene camels from karst caves in the vicinity of Odessa] // *Tr. Odesskiy gosudarstvennyy universitet* [Tr. Odessa State University]. 1962. V. 152. Geological and geographical sciences. No. 8. pp. 34–45. Table I–II. In Russian
- Vasiliev S.K., Ovodov N.D. *Blagorodnyy olen' (Cervus elaphus cf. sibiricus) v yuzhnoy chasti Zapadnoy i Tsentral'noy Sibiri v pozdnem pleystotsene i golotsene* [Red deer (*Cervus elaphus* cf. *sibiricus*) in the Southern part of Western and Central Siberia during the Late Pleistocene and Holocene] // *Zoological Journal*. 2013. V. 92. No. 9. pp. 1031–1045. In Russian
- Vereshchagin N.K. *Peshchernyye l'vy Golarctiki* [The Cave Lions of Holarctics] // *Materialy po faunam antropogena SSSR* [Materials on the anthropogenic fauna of the USSR]. Leningrad: Nauka. 1971. pp. 123–199. In Russian

Information about the authors:

Shpansky A.V., Dr. Sci. (Geol-Miner.), Professor, Department of Palaeontology and Historical Geology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: Shpansky@ggf.tsu.ru

Aidos (Novik) A.V., postgraduate student, Department of Palaeontology and Historical Geology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: novik.anastasia@mail.ru

Sapunova L.S., radiologist, Cancer Clinic of Tomsk National Research Medical Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.

Saveliev S.V., Dr. Sci. (Biology), Professor, Institute of Human Morphology the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: embrains@hotmail.com

Bondarev A.A., Omsk regional branch of the Russian Geographical Society, Omsk, Russia.

E-mail: gilgamesh-lugal@mail.ru

Contribution of the authors:

Shpansky A.V. – general concept, morphological and morphometric analyses, paleoecological reconstructions, fundraising.

Aidos (Novik) A.V. – morphometric analysis, preparation of illustrations and tables.

Sapunova L.S. – carrying out computed X-ray tomography, description of CT images and analysis of the causes of pathologies.

Saveliev S.V. – formal analytics.

Bondarev A.A. – morphometric analysis of a part of the material, preparation of illustrations.

The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах:

Шпанский А.В., доктор геол.-минер. наук, профессор кафедры палеонтологии и исторической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: Shpansky@ggf.tsu.ru, andreyspansky@yandex.ru

Айдос (Новик) А.В., аспирант, кафедра палеонтологии и исторической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: novik.anastasia@mail.ru

Сапунова Л.С., рентгенолог, онкологический диспансер Томского национального исследовательского медицинского центра СО РАН, Томск, Россия.

Савельев С.В., доктор биологических наук, профессор, Институт морфологии человека РАН, Москва, Россия.

E-mail: embrains@hotmail.com

Бондарев А.А., Омское региональное отделение Русского географического общества, Омск, Россия.

E-mail: gilgamesh-lugal@mail.ru

Вклад авторов:

Шпанский А.В. – общая концепция, морфологический и морфометрический анализы, палеоэкологические реконструкции, привлечение финансирования.

Айдос (Новик) А.В. – морфометрический анализ, подготовка иллюстраций и таблиц.

Сапунова Л.С. – проведение компьютерной рентгеновской томографии, описание КТ-снимков и анализ причин возникновения патологий.

Савельев С.В. – формальный анализ.

Бондарев А.А. – морфометрический анализ части материала, подготовка иллюстраций.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.01.2022; одобрена после рецензирования 04.11.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 24.01.2021; approved after reviewing 04.11.2022; accepted for publication 13.03.2023

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ГЕОМОРФОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 528.8

doi: 10.17223/25421379/26/5

ОЦЕНКА ЗАПЕЧАТАННОСТИ ПОЧВ И ГРУНТОВ В ГОРОДАХ ЗАСУШЛИВОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ



Олег Андреевич Гордиенко^{1, 4}, Станислав Сергеевич Шинкаренко²,
Ольга Юрьевна Кошелева³, Анастасия Александровна Дубачева⁴,
Роман Сергеевич Омаров⁵

^{1, 2, 3} ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоград, Россия

⁴ Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ oleg.gordienko.95@bk.ru

² shinkarenkos@yxfanc.ru

³ olya_ber@mail

⁴ dubatcheva.a@gmail.com

⁵ st098989@student.spbu.ru

Аннотация. Приводятся результаты дешифрирования запечатанных почв и грунтов для территории городов засушливой зоны России и Республики Казахстан. В результате геоинформационного анализа территории установлено, что запечатанные поверхности могут занимать от 10 до 54 % площади городов. Выявлена прямая зависимость уровня запечатанности от плотности населения, возраста образования и природных условий конкретного города.

Ключевые слова: запечатанность, экраноземы, *Ekraic Technosols*, дешифрирование, космические снимки, метод максимального правдоподобия, засушливая зона, озеленение, дистанционное зондирование.

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН № FNFE-2022-0012.

Для цитирования: Гордиенко О.А., Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Оценка запечатанности почв и грунтов в городах засушливой зоны по данным дистанционного зондирования Земли // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 68–78. doi: 10.17223/25421379/26/5

Original article

doi: 10.17223/25421379/26/5

ASSESSMENT OF SOIL AND GROUND SEALING IN ARID ZONE CITIES BASED ON REMOTE SENSING DATA

Oleg A. Gordienko^{1, 4}, Stanislav S. Shinkarenko², Olga Yu. Kosheleva³,
Anastasia A. Dubacheva⁴, Roman S. Omarov⁵

^{1, 2, 3} FSC of Agroecology RAS, Volgograd, Russia

⁴ Volgograd State University, Volgograd, Russia

⁵ St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

¹ oleg.gordienko.95@bk.ru

² shinkarenkos@yxfanc.ru

³ olya_ber@mail

⁴ dubatcheva.a@gmail.com

⁵ st098989@student.spbu.ru

Abstract. The paper presents the results of interpretation of sealed soils and grounds for the territory of cities in the arid zone of the Russian Federation and the Republic of Kazakhstan. As a result of the geoinformational analysis of the territory, it was found that the sealed surfaces may occupy from 10 to 54 % of the area of cities. The direct dependence of the level of sealed area on population density, age of formation and natural conditions of a particular city was revealed. The use of Sentinel 2 satellite

data makes it possible to interpret the sealed, landscaped, open and water surfaces in various natural, climatic and socio-economic conditions of the cities under study with an error not exceeding 20 %. The analysis of the proportion of sealed, landscaped, water and open areas of the studied cities suggested the existence of a direct dependence of these indicators on the population density, age of formation and natural conditions of each particular city. Cities of the steppe zone, namely Saratov, Volgograd and Elista have from 15 to 28 % of landscaped areas, while in the cities of semi-desert (Uralsk, Astrakhan) and desert (Aktau, Makhachkala) zones this indicator varies from 3 to 12 %. The relationship between the density of urban population and the proportion of sealed and open areas has been revealed. The cities of Saratov, Astrakhan and Aktau are the main industrial and residential facilities of the regions, as a consequence, the sealed urban area varies from 35 to 54 %. The city of Volgograd, despite the presence of major industrial facilities and developed road and transport network, sealed only 21 %. This is due to the fact that its territory is mainly occupied by agricultural land (Sovetsky District) and areas not involved in the process of urbanization (Sarpinsky Island in Kirovsky District). The obtained data on the proportion of sealed, landscaped and open areas in the studied cities can give an objective picture of the development of urban space and determine the promising directions of its development. This information in the future will allow to determine the zones of intensive heating of the territory and highlight the so-called "heat islands". The obtained information about the territory sealing of the studied cities can be in demand for the solution of territorial planning tasks, in the implementation of works on landscaping and urban area improvement, and in the future will allow to determine the zones of intensive territory warming and to allocate the so-called "heat islands".

Keywords: *sealing, ekranozems, Ekraic Technosols, interpretation, space images, maximum likelihood method, arid zone, greening, remote sensing*

Source of financing: This work was performed within the framework of state assignment no. FNFE-2022-0012.

For citation: Gordienko O.A., Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Y., Dubacheva A.A., Omarov R.S. (2023) Assessment of soil and ground sealing in arid zone cities based on remote sensing data. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 68–78. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/5

Введение

К 2020 г. доля городского населения достигла 55,7 % от общемирового. На симпозиумах SUITMA (Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military areas) прогнозируется, что к 2030 г. в городах величина населения достигнет 60 %, а к 2050 г. – 70 %. С ростом городов значительно трансформируются и меняются как городские экосистемы (урбоэкосистемы), так и естественные экосистемы пригородных территорий. Преобладающим процессом в современных городах, оказывающим мощное воздействие на экосистемы, почвенный покров, а также микроклимат является запечатывание (экранирование) поверхностей под различными покрытиями.

Перекрытие почв и грунтов непроницаемыми покрытиями является одной из сильнейших форм деградации, поскольку она затрагивает все функции почв включая экосистемные [Почва..., 1997]. К запечатанным почвам и грунтам – экраноземам [Прокофьева, 1998] и Ekranic Technosols, по WRB-2014 (update-2015) [IUSS, 2015] относятся почвы и грунты, перекрытые различным непроницаемым материалом. Они объединяют антропогенно-трансформированные и искусственно созданные почвы, образованные как на культурном слое, так и на насыпных, переотложенных и перемещенных грунтах, и представляют собой специфичную форму проявления урботехногенеза (или техногенеза). К запечатанным поверхностям в нашем понимании отнесены любые, как нативные, так и антропогенно-преобразованные или специальным образом сконструированные почвы и грунты.

В настоящее время определение доли запечатанных, открытых и озелененных территорий городов в сухостепных и полупустынных зонах является приоритетным, поскольку все открытые участки в дальнейшем могут быть озеленены и благоустроены.

К негативным эффектам процесса запечатывания почв и грунтов можно отнести усиление процессов опустынивания [Barbero-Sierra et al., 2013; Шинкаренко и др., 2020; Кошелева и др., 2021;] благодаря усилению эффекта городского «острова тепла». Под «островом тепла» понимаются ареалы повышенных температур, которые образуются в результате повышенного выброса в атмосферу тепловой энергии в пределах городской и пригородной территории, а также над крупными промышленными и транспортными объектами. Рост зон перегрева поверхности городской среды негативно сказывается на условиях проживания людей, а также работе городских хозяйств и служб [Xiao et al., 2013]. Негативные последствия запечатывания территории в городах косвенно и напрямую оказывают воздействие на различные функции почв [Tobias, 2013; Charzyński, 2016; Tikhonova et al., 2020]. Так, например, при герметизации поверхностей происходит препятствование инфильтрации талых, дождевых и коммунальных вод и, соответственно, усиление поверхностного стока [Nakayama et al., 2007].

Как правило, запечатыванию подлежат не только территории пустырей, но и сельскохозяйственные угодья. Это в особенности присуще городам с быстро возрастающим населением и экономикой [Toth, 2012; Salvati, 2014].

При процессе герметизации обычно срезаются верхние почвенные слои и горизонты, что в дальнейшем влечет за собой большую потерю биоразнообразия, а именно уменьшение общего числа микробиоты, углерода, азота, а также нарушает процессы дыхания почв [Scalenghe, Ajmone, 2009; Piotrowska-Dlugosz, Charzyński, 2014].

Несмотря на несомненное отрицательное влияние герметизации поверхностей, экранированные почвы и грунты осуществляют функцию хранения информации об изменениях природной среды и ее историческом изменении вследствие хозяйственной деятельности.

Целью настоящего исследования является определение соотношения запечатанных, открытых и озелененных поверхностей в городах степной, полупустынной и пустынной зон по данным дистанционного зондирования Земли для определения ареалов интенсивного прогрева в пределах урбанизированных территорий.

Объекты и методы

В трудах многих отечественных и зарубежных исследователей отражена проблема установления доли

запечатанных поверхностей. Для территории городов Российской Федерации аналогичные исследования проведены в г. Москва [Власов и др., 2017; Никифорова и др., 2017; Хайбрахманов и др., 2017] и агломерации в целом [Савин, 2013], Ростова-на-Дону [Горбов и др., 2016] и Волгограда [Гордиенко и др., 2019; Кошелева, 2019]. Для исследуемых в работе городов определение доли запечатанности производилось лишь для Астрахани [Синцов и др., 2013], однако за 8 лет доля экранированных поверхностей могла существенно измениться в ту или иную сторону.

Анализ зарубежных исследований по данному вопросу выявил большой пласт работ по определению запечатанности территории различных городов мира: Мадрида [Cortijo, González, 2017; García, Pérez, 2016a, 2016b; García, Pérez, 2016] и Барселоны [Salvati, Carlucci, 2016], Трнавы [Корескá, Rosina, 2012], Рима [Tombolini et al., 2015], Бака-эль-Гарбия [Мохамед, 2015] и других.

В качестве объектов исследования выбраны территории городов Российской Федерации (Волгоград, Астрахань, Махачкала, Саратов, Элиста) и Республики Казахстан (Актау, Уральск), расположенных в пределах степной, полупустынной и пустынной природных зон (рис. 1).



Рис. 1. Объекты исследования

Fig. 1. Objects of research

Для определения запечатанности поверхности возможно применение ручного (визуального) и автоматизированного методов дешифрирования космических снимков. Ручной метод позволяет оперировать с точностью до 85 %, которая зависит от качества космического снимка, опыта дешифровщика, программного обеспечения и пр. Для картографирования запечатанных территорий наилучшим выглядит автоматизированный метод с ручным обучением. Данный метод позволяет осуществлять картографирование с точностью до 97 % [Савин, 2013]. Вследствие этого в настоящей работе применялся именно автоматизированный метод с использованием программного обеспечения ENVI 4.7.

Картографирование выполнялось путем классификации мозаики спектрально-анализированных космических снимков Sentinel 2 пространственного разрешения 10 м по пятиэтапной схеме [Кулик, 2004]. Эти данные имеют максимальное пространственное разрешение из всех источников открытого доступа. Использовались цветосинтезированные изображения видимого диапазона (каналы 4, 3 и 2 соответственно в RGB-комPOSITE), а также с включением ближнего инфракрасного канала (каналы 8, 4 и 3 соответственно в RGB-комPOSITE). Применение композита с включением инфракрасного канала позволяет более точно выделить водные объекты (в БИК-диапазоне лежит максимум поглощения водой), а также вегетирующую растительность (в БИК-диапазоне – максимум отражения зеленой растительности, в красном – максимум поглощения). Для всех городов использовались спутниковые изображения на последнюю декаду августа 2018 г. Даты снимков подбирались с учетом сезонных особенностей динамики состояния растительного покрова засушливой зоны [Шинкаренко, Барталев, 2020]. В конце лета естественная растительность на пустырях заканчивает вегетацию, в то время как древесно-кустарниковые насаждения, газоны, культуры на орошаемых участках фотосин-

тетически активны. Таким образом, спутниковые изображения конца лета позволяют точно разделить озеленение и пустыри.

Классификация по методу максимального правдоподобия осуществлялась на основе цветового (RGB) анализа космоснимков. Каждый снимок проходил процедуру автоматизированного дешифрирования на предмет выделения на них всего четырех классов: открытые поверхности почв, запечатанные поверхности, травянистая и древесно-кустарниковая растительность и водные объекты. Предварительно была выполнена радиометрическая калибровка и коррекция атмосферных искажений с помощью утилиты SNAP для обработки данных Sentinel. На исследуемых космоснимках вручную выделялись эталонные участки для каждого из классов (водные объекты, открытые почвы и пустыри с естественной зональной растительностью, озелененные поверхности, запечатанные поверхности), после чего в программном обеспечении производился процесс классификации. Количество точек для каждого класса было не менее 30. Для определения точности проведенной классификации была составлена матрица ошибок, по которой можно судить о достоверности определения каждого класса объектов и дешифрирования в целом. Ошибкой пропуска (omission) является доля элементов какого-либо класса, которые были пропущены, т.е. не были к нему отнесены. Ошибкой присоединения (commission) является доля выделов, ошибочно отнесенных к необходимому классу. Для определения общей достоверности классификации используется коэффициент каппа – к [Foody, 1992]. Коэффициент каппа при классификации территории города и различных функциональных зон составил от 0,78 до 0,96. Расчет коэффициента каппа, а также составление матрицы ошибок производились для каждого города. Составленная матрица ошибок и значение коэффициента каппа представлены в табл. 1.

Матрица ошибок классификации, % и пиксели

Таблица 1

Matrix of classification errors, % and pixels

Table 1

Эталонные участки	Результат классификации						
	Классы				Всего, пикселей	Ошибки	
	1	2	3	4		omission	commission
Астрахань ($\kappa = 0,94$)							
1	98,91	0,00	0,00	0,00	5183	1,09	0,00
2	0,00	92,56	0,00	0,00	3849	7,44	1,77
3	0,00	0,10	98,80	2,13	1014	1,20	2,96
4	1,09	7,34	1,20	92,30	1495	7,70	24,68
Всего	100	100	100	100	11541	–	–
Элиста ($\kappa = 0,78$)							
1	92,57	0,12	24,22	13,02	687	7,43	52,84
2	3,14	96,14	5,22	3,39	6594	3,86	1,4
3	2,29	2,51	69,61	11,33	998	30,39	26,55

Эталонные участки	Результат классификации						
	Классы				Всего, пикселей	Ошибки	
	1	2	3	4		omission	commission
4	2,00	1,23	0,95	72,27	655	27,73	15,27
Всего	100	100	100	100	8934	–	–
Махачкала ($\kappa = 0,94$)							
1	99,98	0,00	0,00	0,00	10285	0,02	0,00
2	0,00	95,15	1,17	24,15	3314	4,85	7,69
3	0,00	0,00	95,45	1,81	2306	4,55	0,74
4	0,02	4,85	3,38	74,04	935	25,96	25,56
Всего	100	100	100	100	16840	–	–
Саратов ($\kappa = 0,95$)							
1	99,56	0,00	0,00	0,00	4544	0,44	0,00
2	0,00	93,40	0,00	5,90	2615	6,60	1,49
3	0,00	0,00	92,20	1,66	1373	1,80	0,80
4	0,44	6,60	1,80	92,44	838	7,56	27,09
Всего	100	100	100	100	9370	–	–
Уральск ($\kappa = 0,90$)							
1	94,84	0,00	17,88	0,41	2187	5,16	10,84
2	0,00	98,55	0,00	8,45	4271	1,45	1,45
3	2,38	0,00	79,53	2,45	1108	20,47	6,05
4	2,77	1,45	2,60	88,69	804	11,31	19,03
Всего	100	100	100	100	8370	–	–
Актау ($\kappa = 0,91$)							
1	100	0,00	0,24	0,00	2512	0,00	0,00
2	0,00	96,41	1,71	1,64	10759	3,59	0,86
3	0,00	3,59	98,05	15,11	412	1,95	2,43
4	0,00	0,00	0,00	83,25	911	16,75	44,35
Всего	100	100	100	100	14594	–	–
Волгоград ($\kappa = 0,96$)							
1	99,10	0,00	0,84	14,31	32483	0,90	0,00
2	0,00	96,29	0,00	0,00	18988	3,71	1,22
3	0,00	0,23	98,93	1,99	7180	1,07	5,08
4	0,90	3,48	0,23	83,70	1705	16,29	40,65
Всего	100	100	100	100	60356	–	–

Примечание. 1 – водные объекты; 2 – открытые поверхности почв и пустыри; 3 – травянистая и древесно-кустарниковая растительность; 4 – запечатанные поверхности.

Note: 1 – water bodies; 2 – open soil surfaces and wastelands; 3 – herbaceous and woody-shrub vegetation; 4 – sealed surfaces.

Результаты и обсуждение

Результат классификации исследуемых космоснимков городов представлен на рис. 2.

Города степной зоны. Из перечня исследуемых городов в степную зону входят Саратов, Волгоград, Элиста и Махачкала. Площадь городов сильно варьирует – от 92 до 859 км², численность населения также варьирует в широких пределах – от 100 тыс. человек до млн. Планировочная структура городов носит расчлененный характер в Саратове, линейный в Волгограде и Махачкале и компактный в Элисте. Основаны города в разное время. Четырехвековая история формирования городской территории характерна для Саратова и Волгограда. Возраст города Элиста более 150 лет (табл. 2).

Город Саратов. Саратовская агломерация разделена на две части рекой Волга, из-за чего планировочная структура носит расчлененный характер. Административно в городскую территорию входят семь районов: Волжский, Заводской, Кировский,

Ленинский, Октябрьский, Фрунзенский, а также городское поселение Энгельс. Средняя запечатанность территории города на уровне 35 % (193,21 км²). Однако для районов города характерен большой диапазон этих значений. Так, наименьшая запечатанность зафиксирована в Волжском районе (21 %). Это обусловлено, в первую очередь, большими площадями озелененных территорий (25 %), а также водных объектов (43 %). Заводской, Ленинский, а также Октябрьский районы города в составе своей территории имеют от 38 до 42 % запечатанных территорий. Площадь озелененных территорий также достаточно высока – до 30 %. Что касается открытых территорий, то в Октябрьском районе наименьший процент этой категории (5 %). Кировские и Фрунзенские районы имеют наивысшую долю экранированных земель. Так, в Кировском районе площадь этих земель составляет 47 %, во Фрунзенском – 55 %. Такой высокий процент запечатанности обусловлен высокой численностью населения (для Кировского

района), а также наличием во Фрунзенском районе больших площадей зоны деловой застройки.

Город Волгоград. Большую часть в пределах города занимают сельскохозяйственные угодья и пустыри – 59,2 % от всей площади. На долю озелененных территорий приходится 20,9 %, на застроенные – 14 % и на водные объекты – 5,9 %. Наиболее запечатанными оказались поверхности Тракторозаводского (24,2 %), Ворошиловского (33,0 %), Дзержинского (37,4 %), Центрального (45,2 %), Краснооктябрьского (39,4 %) и Красноармейского (26,6 %) районов Волгограда. Это связано, прежде всего, с тем, что в этих районах наиболее развита дорожно-транспортная сеть, сконцентрированы основные промышленные и жилые объекты, проживает большая часть населения агломерации. Почвенный покров Советского (13,5 %) и Кировского (12,9 %) районов города, вследствие малой плотности застройки и отсутствия промышленных объектов, в наименьшей степени запечатан. Отдельно стоит выделить высокую степень озеленения Кировского района г. Волгограда – 39,1 % из-за вхождения в его границы острова Сарпинский.

Город Элиста. Город подразделен на кварталы и 11 микрорайонов. Некоторые крупные части города объединяют в Западный, Восточный, Северо-Западный, Юго-Восточный и Южный жилые массивы. Доля запечатанных территорий в массивах варьирует от 13 до 35 %. Наименьшая доля фиксируется в Западном и Северном жилом массиве (13 %),

наибольшая – в Юго-Западном и Северо-Западном (26 и 35 % соответственно). На территории города фиксируется высокая доля открытых незапечатанных поверхностей (до 69 %). Обусловлено это низким озеленением районов города (>30 %). Общая площадь запечатанных территорий составляет 10 %, открытых – 75 %, озелененных участков – 15 %. Низкая доля запечатанности обусловлена социально-экономическим развитием городской территории, небольшой численностью населения, а также отсутствием крупных промышленных объектов.

Город Махачкала. Столица Республики Дагестан поделена на три района: Ленинский, Советский и Кировский. В Кировском и Советском районах города сосредоточено значительно меньше промышленных и жилых объектов, поэтому на долю запечатанных поверхностей приходится от 22 до 26 % от общей площади города. В Ленинском районе насчитывается свыше 25 крупных промышленных предприятий и запечатанность здесь составляет уже 49 %. Озеленение в Кировском и Ленинском районах слабое и занимает от 4 до 11 %. Советский район города включает в себя центральную часть города и сосредоточивает большую часть озелененных рекреационных территорий (35 %). На долю открытых пространств приходится от 39 и 47 % в Советском и Ленинском районах до 65 % в Кировском. Общая запечатанность территории города Махачкала – 31 %, на долю озелененных территорий приходится 12 % площади, на долю открытых – 56 %.

Таблица 2

Природная и социальная характеристика исследуемых городов и агломераций

Table 2

Natural and social characteristics of the studied cities and agglomerations

Город	Год основания	Население, млн чел.	Площадь, км ²	Тип планировочной структуры	Природная зона
Элиста	1865	0,10	92,3	Компактный	Степная
Махачкала	1844	0,6	468,1	Линейный	Пустынная
Саратов	1590	0,83	394	Расчлененный	Степная
Волгоград	1589	1,00	859,3	Линейный	Степная
Уральск	1584	0,23	209,8	Расчлененный	Полупустынная и степная
Астрахань	1558	0,52	208,7		Полупустынная
Актау	1961	0,19	76,5	Компактный	Пустынная

Города полупустынной зоны. В полупустынную зону входят Уральск и Астрахань. Площадь сильно варьирует – от 200 до 3 500 км², численность населения изменяется в пределах от 200 до 500 тыс. человек. Планировочная структура городов носит расчлененный характер. Основаны города в XVI и XVII вв. (табл. 2).

Город Уральск. В состав городской территории административно входит семь районов. В целом запечатанность поверхности в районах практически одинакова и варьирует от 32 до 49 %. Так, в районах

Зачаганск, Деркул и Асан плотным непроницаемым материалом покрыто от 31 до 35 % всей территории. В Желаево, Уральске, Мичуринском – от 43 до 49 %. В Уральске, как и в Элисте, на долю открытых участков приходится до 69 %. Озеленено менее 16 % площади районов. В таких районах, как Желаево и Асан, площадь, приходящаяся на древесно-кустарниковую растительность, менее 1 %.

Город Астрахань. Территория города состоит из четырех районов. Кировский и Советский районы,

несмотря на большое различие в площадных характеристиках (17,6 и 100 км² соответственно), имеют равный процент запечатанности городской территории – 60 %. Обусловлено это тем, что в этих районах сосредоточены основные промышленные, коммерческие и некоммерческие предприятия. Именно поэтому эти районы также слабо озеленены – 13 %. Остальную часть (19 % в Кировском и 27 % в Советском районе) составляют открытые пространства и пустыри.

На территории Ленинского и Трусовского районов наиболее развита дорожно-транспортная сеть, а также много зданий и сооружений образования и здравоохранения. При отсутствии крупных промышленных и торговых объектов запечатанность территории значительно ниже, чем в Кировском и Советском районах, и составляет 45 %, а озелененных территорий больше в два раза (до 28 %). На долю открытых земель приходится от 20 до 28 % территории районов. Общая доля запечатанных территорий в г. Астрахань, по данным дистанционного зондирования составляет 49 %, озелененных – 17 %, открытых – 25 %.

Города пустынной зоны. В пустынную зону входит Актау в Республике Казахстан. Площадь города 77 км², численность населения изменяется в пределах от 200 тыс. человек. Планировочная структура города носит компактный характер. Актау сравнительно молодой, основанный во второй половине XX в. (табл. 2).

Город Актау. Административное деление внутри города отсутствует, городская территория является единым пространством. В настоящее время на территории города функционирует свыше 150 промышленных и обрабатывающих предприятий, в связи с чем городское пространство запечатано до 54 %. Так как город основан сравнительно недавно и находится в пустынной зоне, озеленение развито очень слабо и составляет всего 5 % от всей территории города. В связи с этим на долю открытых (неосвоенных) земель и пустырей приходится до 40 %.

Проведенный анализ доли запечатанных, озелененных, водных и открытых территорий исследуемых городов позволил предположить наличие прямой зависимости этих показателей от плотности населения, возраста образования и природных условий каждого конкретного города (табл. 3).

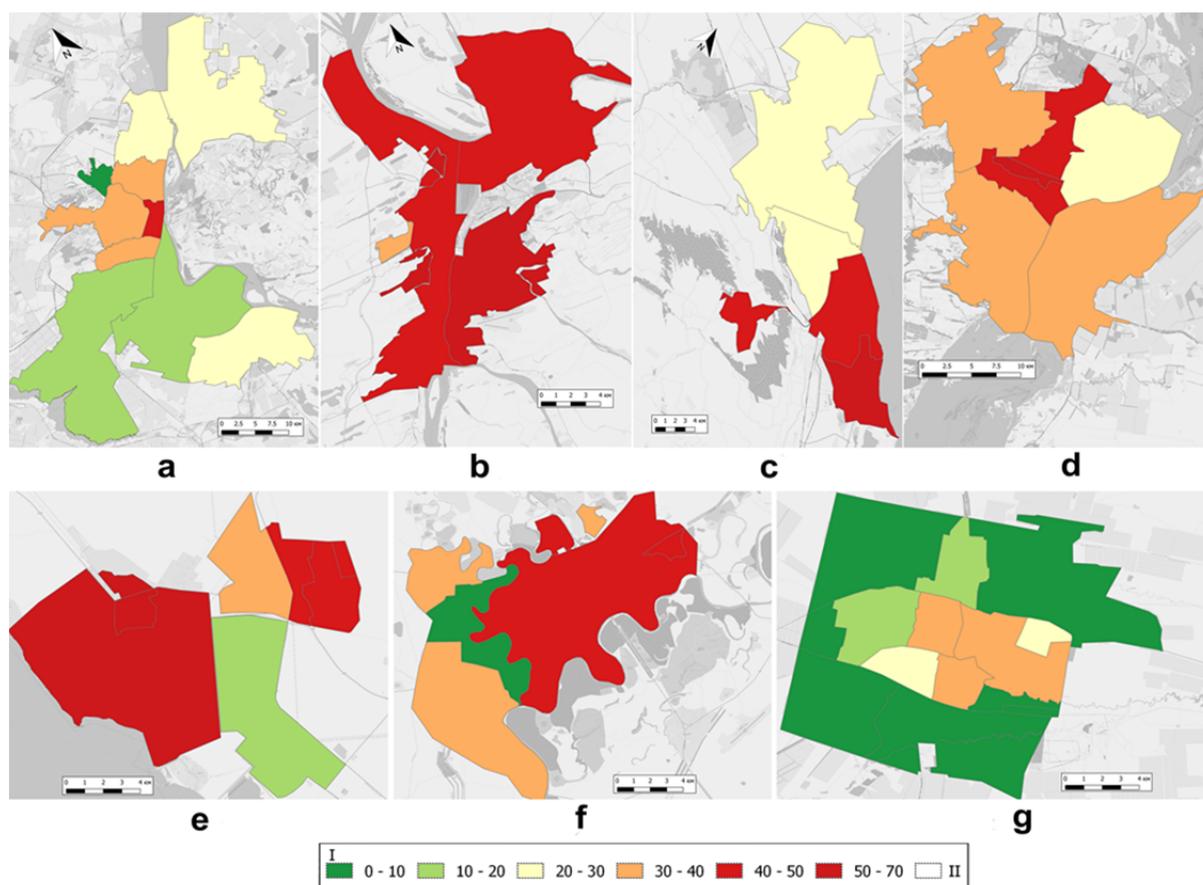


Рис. 2. Карты-схема различных долей запечатанности почвенного покрова исследуемых городов а – Волгоград; б – Астрахань; в – Махачкала; д – Саратов; е – Актау; ф – Уральск; г – Элиста

Fig. 2. Schematic map of different proportions of sealed soil cover of the studied cities а – Volgograd; б – Astrakhan; в – Makhachkala; д – Saratov; е – Aktau; ф – Uralsk; г – Elista

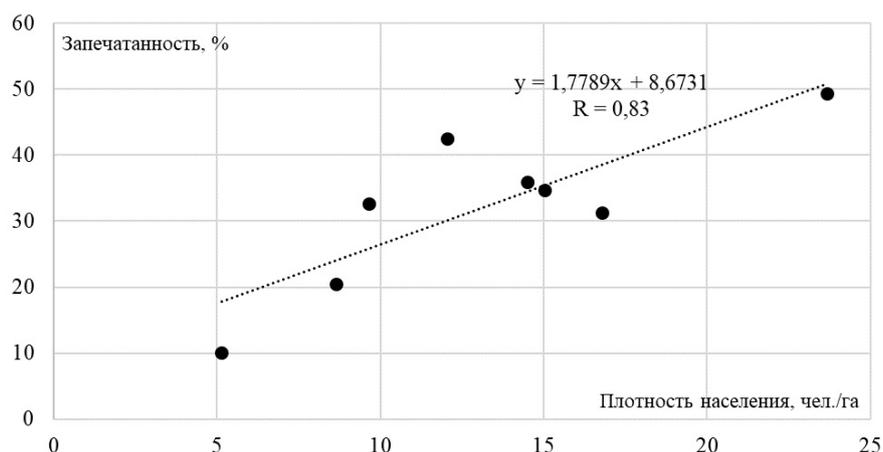


Рис. 3. Зависимость плотности населения и доли запечатанности почвенного покрова

Fig. 3. Relationship between population density and the proportion of sealed soil cover

Таблица 3

Распределение категорий земель в пределах изучаемых городов, % от площади города

Table 3

Distribution of land categories within the studied cities, % of the city area

Города	Площадь категорий земель, в % от площади города			
	1	2	3	4
Актау	1	40	5	54
Астрахань	8	25	17	49
Волгоград	7	55	17	21
Махачкала	1	56	12	31
Саратов	18	19	28	35
Уральск	9	41	15	36
Элиста	0	75	15	10

Примечание. 1 – водные объекты; 2 – открытые поверхности почв и пустыри; 3 – травянистая и древесно-кустарниковая растительность; 4 – запечатанные поверхности.

Так, города степной зоны, а именно Саратов, Волгоград и Элиста, имеют от 15 до 28 % озелененных территорий, тогда как в городах полупустынной (Уральск, Астрахань) и пустынной (Актау, Махачкала) зоны этот показатель варьирует от 3 до 12 %. Выявлена связь между плотностью населения города и долей запечатанности и открытости территории (см. рис. 3). Так, в городах Саратов, Астрахань и Актау сосредоточены основные промышленные и жилые объекты регионов, вследствие этого запечатанность городской территории изменяется от 35 до 54 %. Город Волгоград, несмотря на наличие в нем крупных объектов промышленности и развитой дорожно-транспортной сети, герметизирован всего на 21 %. Это обусловлено тем, что на его территории располагаются в основном сельскохозяйственные угодья (Советский район) и участки, не вовлеченные в процесс урбанизации (остров Сарпинский в составе Кировского района).

Полученные сведения о доле запечатанных, озелененных и открытых территорий в исследуемых

городах позволяют дать объективную картину освоения городского пространства и определить перспективные направления его развития. Эта информация в дальнейшем позволит определить зоны интенсивного прогрева территории и выделить так называемые тепловые острова.

Выводы

1. Использование спутниковых данных Sentinel 2 позволяет дешифровать запечатанные, озелененные, открытые и водные поверхности в различных природно-климатических и социально-экономических условиях исследуемых городов с ошибкой, не превышающей 20 %.

2. В результате геоинформационного анализа территории исследуемых городов установлено, что запечатанные поверхности могут занимать от 10 до 54 % площади городов.

3. Результаты дешифрирования выявили прямую зависимость уровня запечатанности, открытости и

озеленности городского пространства от плотности населения, возраста образования и природных условий конкретного города.

4. Полученные сведения о запечатанности территории исследуемых городов могут быть востребованы

для решения задач территориального планирования, при реализации работ по озеленению и благоустройству городской территории, а в дальнейшем позволять определить зоны интенсивного прогрева территории и выделить так называемые тепловые острова.

Список источников

- Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е.** Картографирование ландшафтно-геохимической структуры урбанизированной территории (на примере Москвы) // *ИнтерКарто/ИнтерГИС*. 2017. Т. 23, № 1. С. 242–255.
- Горбов С.Н., Горовцов А.В., Безуглова О.С., Вардуни Т.В., Тагвердиев С.С.** Биологическая активность запечатанных почв Ростова-на-Дону // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2016. Т. 18, № 2 (2). С. 331–336.
- Гордиенко О.А., Манаенков И.В., Холоденко А.В., Иванцова Е.А.** Картографирование и оценка степени запечатанности почв города Волгограда // *Почвоведение*. 2019. № 11. С. 1383–1392.
- Кошелева О.Ю.** Оценка запечатанности почвенного покрова города Волгограда // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2019. № 1. С. 12–18.
- Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.** Суточная и сезонная динамика температуры поверхности города Волгограда // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2021. № 1. С. 14–24.
- Кулик К.Н.** Агроресурсоориентированное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград : ВНИИАЛМИ, 2004. 247 с.
- Мохамед Е.С., Билял А., Шалабай А.** Оценка потерь плодородных почв в результате запечатывания по данным дистанционного зондирования и геоинформационных систем // *Почвоведение*. 2015. № 10. С. 1277.
- Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.** Эколого-геохимическая оценка состояния запечатанных почв восточной Москвы // *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. С. 480–509.
- Почва, город, экология / под ред. Г.В. Добровольского.** М., 1997. 320 с.
- Прокофьева Т.В.** Городские почвы, запечатанные дорожными покрытиями (на примере Москвы) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М. : МГУ им. М.В. Ломоносова, 1998. 24 с.
- Савин И.Ю.** Картографирование экраноземов Московской агломерации по спутниковым данным Landsat // *Исследование земли из космоса*. 2013. № 5. С. 55–61.
- Синцов А.В., Шарова И.С., Ивенская Д.И.** Изменение почвенного покрова города Астрахани под воздействием техногенных факторов городской инфраструктуры // *Экология России: на пути к инновациям*. 2013. № 8. С. 76–79.
- Хайбрахманов Т.С., Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е.** Картографическое обеспечение эколого-геохимической оценки запечатанных почв на урбанизированных территориях // *ИнтерКарто/ИнтерГИС*. 2017. Т. 23, № 1. С. 256–266.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.** Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 4. С. 179–194. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194
- Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.** Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 5. С. 125–141.
- Barbero-Sierra C., Marques M.J., Ruiz-Pérez M.** The case of urban sprawl in Spain as an active and irreversible driving force for desertification // *Journal of Arid Environments*. 2013. No. 90. P. 95–102.
- Charzyński P., Plak A., Hanaka A.** Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No. 24. P. 4801–4811.
- Cortijo A.A., González M.E.P.** Soil sealing in Madrid (Spain), study case of Colmenar Viejo // *Earth Sci. Res*. 2017. V. 21, No. 3. P. 111–116.
- Foody G.M.** Classification accuracy assessment: some alternatives to the kappa coefficient for Nominal and ordinal level classifications // *Remote sensing from research to operation: proceedings of the 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society*. Nottingham, 1992.
- García P., Pérez E.** Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain) // *Geoderma*. 2016a. V. 268. P. 100–107.
- García P., Pérez E.** Monitoring Soil Sealing in Guadarrama River Basin, Spain, and Its Potential Impact in Agricultural Areas // *Agriculture*. 2016b. No. 6. P. 1–11.
- IUSS Working Group** World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps // *World Soil Resources Reports*. No. 106. FAO, Rome. 192 p.
- Kopecká M., Rosina K.** Soil Sealing Assessment in the Town Trnava // *Geographical Information*. 2012. No. 16. P. 192–203.
- Nakayama T., Watanabe M., KazuNori T., Morioka T.** Effect of underground urban structures on eutrophic coastal environments // *Science of Total Environment*. 2007. No. 373. P. 270–288.
- Piotrowska-Długosz A., Charzyński P.** The impact of soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physicochemical properties in the Ekranic Technosols of Toru. (Poland) // *Soils and Sediments*. 2014. No. 15. P. 47–59.
- Salvati L.** The Spatial Pattern of Soil Sealing along the Urban-Rural Gradient in a Mediterranean Region // *Journal of Environmental Planning and Management*. 2014. No. 57. P. 848–861.
- Salvati L., Carlucci M.** The way towards land consumption: soil sealing and polycentric development in Barcelona // *Urban Studies*. 2016. No. 53 (2). P. 418–440.
- Scalenghe R., Ajmone Marsan F.** The anthropogenic sealing of soils in urban areas // *Landscape and Urban Planning*. 2009. No. 90. P. 1–10.

Tikhonova A., Polovinkina Yu., Gordienko O., Manaenkov I. Features of Monitoring Heavy Metals in Soil Cover of Urban Environment // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Anthropogenic Transformation of Geospace: Nature, EcoNomy, Society». 2020. P. 286–291

Tobias S. Preserving ecosystem services in urban regions: Challenges for planning and best practice examples from Switzerland // Integrated Environmental Assessment and Management. 2013. No. 9 (2). P. 243–251

Tombolini L., Munafò M., Salvati L. Soil sealing footprint as an indicator of dispersed urban growth: a multivariate statistics approach // Urban Research & Practice. 2015. Is. 1. P. 1–15.

Toth G. Impact of land-take on the land resource base for crop production in the European Union // Science of the Total Environment. 2012. No. 435. P. 202–214.

Xiao R., Su S., Zhang Z., Qi J., Jiang D., Wu J. Dynamics of Soil Sealing and Soil Landscape Patterns under Rapid Urbanization // Catena. 2013. No. 109. P. 1–12.

References

Vlasov D.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. *Kartografirovaniye landshaftno-geokhimicheskoy struktury urbanizirovannoy territorii (na primere Moskvy)* [Mapping of landscape and geochemical structure of urban territory (Moscow case study)] // InterCarto/InterGIS. 2017. No. 23. pp. 242–255. In Russian

Gorbov S.N., Gorovcov A.V., Bezuglova O.S., Varduni T.V., Tagiverdiev S.S. *Biologicheskaya aktivnost' zapechatannykh pochv Rostova-na-Donu* [The biological activity of sealed soils in Rostov-on-Don city] // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. No. 2. pp. 331–336. In Russian

Gordienko O.A., Manaenkov I.V., Kholodenko A.V., Ivancova E.A. *Kartografirovanie i ocenka stepeni zapechatannosti pochv goroda Volgograda* [Mapping and Assessment of Sealing Rate of Soils in the City of Volgograd] // Pochvovedenie [Pedology]. 2019. No. 11. pp. 1383–1392. In Russian

Kosheleva O.Yu. *Ocenka zapechatannosti pochvennogo pokrova goroda Volgograda* [Evaluation of the sealed soil cover in the Volgograd city] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia. 2019. No. 1. pp. 12–18. In Russian

Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S. *Sutochnaya i sezonnaya dinamika temperatury poverhnosti goroda Volgograda* [Daily and Seasonal Dynamics of Surface Temperature in the Volgograd City] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia. 2021. No. 1. pp. 14–24. In Russian

Kulik K.N. *Agrolesomeliorativnoye kartografirovaniye i fitoekologicheskaya otsenka aridnykh landshaftov* [Agroforestry mapping and phytoecological assessment of arid landscapes]. Volgograd: VNIALMI, 2004. 247 p. In Russian

Mohamed E.S., Belal A., Shalaby A. *Ocenka poter' plodorodnykh pochv v rezul'tate zapechatyvaniya po dan-nym distancionNogo zondirovaniya i geoinformacionnykh sistem* [Impacts of soil sealing on potential agriculture in Egypt using remote sensing and GIS techniques] // Pochvovedenie [Pedology]. 2015. No. 10. pp. 1277. In Russian

Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Hajbrahmanov T.S. *Ekologo-geokhimicheskaya ocenka sostoyaniya zapechatannykh pochv vostochnoy Moskvy* [Environmental and geochemical assessment of sealed soils in the eastern Moscow] // Vestnik RUDN. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2017. pp. 480–509. In Russian

Pochva, gorod, ekologiya [Soil, City, and Ecology] Ed. by G. V. Dobrovol'skii, Moscow. 1997. In Russian

Prokofeva T.V. *Gorodskie pochvy, zapechatannye dorozhnyimi pokry-tiyami (na primere Moskvy) dis. ... kand. biol. nauk* [Urban soils sealed by road surfaces (the example of Moscow)]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 1988. In Russian

Savin I.Yu. *Kartografirovaniye ekranozemov Moskovskoy aglomeratsii po sputnikovym dannym Landsat* [Mapping of sealed soils of Moscow agglomeration according to Landsat satellite data] // *Issledovanie zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space]. 2013. No. 5. pp. 55–61. In Russian

Sincov A.V., Sharova I.S., Ivenskaya D.I. *Izmeneniye pochvennogo pokrova goroda Astrakhani pod vozdeystviyem tekhnogennykh faktorov gorodskoy infrastruktury* [Change of soil city of astrakhan under the influence of technological factors of urban infrastructure] // *Ekologiya Rossii: na puti k innovatsiyam* [Ecology of Russia: on the way to innovation]. 2013. № 8. pp. 76–79. In Russian

Khaibrakhmanov T.S., Nikiforova E.M., Kosheleva N.E. *Kartograficheskoye obespecheniye ekologo-geokhimicheskoy otsenki zapechatannykh pochv na urbanizirovannykh territoriyakh* [Cartographic support of environmental and geochemical evaluation of sealed soils on urbanized territories] // InterCarto/InterGIS. 2017. No. 23. pp. 256–266. In Russian

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. *Sezonnaya dinamika NDVI pastbishchnykh landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym MODIS* [NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes according to MODIS data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2020. V. 17. No. 4. pp. 179–194. In Russian

Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S. *Analiz vliyaniya zapechatannosti pochvennogo pokrova i ozeleneniya na pole temperatur Volgogradskoy aglomeratsii po dannym MODIS* [Analysis of the effect of soil sealing and landscaping on the thermal field of the Volgograd agglomeration from MODIS data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2020. No. 5. pp. 125–141. In Russian

Barbero-Sierra C., Marques M.J., Ruiz-Pérez M. The case of urban sprawl in Spain as an active and irreversible driving force for desertification. *Journal of Arid Environments*. 2013. No. 90. pp. 95–102.

Charzyński P., Plak A., Hanaka A. Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No. 24. pp. 4801–4811.

Cortijo A.A., González M.E.P. Soil sealing in Madrid (Spain), study case of Colmenar Viejo // *Earth Sci. Res*. 2017. No. 3. pp. 111–116.

Foody G.M. Classification accuracy assessment: some alternatives to the kappa coefficient for Nominal and ordinal level classifications // *Remote sensing from research to operation: proceedings of the 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society*. 1992. Nottingham.

García P., Pérez E. Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain) // *Geoderma*. 2016a. V. 268. pp. 100–107.

- García P., Pérez E. Monitoring Soil Sealing in Guadarrama River Basin, Spain, and Its Potential Impact in Agricultural Areas // Agriculture. 2016b. No. 6. pp. 1–11.
- IUSS Working Group World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome. 192 p.
- Kopecká M., Rosina K. Soil Sealing Assessment in the Town Trnava // Geographical Information. 2012. No. 16. pp. 192–203.
- Nakayama T., Watanabe M., Kazunori T., Morioka T. Effect of underground urban structures on eutrophic coastal environments // Science of Total Environment. 2007. No. 373. pp. 270–288.
- Piotrowska-Długosz A., Charzyński P. The impact of soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physiochemical properties in the Ekranic Technosols of Toru. (Poland) // Soils and Sediments. 2014. No. 15. pp. 47–59.
- Salvati L. The Spatial Pattern of Soil Sealing along the Urban-Rural Gradient in a Mediterranean Region // Journal of Environmental Planning and Management. 2014. No. 57. pp. 848–861.
- Salvati L., Carlucci M. The way towards land consumption: soil sealing and polycentric development in Barcelona // Urban Studies. 2016. No. 53(2). pp. 418–440.
- Scalenghe R., Ajmone Marsan F. The anthropogenic sealing of soils in urban areas // Landscape and Urban Planning. 2009. No. 90. pp. 1–10.
- Tikhonova A., Polovinkina Yu., Gordienko O., Manaenkov I. Features of Monitoring Heavy Metals in Soil Cover of Urban Environment // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Anthropogenic Transformation of Geospace: Nature, Economy, Society». 2020. pp. 286–291.
- Tobias S. Preserving ecosystem services in urban regions: Challenges for planning and best practice examples from Switzerland // Integrated Environmental Assessment and Management, 2013. No. 9(2). pp. 243–251.
- Tombolini I., Munafò M., Salvati L. Soil sealing footprint as an indicator of dispersed urban growth: a multivariate statistics approach // Urban Research & Practice. 2015. Iss. 1. pp. 1–15.
- Toth G. Impact of land-take on the land resource base for crop production in the European Union // Science of the Total Environment. 2012, No. 435. pp. 202–214.
- Xiao R., Su S., Zhang Z., Qi J., Jiang D., Wu J. Dynamics of Soil Sealing and Soil Landscape Patterns under Rapid Urbanization // Catena. 2013. No. 109. pp. 1–12.

Информация об авторах:

Гордиенко О.А., младший научный сотрудник, лаборатория защиты почв от эрозии, ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоград, Россия; ассистент кафедры экологии и природопользования Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия.

E-mail: oleg.gordienko.95@bk.ru

Шинкаренко С.С., кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, лаборатория геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов, ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоград, Россия.

E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

Кошелева О.Ю., кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов, ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоград, Россия.

E-mail: olya_ber@mail

Дубачева А.А., магистрант, кафедра географии и картографии, Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия.

E-mail: dubatcheva.a@gmail.com

Омаров Р.С., аспирант, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: st098989@student.spbu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Gordienko O.A., Junior Researcher, Laboratory of erosion control, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia; Assistant of the Department of Ecology and Nature Management, Volgograd State University, Volgograd, Russia.

E-mail: oleg.gordienko.95@bk.ru

Shinkarenko S.S., Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

Kosheleva O.Yu., Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Laboratory of geoinformation modelling and agroforest landscapes mapping, Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia.

E-mail: olya_ber@mail

Dubacheva A.A., Master, Department of Geography and Cartography, Volgograd State University, Volgograd, Russia.

E-mail: dubatcheva.a@gmail.com

Omarov R.S., Graduate student, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia.

E-mail: st098989@student.spbu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.07.2021; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 23.07.2021; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 13.03.2023

Научная статья
УДК 551.4.01:168
doi: 10.17223/25421379/26/6

СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ТАКСОНОВ ИНДУКТИВНОЙ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Владимир Николаевич Невский¹



¹ Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия, nevsky@tigdvo.ru

Аннотация. Организация планетарного рельефа может быть представлена в виде иерархической схемы, сформированной индуктивным способом с использованием трех специальных правил. В схеме присутствуют три восходящие от таксонов 1-го ранга к таксонам 6-го ранга линии – базисные, склоновые и вершинные поверхности. Таксоны низшего ранга – геоморфологические фации; таксоны высшего ранга – формы субконтинентального уровня. Переход от низших к высокоранговым таксонам отражает специфику рельефообразующих процессов. Тектонический фактор становится актуальным, как правило, только с 4-го ранга. Однозначной корреляции процесса и ранга не существует. Приведены примеры индуктивного «конструирования» высокоранговых геоморфологических таксонов в разных районах Евразии. Индуктивные классификации способны внести упорядоченность в наши представления о структуре рельефа и формирующих его процессах.

Ключевые слова: геоморфологическая классификация, иерархическая схема, ранг, индуктивный метод, геоморфологический таксон

Для цитирования: Невский В.Н. Схема формирования таксонов индуктивной геоморфологической классификации // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 79–87. doi: 10.17223/25421379/26/6

Original article
doi: 10.17223/25421379/26/6

SCHEME OF CONSTRUCTION OF GEOMORPHOLOGICAL INDUCTIVE CLASSIFICATION'S TAXA

Vladimir N. Nevsky¹

¹ Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, nevsky@tigdvo.ru

Abstract. The organization of the planetary relief can be represented in the form of a hierarchical scheme formed by an inductive method using three rules – the morphological integrity of the taxon, the unifying function (function of origin) and the minimum sufficiency. The scheme contains three unequal lines ascending from taxa of the first, lowest rank to taxa of the sixth rank – base, slope and top mount (summit) surfaces lines. Taxa of the lowest rank are geomorphological facies defined by two formally independent attributes reflecting the shape of the elementary surface and the "quality" of this surface (slope deposits, weathering crusts, etc.). Taxa of the highest rank are the largest forms of the continental or subcontinental level, where the form attributes is already, in fact, the only one. The first, "contour", inductive scheme-classification was created on the example of the mountainous country of Sikhote-Alin. Taxa of ranks 1 and 2 are landforms. Taxa of 3–4 ranks can be represented both (or) as forms and (or) as types of relief. Taxa of rank 5 and 6 are again landforms, although in some cases taxa of rank 5 can also be interpreted as types of relief. The transition from taxa of lower ranks to high-ranking taxa reflects the specifics of relief-forming processes. Taxa of lower ranks owe their status to exogenous geomorphological processes at different levels of generalization. The tectonic factor becomes relevant, as a rule, only from the fourth rank, in more rare cases - from the third or fifth. There is no simple correlation between process and rank. It is noted that the method of inductive classification is able to smooth out the subjectivity of researchers in determining the ranks of certain geomorphological objects. Thanks to this property the objects of the continental level will necessarily have the sixth rank along any line of "construction". The paper provides examples of inductive "construction" of high-ranking geomorphological taxa in different regions of Eurasia – Sikhote-Alin, the mountain system between Baikal Lake and Pacific Ocean, Tibet, Tarim depression. Inductive classifications, constructed according to strict rules, are able to bring order to our ideas about the structure of the relief and the processes that form it. To increase the reliability of inductive construction and create a general inductive geomorphological classification, it is necessary to develop at least one alternative morphoclimatic branch (preferably outside the temperate zone) according to the same rules as for Sikhote-Alin.

Keywords: inductive geomorphological classification, geomorphological rank, taxon

For citation: Nevsky V.N. (2023) Scheme of construction of geomorphological inductive classification's taxa. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. 79–87. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/6

Введение

Некоторые исследователи считают, что современная геоморфология превращается в преимущественно прикладную науку, обслуживающую интересы геологии и, в последние годы, даже социальных наук [Sherman, 1996; Church, 2010; Невский 2015]. Задачи, решаемые ею, уже не требуют обязательно таких теоретических основ, как закон (достаточно правил и статистических закономерностей), системная иерархия (можно использовать любой алгоритм для деления «больших» на «меньшие»), ранг. Более того, в самой основе теоретического осмысления строения и развития рельефа стал проявляться феноменологический принцип – признание уникальности геоморфологического объекта.

В минувшее столетие геоморфологи не смогли сформировать общепринятого представления об иерархичности геоморфологических систем. Геоморфология, по мнению Д.А. Тимофеева [Проблемы..., 1988], чуть ли не с момента своего становления стала преимущественно объяснительной наукой, и внятные алгоритмы определения структурных единиц так и не были созданы, поскольку в них не было нужды.

В оправдание геоморфологов следует заметить, что попытки систематизации собственного «строительного» материала предпринимались многократно. Были интересные работы по теории геоморфологических систем А.Д. Арманда, Д.А. Тимофеева, О.В. Кашменской, Ю.Г. Симонова, Э.А. Лихачёвой и ряда других исследователей, однако они не стали в подлинном смысле системными. Было создано множество иерархических классификаций и классификационных схем, в основной своей массе морфологических или морфогенетических с разным количеством (до 12) таксономических уровней. Как правило, они строились по дедуктивному принципу – делению общих (крупных) категорий на вложенные. С противоположных позиций, т.е. с определения наименьших структурных единиц рельефа, подошли к проблеме А.Н. Ласточкин и его коллеги из Санкт-Петербурга, опубликовав ряд фундаментальных работ. В основу этих построений они положили элементарные геометрические (геометрически однородные) формы и их сочетания. Однако такая конструкция оказалась утяжеленной и лишь формально иерархической [Ласточкин, 2002; Lastochkin et al., 2018]. Более того, А.Н. Ласточкин прямо отмечал безуспешность всех попыток соотнесения между собой самых разных геоявлений по таксономическому принципу [Ласточкин, 2002]. Данное заявление, несомненно, отражает то, что есть, но оно лишь констатация факта, а не вердикт на будущее. В зна-

чительной степени по этой причине в геоморфологии широкое практическое применение нашли только генетические классификации (например, С.С. Воскресенского [Воскресенский, 1971]) с минимальным количеством иерархических уровней, поскольку они, во-первых, проще устроены и, во-вторых, более удобны для исполнения все той же объяснительной функции.

Современные западные геоморфологи тоже не проявляли большого интереса к данному аспекту. После фундаментальных работ 1950–1970-х гг. О. Энгельна, М. Климашевского, Ж. Трикара, А. Кайё и еще нескольких специалистов геоморфологические классификации стали терять универсальность. С появлением цифровых моделей рельефа и большого объема спутниковой информации пришло время классификационных схем и легенд, рассчитанных на решение конкретных прагматических задач. Однако есть редкие исключения, когда авторы стремились приблизить свои легенды к классификациям. В частности, в передовых геоморфологических и географических журналах иногда появляются статьи, где авторы представляют свое видение иерархической организации локального рельефа по какой-либо одной генетической линии (например, флювиальной [Wheaton et al., 2015]), или локального рельефа в целом (в виде субординированной генетической легенды) [De Jong et al., 2021], или иерархического геометрического (морфологического) районирования, которое может быть проведено с помощью современных технологий [Minag, Evans, 2008]. Поскольку такие работы ориентированы, как правило, на картографирование, то создание классификаций не было для авторов первоочередной задачей, хотя методические аспекты, конечно, ими затрагивались. Проблема композиции структурных единиц при выстраивании иерархической классификации «снизу вверх» до сих пор не нашла решения.

«Конструирование» высокорангового геоморфологического таксона «Сихотэ-Алинь» и принципиальная схема общей индуктивной геоморфологической классификации

Ранее была создана региональная индуктивная морфогенетическая классификация применительно к югу Дальневосточного региона России [Невский, 2003]. Она, разумеется, неполная, так как процесс заполнения всех пустот в индуктивных классификациях – длительный и трудоемкий. Классификация основывается на наименьшей, неделимой (в геоморфологическом смысле) типологической структурной единице – геоморфологической фации. В основу фундаментальных признаков склоновой геоморфо-

логической фации было положено многомодальное вероятностное распределение крутизны так называемых элементарных склонов (впоследствии – склоновых фаций) и анализ склоновых отложений [Невский, 2003]. Методологическая основа классифицирования – бинарная система существенных признаков, которые, по мере повышения уровня иерархии, модифицируются, но сохраняют при этом некую семантическую преемственность. Первый признак отражает крутизну или другие характеристики, связанные с крутизной, второй – качественные характеристики рыхлого чехла (склоновых отложений или коры выветривания). Региональная классификация оказалась принципиально пригодной и для других регионов России. В частности, модальные значения 20°, 28° и 38° крутизны элементарных склонов (склоновых фаций) были отмечены в семигумидных низкогорьях Южного Урала и Крыма. Для создания действенной общей индуктивной классификации необходимо дополнение имеющейся региональной классификации на базе принципиально иных морфоклиматических условий в виде альтернативных морфоклиматических ветвей. Поскольку эта затея пока проблематична для исполнения, то были осуществлены пробные индуктивные «сборки» высокоранговых таксонов в разных климатических условиях с использованием неполного набора признаков, что стало возможным благодаря большому количеству доступных в Интернете фотоматериалов и карт. Одновременно была предложена принципиальная схема общей классификации на базе уже исследованной территории.

Первый практический пример индуктивной «сборки» высокорангового таксона – горная страна Сихотэ-Алинь, с которой, собственно, и начиналась работа по определению наименьших структурных единиц рельефа и способов их композиции. Взяв за основу любую группу геоморфологических фаций любого географического объекта (днища долины, склона хребта и т.д.), мы можем конструировать новые таксоны с последовательным повышением их ранга. Для этого применяются правила «морфологической целостности таксона», «объединительной функции» (функции происхождения, объединительного фактора) и «минимальной достаточности» [Невский, 2009].

Таксоны второго ранга в этом регионе формируются, как правило, на основе функции, описывающей поведение локального базиса денудации. Для таксонов третьего ранга доминирующая функция – тоже базис денудации, только не локальный, а местный или общий. На уровне 4-го ранга роль объединительной функции играет уже, как правило, тектоника, так как формализация базисного фактора ста-

новится сложной и многовариантной, не выдерживающей «конкуренции» с более простой кинематической закономерностью конкретного тектонического процесса. Здесь мы имеем дело уже с другим масштабом времени. То же можно сказать и в отношении конструирования таксонов 5-го ранга – только в этом случае в качестве объединительной функции мы должны применить более сложную кинематическую закономерность со сглаживанием временных эксцессов и с большим временем действия. Вариантов индуктивной сборки высокорангового таксона «горная страна Сихотэ-Алинь» несколько, потому что они имеют разные «исходные позиции». Ниже представлен наиболее очевидный вариант, где исходной позицией сборки является склоновая геоморфологическая фация в пределах низкогорного (эрозионно-денудационного) типа рельефа, расположенная выше русла водотока 2-го или 3-го порядков.

Таксоном 2-го ранга в данном случае с наибольшей вероятностью должен стать эрозионно-денудационный (полигенетический) склон, опирающийся на однородный, с точки зрения морфодинамики, участок русла или поймы. Однородность (т.е. как раз та самая «объединительная функция») здесь означает, прежде всего, некоторую плановую стабильность, например прижим к правому или левому борту долины на протяжении отрезка времени, достаточного для формирования профиля склона, существенно отличающегося от какого-нибудь соседнего (выше или ниже по течению). Периодическое блуждание русла в пределах поймы тоже означает некоторую плановую однородность. У некоего «соседнего», тоже однородного участка русла формируется другой профиль эрозионно-денудационного склона, с другим набором фаций и порядком их следования от русла (поймы) до приводораздельных поверхностей.

Для формирования таксона 3-го ранга требуется новая объединительная функция более общего порядка, чем локальная стабилизация положения русла. Такой функцией может стать гидрологический режим реки (водотока), формирующий долинный ландшафт. Подобный ландшафт уже с полным основанием можно назвать типом рельефа. Например, водотоки 2–3-го порядков в низкогорье Сихотэ-Алиня, которые являются притоками одного водотока 4-го порядка, формируют практически однородный геоморфологический ландшафт. Он отличается преобладанием определенных геоморфологических фаций (или склонов определенного интервала крутизны) и некоей композиционной логикой, связывающей эти фации, которая, разумеется, не всегда очевидна и которую трудно формализовать. Может ли таксоном 3-го ранга стать крупная положительная

форма? – Гора, несомненно, да, но вот горный хребет – уже проблематично. Одиночная островная гора типа Улуру (Айерс Рок) в Австралии – пример «классического» таксона 3-го ранга склоновой линии. В пределах того же Сихотэ-Алиня обособленные массивы с относительными высотами 100–300 м и характерными размерами порядка 1–2 км, ограниченные с двух сторон двумя притоками одной реки, – тоже пример морфологически проявленного таксона 3-го ранга. Производя индуктивную сборку, мы не всегда знаем наперед, какую форму мы получим на уровне 3-го ранга. В одной ситуации мы получаем «морфологически целостный» однородный геоморфологический ландшафт, т.е. тип рельефа, который может быть одновременно макросклоном хребта или частью макросклона, в другой ситуации – обособленную положительную или отрицательную форму рельефа – отдельный островной массив, горный отрог, расширенное днище долины. Но при любом порядке сборки, т.е. начиная с любых фаций, таксоном 4-го ранга в пределах горной страны Сихотэ-Алинь будет горный хребет или равноценное (в том числе по площади) межгорное понижение. Соответственно сама горная система Сихотэ-Алинь протяженностью 1 200 км и шириной до 250 км с десятками составляющих ее хребтов и отдельных горных массивов будет представлять собой таксон 5-го ранга. Равноценный по рангу таксон, ограничивающий Сихотэ-Алинь с запада, – обширная низменность, включающая, в частности, долину р. Уссури и впадину оз. Ханка и соответствующая крупной тектонической структуре. Как видно, тектонический фактор, как объединительная функция, актуализируется в данных примерах с 4-го уровня.

Следует отметить, что в описанном выше процессе индуктивной сборки участвуют также и интенсивные признаки, характеризующие механический состав рыхлого склонового чехла или коры выветривания. (Днища долин в этом аспекте не рассматривались.) Например, для таксонов 3-го ранга такой объединительной функцией могут быть следующие категории: склоновые отложения определенного генезиса, соответствующие определенному климатическому режиму, флювиальные отложения с преобладанием того или иного материала, склоновые и флювиальные отложения, характерные для низкогорья умеренного пояса с определенным режимом выпадения осадков. Однако понятно, что эти признаки уже далеки от «первичных». Также понятно, что эти признаки, игравшие важнейшую роль при определении геоморфологических фаций, в процессе индуктивной сборки таксонов утрачивают свою смысловую ценность по мере повышения ранга, и уже с 3-го уровня эти первичные признаки при-

ходится заменять обобщенными генетическими категориями и (или) вообще отдать безоговорочное предпочтение признакам «формы».

Если к представленной выше региональной схеме добавить еще один, вышестоящий, уровень, куда, на правах составляющего таксона, войдет Сихотэ-Алинь, то получится принципиальная схема общей индуктивной классификации (рис. 1). Такую классификационную схему можно назвать морфогенетической или, вернее, морфологической в пределах одного крупного морфоклиматического подразделения, обладающего собственным «набором» геоморфологических фаций. (Опыт работы с определением признаков геоморфологических таксонов показывает, что наиболее адекватной является морфоклиматическая схема А.Г. Черняховского [Черняховский, 1980].)

В классификационной схеме выделены три «линии» – базисных, склоновых и вершинных поверхностей [Невский, 2016]. Для предметного иллюстрирования каждая таксономическая категория, начиная со 2-го ранга, получила свое название по наиболее характерным примерам – «горная страна», «плато» и т.д. Стрелки указывают на порядок включения нижестоящего таксона в вышестоящий таксон в процессе конструирования последнего. Диагональные стрелки одновременно отражают ограничения для структурных единиц нижних рангов при формировании высокоранговых единиц. Так, например, фации (1-й ранг) базисных поверхностей могут участвовать в формировании таксона 3-го ранга вершинных поверхностей, а таксоны базисных поверхностей 2-го ранга – уже нет. Зато таксоны склоновой линии могут включать в себя таксоны близлежащего нижнего уровня как справа, так и слева.

В пользу обоснованности шестиуровневой (или семиуровневой, если принять в качестве высшего таксона рельеф Земли) косвенно свидетельствуют дедуктивно сформированные представления Ю.Г. Симонова о шестиуровневой организации планетарного рельефа [Симонов, 2005] и Ж. Трикара [Tricart, 1965], который выделил семь уровней (не считая микроформ).

Разумеется, сама логика «индуктивного конструирования» может вызвать определенные сомнения в смысле объективности данного процесса. Это неизбежно и естественно. Но сомнительная объективность не может считаться пороком методики хотя бы потому, что она обладает своего рода «внутренней» индуктивной логикой, позволяющей нивелировать возможные несурезицы. Осуществляя индуктивную сборку высокоранговых таксонов по разным линиям и начиная этот процесс с разных фаций, мы получим в конечном результате один и тот же результат.



Рис. 1. Схема индуктивного формирования таксонов геоморфологической классификации

Fig. 1. Principal scheme of inductive forming of geomorphological classification taxa

Если мы сможем таким образом уменьшить долю субъективизма (представления Ю.Г. Симонова и Ж. Трикара позволяют надеяться на это), то таксоны классификации станут удобным инструментом картографирования. Крупномасштабные карты (1 : 25 000) некоторых участков Южного Приморья на основе геоморфологических фаций смогли предоставить емкую и «образную» информацию о геоморфологическом строении, качественно отличающуюся от информации традиционных генетических карт [Невский, 2003]. В этих картах присутствуют и морфология («визуализация» форм), и, прямо или опосредованно, генезис. Что касается таксонов более высоких рангов, то легенды, построенные на их основе, приобретают некоторую тяжеловесность благодаря многокомпонентности, свойственной синтетическим легендам. Самое интересное при картографировании таксонов 2-го и 3-го рангов – возможное присутствие на одном иерархическом уровне категорий, которые мы традиционно именуем формами рельефа и типами рельефа. Это, конечно, уже проблемный аспект. Впрочем, проблемы унификации и сведения таких таксонов к некоей норме в

данном случае разрешимы. Морфологическая образность картографируемых единиц достигается на всех уровнях.

Примеры конструирования высокоранговых геоморфологических таксонов

Для проверки принципиальной работоспособности предложенной схемы выбрано несколько районов с большим количеством доступных в Интернете карт и фотоматериалов (в основном, Google Earth). Следует повторить, что индуктивное построение ветвей в данных примерах осуществляется на основании только признаков формы, без учета строения рыхлых отложений; и такое конструирование нельзя считать абсолютно корректным. Это замечание важно. Если, например, для низкогогорья Южного Урала и Крыма соблюдается в целом принцип идентификации склоновых фаций, основанный на многомодальности вероятностного распределения крутизны [Невский, 2003] (т.е. они, скорее всего, находятся в одном крупном морфоклиматическом подразделении), то на территориях с другими типами климата

возможна несколько иная или даже принципиально иная картина.

Пример 1. Горы Забайкалья.

Если взять в качестве начала отсчета склоновую фациальную линию, то будет в точности воспроизведен описанный выше алгоритм для определения ранга горной страны Сихотэ-Алинь. Но поскольку выбор начальной фации никак не должен влиять на конечный итог, то представляется целесообразным «просчитать» другие фациальные линии.

В Восточной Сибири есть немало интересных геоморфологических объектов; один из самых интересных – Чарская котловина на севере Забайкальского края.

Ранг Чарской котловины и прочих таксонов данной линии может быть «обсчитан» на основе фации базисных поверхностей, например русловой. Водотоки, протекающие по котловине (Ср. Саукан, Верх. Саукан), имеют достаточно хорошо выраженные элементы долин. Согласно правилам индуктивной сборки, долины таких рек в пределах данной котловины будут иметь третий ранг: русловая фация (1) – участок днища речной долины с определенным положением русла в течение времени, достаточного для формирования закономерной комбинации фаций базисных поверхностей и разделяющих их склоновых фаций (уступов) в системе поперечного профиля долины (2) – долина в пределах конкретной вмещающей формы, в данном случае котловины, с закономерным набором склоновых фаций, отграничивающих днище долины от водораздельных пространств (3). Итог для Чарской котловины – 4-й ранг. Вышестоящий таксон 5-го ранга – обширный среднегорный массив, включающий и вмещающий Чарскую котловину – это древняя мегаформа рельефа, обновленная позднекайнозойской тектоникой. В данной интерпретации весь этот среднегорный массив, включающий более десяти хребтов Забайкалья, равновелик и равноценен по рангу горной стране Сихотэ-Алинь. На тектонических картах России и СССР этот огромный массив от Байкала до Охотского моря определен как архейско-протерозойские складчатые комплексы и складчатые основания платформ.

В Чарской котловине известен уникальный природный объект – «Чарские пески» (площадь около 30 км²), представляющий собой песчаный ландшафт с хорошо развитыми дюнами и даже барханами. В настоящее время это типичный эоловый ландшафт, возникший на месте скопления большого количества флювиогляциальных отложений. Он граничит с типичным для Восточной Сибири равнинным таежным ландшафтом с разреженным листовидным лесом и значительными заболоченными

территориями. Такой ландшафт и с географической, и с геоморфологической точки зрения можно назвать интразональным.

Согласно правилам индуктивной сборки, главная линия в этом случае будет выглядеть так: склон дюны/бархана (фация, т.е. ранг 1) – дюна/бархан (ранг 2) – скопление дюн с соответствующим (и единственным) «алгоритмом» их композиции, или собственно «Чарские пески» (ранг 3) – вмещающая Чарские пески Чарская котловина (ранг 4). Результат получается таким же, как и на основе «зональной» фациальной линии. Процесс, создавший Чарские пески, достаточно сложный – от флювиогляциальной аккумуляции до существенной эоловой переработки. Тектоника здесь никак не участвует. Объединительная функция для формирования таксона 3-го ранга в данном случае скорее не климатический режим, а ограниченное наличие песка, т.е. пространства, которое имеет четкие естественные (можно добавить исторические) границы, лишь опосредованно зависящие от современного климата. Однако Чарская котловина – форма, созданная уже тектоникой. Именно тектоника является тем самым фактором-функцией, который объединяет зональные базисные (флювиальные), склоновые, вершинные (приводораздельные) и интразональные эоловые формы-таксоны одним тектоническим режимом.

У этого примера есть одна интересная особенность. Формы 1-го ранга – элементарные склоны дюн / барханов, формы 2-го ранга – дюны/барханы. Это означает выстраивание иерархии по склоновой линии. Однако таксон 3-го ранга (Чарские пески), согласно здравому смыслу, должен принадлежать линии базисных поверхностей. Для устранения этой логической неувязки геоморфолог имеет возможность использовать три способа. Во-первых, «здоровый смысл» может допустить и склоновую линию, т.е. такой таксон 3-го ранга может быть в данной иерархической схеме равноценен «островной горе». Во-вторых, на основании имеющихся в Интернете фотоснимков трудно сказать, какие именно фации в «песках» преобладают. Дело в том, что в данном типе рельефа большие площади занимают субгоризонтальные участки – пазухи между дюнами. И, наконец, для крайне неудобного случая (если склоновых фаций больше, чем субгоризонтальных, а «здоровый смысл» упорно воспринимает Чарские пески как равнину) есть такая отговорка: исключительно для эолового рельефа можно допустить некоторую степень шероховатости поверхности, соответствующей высоте дюн, если гипсометрический градиент целого таксона 3-го ранга не выходит за рамки традиционной субгоризонтальной поверхности. В любом случае здесь очевиден некоторый изъясн методики.

Пример 2. Тибет (Тибетское нагорье) – «сочетание плоских и слабо всхолмленных равнин высотой 4–5 тыс. м и хребтов высотой 6–7 тыс. м» [Большая географическая..., 2007]. Этот объект нередко называется «плато».

Прежде всего, необходимо отметить, что Тибет находится в иной климатической (морфоклиматической) зоне, тогда как Забайкалье по основным интенсивным характеристикам (имеется в виду кора выветривания) близко Сихотэ-Алиню. Другая особенность: на основании имеющихся материалов невозможно определить, какая фациальная линия преобладает – склоновая или базисная. (Но в любом случае не вершинная!) Внутренние хребты в пределах Тибета формально относятся к высокогорным, однако по относительным превышениям соответствуют низкогорью или среднегорью. При объединении фаций в таксоны 2-го ранга, группы таксонов 2-го ранга – в таксоны 3-го ранга и т.д., мы получим 4-й ранг этих хребтов. Следовательно, Тибет является геоморфологическим таксоном 5-го ранга, предположительно, базисной линии. Следующая особенность: горные хребты (Музтаг, Русский и др.), обрамляющие Тибет с севера, согласно той же процедуре последовательного ранжирования должны образовать горную систему тоже 5-го ранга. Это означает, что если Тибет считать таксоном базисной линии, то он и обрамляющие его с севера хребты – разные, но одноранговые таксоны (как и Гималаи). Этот северный горный пояс существенно отличался в своем тектоническом развитии от Тибета [Geological map..., 2004], что подтверждает обоснованность выделения его в качестве самостоятельного таксона 5-го ранга.

Пример 3. Таримская впадина. Впадина почти полностью занята песчаной пустыней Такла-Макан с хорошо развитыми аккумулятивными эоловыми формами. Начало индуктивной сборки такое же, как и в примере «Чарских песков». Элементарная форма рельефа – дюна – таксон 2-го ранга, состоящая из двух-трех фаций. Необходимо отметить, что эоловый аккумулятивный рельеф крайне нестабилен, подвижен, и, более того, само понятие геоморфологической фации здесь может потребовать существенной корректировки. Таксон 3-го ранга – определенная форма «организации» песчаного рельефа, возникшая в результате действия конкретного фактора со своим алгоритмом композиции. Для пустыни Такла-Макан характерны и поля барханов, и грядовые пески с различной композицией гряд, и скопления дюн – как правило, с выраженной ритмикой, что хорошо видно на космических изображениях Google Earth. Наименьшая положительная форма рельефа, т.е. таксон 2-го ранга, дюна («элементарная гряда») в большинстве случаев имеет размеры порядка 60–

100 м. Эту же величину, или немного больше, можно считать «шагом» ритмической композиции элементарных форм. Эти элементарные формы, в свою очередь, образуют крупные гряды (т.е. уже не дюны и не барханы) шириной порядка 1,5–3,5 км. Длина их может превышать 10 км. Согласно правилам индуктивной логики, такие формы следует считать таксонами 3-го ранга. Главный объединительный фактор в данном случае – тоже ветровой режим. Однако этот фактор требует конкретизации. Предполагается, что в данном случае особую роль играют процессы самоорганизации аккумулятивного эолового рельефа при господствующем ветровом режиме. Пока они непонятны. В свою очередь, все эти крупные гряды не разбросаны беспорядочно по территории пустыни, а образуют еще более крупные однородные скопления площадью порядка 20–120 тыс. км². Эти скопления отличаются друг от друга ориентацией гряд, их размерами (включая высоту) и ритмикой. Такие скопления следует считать таксонами 4-го ранга. Понятно, что и здесь главным объединительным фактором является определенный климатический режим. Но какой? – Для ответа на этот вопрос необходимы дополнительные исследования. Итог: днище Таримской впадины, занятой песчаной пустыней Такла-Макан, является таксоном 5-го ранга базисной линии. Отдельным таксоном 4-го ранга, включенным в нее, следует считать флювиально-эоловый ландшафт «долины» р. Тарим. Как видно, в данном случае тектонический фактор становится объединительной функцией только на уровне 5-го ранга.

Попутно возникает следующий вопрос: как соотносится часть впадины, занятой пустыней Такла-Макан, со всей Таримской впадиной? Ведь 5-й ранг определен только для песчаной части, включающей внутренние области флювиально-эолового генезиса. Периферийные, предгорные части впадины (в основном, делювиально-пролювиальные шлейфы) занимают относительно небольшие площади. Согласно правилам индуктивной сборки, их ранг явно не выше четвертого. Поскольку мы считаем, что объединительной функцией для «песчаного» днища впадины является тектонический (что абсолютно неизбежно), то эти периферийные области должны быть отнесены ко всей Таримской впадине на правах составляющего ее таксона 4 ранга. Следует напомнить, что для высокоранговых таксонов главными определяющими признаками являются общие морфологические, а не «вещественные» (в данном случае не «песок»), которые считались паритетными с морфологическими при определении геоморфологических фаций [Невский, 2003].

Заключение

Как уже отмечалось, современная геоморфология не испытывает особой нужды в общих классифика-

циях. Геоморфологов устраивают существующие. Но слабость систематики обедняет геоморфологию, и это негативно отражается и на ее объяснительной функции.

При анализе любой иерархической классификации на передний план неизбежно выходят вопросы о том, какие особенности организации рельефа отражает ранг (если, конечно, отражает). Чем принципиально отличаются формы рельефа двух смежных рангов? Какой смысл имеет граница между 1-м и 2-м, 2-м и 3-м и т.д. рангами? Наконец, может ли данный индуктивный принцип оказать какую-то помощь в формализации закона факторной относительности [Проблемы..., 1988]?

Дедуктивные классификации на подобные вопросы, конечно, отвечают, но отвечают формально. Индуктивные, при всех своих логических недочетах, отличаются большей конкретностью. Они «идут» от

процесса, создающего конкретную форму, и поэтому объяснение природы межранговых границ – задача, посильная только для них. Индуктивные классификации обладают своего рода «внутренней логикой», или субординацией, позволяющей нивелировать возможные субъективные эксцессы при конструировании таксонов. Если на одном уровне возникают разночтения, например, о количестве таксонов на данной площади, то эти разночтения не сломают саму конструкцию и никак не увеличат и не уменьшат общее количество таксономических уровней (см. рис. 1). Вряд ли стоит ожидать от индуктивных классификаций однозначных корреляций ранга и процесса – рельеф слишком сложен для такой простой зависимости. Однако они способны внести дополнительную и притом существенную упорядоченность в наши представления о структуре рельефа и формирующих его процессах.

Список источников

- Большая географическая энциклопедия. М. : Эксмо, 2007. 672 с.
- Воскресенский С.С. Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. 228 с.
- Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория систем). СПб. : Изд-во СПбГУ, 2002. 762 с.
- Невский В.Н. Геоморфология и Постмодерн // Научный диалог. 2015. Вып. 2 (38). С. 6–20.
- Невский В.Н. Новые подходы к созданию базовой геоморфологической классификации // Геоморфология. 2003. № 1. С. 40–48.
- Невский В.Н. О рангах форм рельефа // Геоморфология. 2009. № 1. С. 3–11.
- Невский В.Н. Схема индуктивного формирования таксонов геоморфологической морфогенетической классификации // Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Симферополь, 2016. Т. 1. С. 87–91.
- Проблемы теоретической геоморфологии. М. : Наука, 1988. 256 с.
- Симонов Ю.Г. Геоморфология. Методология фундаментальных исследований. СПб. : Питер, 2005. 427 с.
- Черняховский А.Г. Климатическая зональность элювиального процесса // Труды Геологического института АН СССР. 1980. Вып. 350. С. 28–59.
- Church M. The trajectory of geomorphology // Progress in Physical Geography. 2010. V. 34 (3). P. 265–286.
- De Jong M.G.G., Sterk H.P., Shinneman S., Seijmonsbergen A.C. Hierarchical geomorphological mapping in mountainous areas // Journal of Maps. 2021. V. 17 (2). P. 214–224.
- Lastochkin A.N., Zhirov A.I., Boltramovich S.F. System-morphological approach: Another look at morphology research and geomorphological mapping // Geomorphology. 2018. V. 303. P. 486–503.
- Minar J., Evans I.S. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping // Geomorphology. 2008. V. 95 (3–4). P. 236–259.
- Sherman D.J. Methodology in Geomorphology: Traditions and Hypocrisy // Proceed. 27-th Binghamton Symposium in Geomorphology. John Wiley & Sons Ltd., 1996. P. 687–696.
- Tricart J. Principes et methods de la geomorphologie. Paris : Masson et C., 1965. 496 p.
- Wheaton J.M., Fryirs K.A., Brierley G., Bangen S.G., Bowes N., O'Brien G. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms // Geomorphology. 2015. V. 248. P. 273–295.
- Geological map of the People's Republic of China. Scale 1:2500000. China Geol. Surv., 2004. URL: http://neotec.ginras.ru/neomaps/M025_China_2004_Geology_Geologicheskaya-karta-kitaya.html (дата обращения: 29.08.2021).

References

- Bol'shaya geograficheskaya entsiklopediya [Big Geographic Encyclopedia]. Moscow: Eksmo, 2007. 672 p. In Russian
- Voskresenskiy S.S. *Dinamicheskaya geomorfologiya. Formirovaniye sklonov*. [Dynamic Geomorphology. Hillslope forming]. Moscow: Moscow State Univ., 1988. 228 p. In Russian
- Lastochkin A.N. *Sistemno-morfologicheskoe osnovaniye nauk o Zemle (geotopologiya, strukturnaya geografiya i obshchaya teoriya sistem)*. [System-morphological basis of sciences of the Earth (geotopology, structural geography and general theory of systems)]. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Univ., 2002. 762 p. In Russian
- Nevsky V.N. *Novye podhody k bazovoi geomorfologicheskoi klassifikatsii* [New approaches to development of basic geomorphological classifications] // Geomorfologiya. 2003. No. 1. pp. 40–48. In Russian
- Nevsky V.N. *O rangah rel'efa* [On ranks of landforms] // Geomorfologiya. 2009. No. 1. pp. 3–11. In Russian
- Nevsky V.N. *Geomorfologiya i Postmodern* [Geomorphology and Postmodern]. Nauchnyi dialog. 2015. No. 2(38). pp. 6–20. In Russian

Nevsky V.N. *Skhema induktivnogo formirovaniya taksonov morfogeneticheskoi geomorfologicheskoi klassifikatsii* [The scheme of inductive forming of taxa of geomorphic morphogenetic classification]. Proceed. of XXXV Plenary meeting of RAS Geomorphological Committee. Simferopol, 2016. V. 1. pp. 87–91. In Russian

Problemy teoreticheskoy geomorfologii [Problems of Theoretical Geomorphology]. Editors: Yu.G. Simonov, D.A. Timofeyev and G.F. Ufimtsev. Moscow: Nauka, 1988. 256 p. In Russian

Simonov Yu.G. *Geomorfologiya. Metodologiya fundamentalnykh issledovaniy* [Geomorphology. Methodology of fundamental researches]. St. Petersburg: Piter, 2005. 427 p. In Russian

Cherniakhovskiy A.G. *Klimaticheskaya zonal'nost eluvial'nogo protsessa* [Climatic zoning of eluvium process]. Proceed. Geol. Inst. of Academy of Sciences of USSR. 1980. V. 350. pp. 28–59. In Russian

Church M. The trajectory of geomorphology. *Progress in Physical Geography*. 2010. V. 34 (3). pp. 265–286.

De Jong M.G.G., Sterk H.P., Shinneman S., Seijmonsbergen A.C. Hierarchical geomorphological mapping in mountainous areas. *Journal of Maps*. 2021. V. 17 (2). pp. 214–224.

Lastochkin A.N., Zhirov A.I., Boltramovich S.F. System-morphological approach: Another look at morphology research and geomorphological mapping. *Geomorphology*. 2018. V. 303. pp. 486–503.

Minar J., Evans I.S. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*. 2008. V. 95 (3–4). pp. 236–259.

Sherman D.J. *Methodology in Geomorphology: Traditions and Hypocrisy*. Proceed. 27-th Binghamton Symposium in Geomorphology. “John Wiley & Sons Ltd”, 1996. pp. 687–696.

Tricart J. *Principes et methods de la geomorphologie*. Paris: “Masson et C.”, 1965. 496 p.

Wheaton J.M., Fryirs K.A., Brierley G., Bangen S.G., Bowes N., O'Brien G. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. *Geomorphology*. 2015. V. 248. pp. 273–295.

Geological map of the People's Republic of China. Scale 1:2500000. *China Geol. Surv.*, 2004. http://neotec.ginras.ru/neomaps/M025_China_2004_Geology_Geologicheskaya-karta-kitaya.html (Date of accessed: 29.08.2021)

Информация об авторе:

Невский В.Н., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия.

E-mail: nevsky@tigdvo.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about author:

Nevsky V.N., Cand. Sci. (Geography), Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

E-mail: nevsky@tigdvo.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.09.2021; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 09.09.2021; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 13.03.2023

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 504.7; 571.1/5
doi: 10.17223/25421379/26/7

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ТЕРРИТОРИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КАТАСТРОФ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА (НА ПРИМЕРЕ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА)



Роман Викторович Кнауб¹, Екатерина Матвеевна Дутова²,
Анна Владимировна Игнатъева³

^{1, 2, 3} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

¹ *knaybrv@mail.ru*

² *dutova@tpu.ru*

³ *anna_tomsktsu@mail.ru*

Аннотация. Исследуются региональные особенности энергоэкологической емкости территории самого большого округа России – Сибирского федерального округа (СФО) под действием катастроф различного генезиса. На территории СФО отмечается проявление широкого спектра катастроф различного генезиса. Природные условия округа способствуют проявлению широкого спектра катастроф, особенно лесных пожаров, наводнений и ледовых и заторных явлений на реках. В ряде субъектов СФО в период с 2009 по 2019 г. отмечается рост валового регионального продукта. В тех субъектах, где отмечался рост числа количества погибших, экономический ущерб от катастроф сказывался на сокращении валового регионального продукта. Ведущую роль в энергоэкологической ёмкости территории составляет антропогенная нагрузка. Для большинства субъектов отмечался рост антропогенной нагрузки под действием катастроф различного генезиса, при этом в Алтайском и Забайкальском краях, республиках Алтай и Бурятия она достигла максимальных значений. При расчёте энергоэкологической ёмкости территории помимо антропогенной нагрузки необходимо учитывать нагрузку от катастроф.

Ключевые слова: *энергоэкологическая ёмкость территории, природные и техногенные катастрофы, энергоэкология катастроф различного генезиса, устойчивое развитие территорий*

Для цитирования: Кнауб Р.В., Дутова Е.М., Игнатъева А.В. Оценка энергоэкологической ёмкости территории под действием катастроф различного генезиса (на примере Сибирского Федерального Округа) // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 88–105. doi: 10.17223/25421379/26/7

Original article
doi: 10.17223/25421379/26/7

ASSESSMENT OF ENERGYECOLOGICAL CAPACITY OF A TERRITORY UNDER THE ACTION OF DISASTERS OF DIFFERENT GENESIS (ON THE EXAMPLE OF THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT)

Roman V. Knaub¹, Ekaterina M. Dutova², Anna V. Ignateva³

^{1, 2, 3} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

² *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

¹ *knaybrv@mail.ru*

² *dutova@tpu.ru*

³ *anna_tomsktsu@mail.ru*

Abstract. This paper examines the regional features of the energy-ecological capacity of the territory of the largest Russian district of the Siberian Federal District (SFD) under the influence of disasters of various genesis. On the territory of the Siberian Federal District, there is a manifestation of a wide range of disasters of various genesis. The natural conditions of the SFD contribute to the manifestation of a wide range of disasters, especially forest fires, floods and ice and jamming phenomena on rivers.

In a number of subjects of the Siberian Federal District in the period from 2009 to 2019. There is an increase in the gross regional product. In those regions where there was an increase in the number of deaths, the economic damage from disasters affected the reduction of the gross regional product.

The leading role in the energy-ecological capacity of the territory is made by anthropogenic load. For most of the subjects, an increase in anthropogenic load was noted under the influence of catastrophes of various genesis, while in the Altai and Trans-Baikal regions, the republics of Altai and Buryatia, it reached its maximum values.

When calculating the energy-ecological capacity of the territory, in addition to the anthropogenic load, it is necessary to take into account the load from disasters.

Keywords: energy-ecological capacity of a territory, natural and man-made disasters, energy ecology of disasters of various genesis, sustainable development of territories

For citation: Кнауб Р.В., Дутова Е.М., Игнатьева А.В. (2023) Assessment of energyecological capacity of a territory under the action of disasters of different genesis (on the example of the Siberian Federal District). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 88–105. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/7

Введение

На экологию до 1970-х гг. смотрели главным образом лишь как на одно из подразделений биологии. Сейчас экология вышла из её рамок, оформивших в принципиально новую интегрированную дисциплину, связывающую физические и биологические явления и образующую мост между естественными и общественными науками [Odum, 1975].

Энергию определяют как способность производить работу [Одум, Одум, 1978]. Свойства энергии описываются первым и вторым законами термодинамики. Важнейшая термодинамическая характеристика организмов, экосистем и биосферы в целом – способность создавать и поддерживать высокую степень внутренней упорядоченности, т.е. состояние с низкой энтропией. Таким образом, экосистемы и организмы представляют собой открытые неравновесные термодинамические системы, постоянно обменивающиеся с окружающей средой энергией и веществом, уменьшая этим энтропию внутри себя, но увеличивая энтропию вовне в согласии с законами термодинамики [Odum, 1973; Odum, 1975].

Таким образом, энергия – общий знаменатель всех систем, как природных, так и созданных человеком. Подробнее о связи термодинамики с экологией можно найти в работах [Prigogin, Nicolis, Bablyantz, 1972; Odum, 1973; Wesley, 1974; Odum, 1975; 1976; Lephowski, 1979].

Одним из источников, уменьшающих энергию систем, являются катастрофы различного генезиса. Вопросами оценки последствий катастроф различного генезиса активно занимались многие исследователи [Bostrom, 2002; Centre for Research on the Epidemiology of Disasters..., 2006; Mladjan et al., 2009; Index for risk-management... 2015; Kuzmin, 2015; Paul, 2011; The International Disaster Database Centre...].

Возможность эффективной борьбы с опасными процессами различного происхождения заключается в знании не только их генезиса и характера развития, но и оценке экономических потерь общества.

Осознание учёными реалий негативного взаимодействия природы и общества позволило сфор-

мулировать эти важные задачи на современном этапе развития науки. Во главу угла учеными в мире и в России ставится устойчивое развитие общества [Миркин, Наумова, 2006; Тарасова, Кручина, 2006; Трунов и др., 2006; Фролов, 2010; Бобылев, 2014; Tian et al., 2015; Zhernov, Nehoda, 2017]. Мы придерживаемся тенденции междисциплинарного синтеза и поиска ключевых параметров управления техносферной безопасностью [Кнауб, Игнатьева, 2020].

Учёными многих направлений активно разрабатываются стратегии выхода из кризисов, обеспечения безопасности, ускоренного роста и устойчивого развития, в которых используются различные индикаторы, индексы и показатели (например, индикатор жизнестойкости, индексы развития и другие). При этом большинство используемых индикаторов, индексов и показателей не отвечают требованиям измеримости и соразмерности, что негативно отражается на эффективности и качестве управления развитием.

Созданы мировые научные центры, выполняющие теоретические и прикладные исследования проблемы перехода к устойчивому развитию и разрабатывающие соответствующие программы действий. В их числе: **Институт мировых ресурсов** [World Resources Institute], **Институт наблюдения за мировыми процессами** [WorldWatch Institute], **Международный институт по устойчивому развитию** [International Institute for Sustainable Development], **Центр исследований мира** [Centro de Investigacion para la Paz – CIP], **Исследовательский совет Норвегии** [The Research Council of Norway], **Институт развивающихся экономик** [Institute of Developing Economies – IDE].

Все перечисленные центры являются представителями так называемой Западной научной школы устойчивого развития. Главная стратегия этой школы заключается в идее «нулевого роста», т.е. сокращение потребления ресурсов для выживания человечества. Но самое главное, что представленная школа не даёт путей выхода из создавшегося кризиса на рельсы устойчивого развития.

В России создана и успешно работает **Научная школа устойчивого развития** (действует на базе РАЕН и Международного университета природы, общества и человека «Дубна») – кардинально отличается от других центров принципиально иным подходом к проблеме устойчивого развития, поскольку ее идеология основана на использовании методов, в основе которых лежат общие законы природы, выраженные в универсальных пространственно-временных мерах. Тематика этой научной школы охватывает теоретические и методологические исследования, а также прикладные разработки по технологиям проектирования и управления устойчивым развитием в различных областях: политика, экономика, экология, образование, наука, технологии, социальная сфера и др.

Авторы придерживаются точки зрения Научной школы устойчивого развития как ярчайшего представителя так называемой Русской научной школы устойчивого развития. Главная стратегия этой школы заключается в стратегии ноосферного устойчивого развития на основе закона сохранения мощности. Используя данную стратегию, нет необходимости всему мировому сообществу переходить к политике «нулевого роста», так как вышеназванная школа базовый принцип проектирования устойчивого развития определяет так: *проектируемая система должна обеспечить сбалансированное взаимодействие с окружающей средой, согласованное с законом сохранения мощности и законом развития планетарной жизни.*

Целью данной работы является количественный анализ энергоэкологических последствий катастроф различного генезиса на примере субъектов Сибирского федерального округа.

Объект исследования

Сибирский федеральный округ (СФО) был образован 13 мая 2000 г. В него входит 12 субъектов Российской Федерации (Республика Алтай, Республика Бурятия, Республика Тыва, Республика Хакасия, 3 края – Алтайский, Красноярский, Забайкальский и 5 областей – Иркутская, Томская, Кемеровская, Новосибирская, Омская) (рис. 1).

Численность населения СФО на 1.01.2020 составляет 17 118 387 человек (Регионы России..., 2019). Несмотря на постоянное сокращение численности населения округа, большая часть этого населения подвергается опасности воздействия природных и техногенных опасностей.

Сибирский федеральный округ расположен в срединной части Евразийского материка, приуроченного к восточной и юго-восточной частям Западно-Сибирской равнины и Среднесибирскому плос-

когорью [Сибирский региональный центр..., 2016]. Округ на севере омывается водами Северного Ледовитого океана; на западе граничит с Тюменской областью, Ямало-Ненецким и Ханты-Мансийским автономными округами; на востоке – с Республикой Саха (Якутия), Амурской областью; на юге – с Республикой Казахстан, Монголией, Китайской Народной Республикой [Современные системы мониторинга..., 2013; Советский Союз..., 1969].

В Сибирском федеральном округе выделяется Западная Сибирь и Восточная Сибирь, в пределах которых расположена Западно-Сибирская равнина, Среднесибирское плоскогорье, горы Южной Сибири (Алтай, Западный Саян, Восточный Саян, горы Тувы, Прибайкалье, Забайкалье) и система горных хребтов на северо-востоке Сибири, которые обрамляются Верхоянским хребтом и Колымским нагорьем [Восточная Сибирь]. На Западно-Сибирской равнине находятся следующие регионы СФО: Омская, Новосибирская, Томская, Кемеровская области, Алтайский край и Республика Алтай. На территории Восточной Сибири – Красноярский край, Иркутская область, Забайкальский край, республики Бурятия, Тыва, Хакасия.

По характеру рельефа и особенностям геологической истории Западную Сибирь можно разделить на три основные части – Западно-Сибирскую равнину и две горные области – Алтайскую и Кузнецко-Салаирскую. Около 4/5 территории приходится на Западно-Сибирскую равнину, самую большую в России и одну из величайших на Земле.

На большей части территории Сибири резко континентальный климат. К районам Крайнего Севера и приравненным к ним местностям относится значительная часть территории: полностью территория Республики Тыва; частично территории республик Бурятия и Алтай, Красноярского края, Иркутской, Томской областей и Забайкальского края [Современные системы мониторинга..., 2013, Советский Союз..., 1969].

Большая часть населения региона подвергается воздействию природных и техногенных опасностей.

При описании чрезвычайных ситуаций нами была использована следующая терминология. *Чрезвычайная ситуация* – совокупность условий и обстоятельств, создающих опасную для жизнедеятельности человека обстановку на конкретном объекте, территории (акватории), возникших в результате совершившейся аварии или катастрофы, опасного природного явления.

Чрезвычайная ситуация природная – обстановка на определенной территории или акватории, сложившаяся в результате стихийного природного бедствия, которое может повлечь или повлекло за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

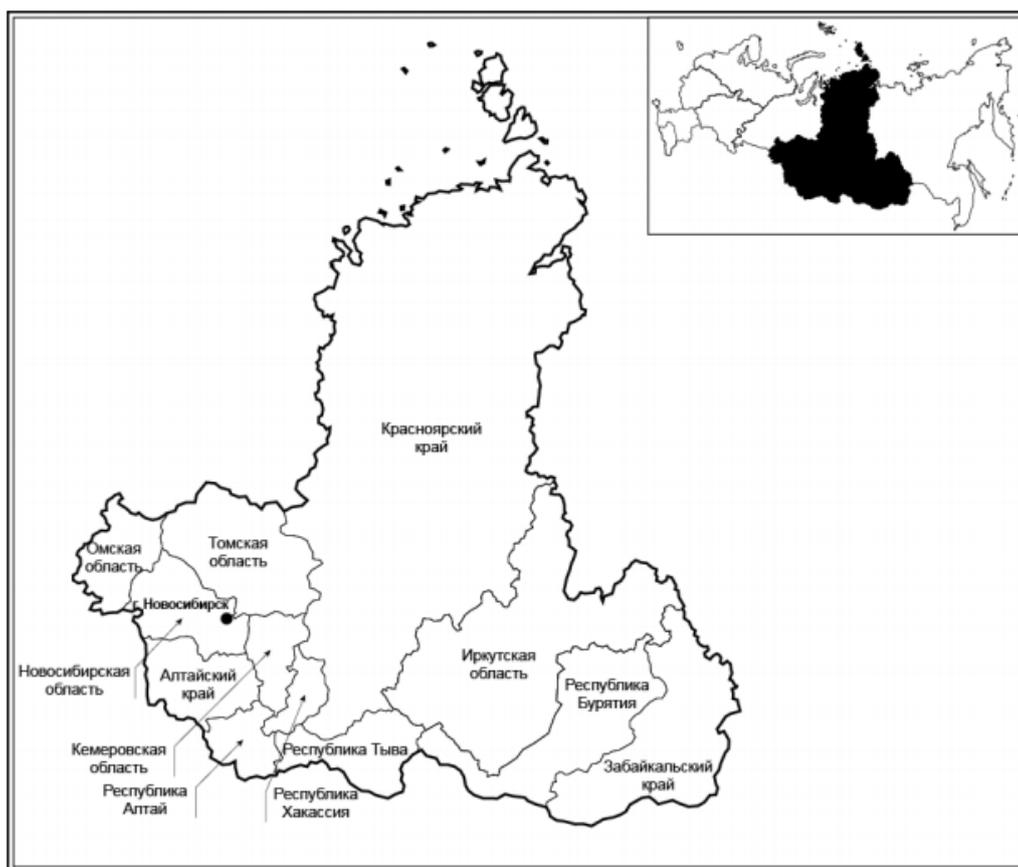


Рис. 1. Расположение Сибирского федерального округа на карте России [Регионы России..., 2019]

Fig. 1. Location of the Siberian Federal District on the map of Eurasia [Regions of Russia..., 2019]

Различают природные чрезвычайные ситуации по характеру источника и масштабам. *Риск* – это вероятность наступления какого-то непредвиденного события. Существует множество определений риска, рождённых в различных ситуационных контекстах и различными особенностями применений. Различия в определениях риска зависят от контекста потерь, их оценки и измерения, когда же потери являются ясными и фиксированными, например «человеческая жизнь», оценка риска фокусируется только на вероятности события (частоте события) и связанных с ним обстоятельств [Official website of the EMERCOM of Russia].

Несмотря на всё разнообразие катастроф как природного, так и техногенного характера, их можно охарактеризовать по следующим параметрам: *число катастроф, число пострадавших, число погибших людей и величина материального ущерба от катастроф*.

Рассмотрим территориальные особенности природных аспектов произошедших природных ЧС. Ежегодно МЧС РФ публикует доклад [Official

website of the EMERCOM of Russia] о произошедших ЧС различного генезиса и их последствиях. После анализа обстановки с опасными природными явлениями в субъектах Сибирского федерального округа за период с 2000 по 2019 г. были получены следующие результаты, объединенные в таблицу по каждому субъекту в отдельности. Также в таблицу добавлены данные, касающиеся природных условий возникновения катастроф (табл. 1).

Наиболее часто опасные природные явления связаны с быстро меняющимися погодными условиями. Это объясняется тем, что одна часть Сибирского федерального округа расположена в области континентального климата умеренного климатического пояса, а другая – в области резко континентального климата. Именно Восточная Сибирь, где наиболее часто встречаются опасные гидрометеорологические явления, расположена в области резко континентального климата. По оценке Всемирного банка реконструкции и развития, ежегодный ущерб от воздействия опасных гидрометеорологических опасных явлений на территории России составляет 30–60 млрд руб.

Наиболее часто зарегистрированные опасные природные явления в субъектах Сибирского федерального округа и природные условия возникновения катастроф [Игнатьева, Кнауб, 2020]

The most frequently registered natural hazards in the subjects of the Siberian Federal District and the natural conditions for the occurrence of disasters [Ignatieva, Knaub, 2020]

№	Название субъекта СФО	Природные условия, способствующие возникновению катастроф	Наиболее часто возникающие катастрофы природного характера в регионе, связанные с природными условиями	Наиболее часто зарегистрированные опасные природного явления различного генезиса в субъекте за период с 2000 по 2019 г.
1	Алтайский край	Горная местность; выпадение большого количества осадков; подстилающая поверхность, характеризующаяся большой пропускной способностью; дефицит осадков, возникновение сухих гроз	Сели, оползни, землетрясения; засухи, высокая степень пожароопасности	Затопление; сильные продолжительные дожди; сильные ливни с грозами
2	Республика Алтай	Горная местность; выпадение большого количества осадков; подстилающая поверхность, характеризующаяся большой пропускной способностью; дефицит осадков, возникновение сухих гроз; средняя высота региона	Сели, оползни, землетрясения; засухи, высокая степень пожароопасности; эрозионные процессы, образование оврагов, оползни, обвалы, лавины	Аномально низкие температуры; землетрясения
3	Республика Бурятия	Горная местность; выпадение большого количества осадков; подстилающая поверхность, характеризующаяся большой пропускной способностью; районы, для которых характерны большие площади, занятые лесом, периоды засух; малое количество осадков в течение засушливого периода; смена циркуляции в атмосфере; средняя высота региона	Сели, оползни, землетрясения; высокая степень пожароопасности; смерчи, вихри, шквалы, сильные ветры; эрозионные процессы, образование оврагов, оползни, обвалы, лавины	Снежные лавины; атмосферные, почвенные засухи; крупные лесные пожары
4	Республика Тыва	Горная местность; выпадение большого количества осадков; подстилающая поверхность, характеризующаяся большой пропускной способностью; смена циркуляции в атмосфере; дефицит осадков, возникновение сухих гроз; средняя высота региона	Сели, оползни, землетрясения; смерчи, вихри, шквалы, сильные ветры; засухи, высокая степень пожароопасности; эрозионные процессы, образование оврагов, оползни, обвалы, лавины	Землетрясения
5	Республика Хакасия	Дефицит осадков, возникновение сухих гроз	Засухи, высокая степень пожароопасности	Сильные снегопады и метели
6	Новосибирская область	Заболоченные территории, впоследствии подвергшиеся осушению; малое количество осадков в течение засушливого периода; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью; пониженные формы рельефа; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью	Высокая вероятность возникновения торфяных пожаров; наводнения, половодье (весеннее, осеннее)	Заторы; ветер ураганной силы; сильные продолжительные дожди; сильные ливни с грозами
7	Красноярский край	Районы, которым характерно большие площади, занятые лесом, периоды засух; малое количество осадков в течение засушливого периода; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью; дефицит осадков, возникновение сухих гроз	Высокая степень пожароопасности; наводнения, половодье (весеннее, осеннее); засухи, высокая степень пожароопасности	Крупные лесные пожары; аномально холодная погода
8	Томская область	Заболоченные территории, впоследствии подвергшиеся осушению; малое количество осадков в течение засушливого периода; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество	Высокая вероятность возникновения торфяных пожаров; наводнения, половодье (весеннее, осеннее)	Подъем воды выше критического уровня; сильные ветры и осадки

№	Название субъекта СФО	Природные условия, способствующие возникновению катастроф	Наиболее часто возникающие катастрофы природного характера в регионе, связанные с природными условиями	Наиболее часто зарегистрированные опасные природного явления различного генезиса в субъекте за период с 2000 по 2019 г.
		осадков, выпадаемое весной и осенью; пониженные формы рельефа; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью		
9	Забайкальский край	Горная местность; выпадение большого количества осадков; подстилающая поверхность, характеризующаяся большой пропускной способностью	Сели, оползни, землетрясения	Стихийные гидрометеорологические явления; крупные лесные пожары; снежные лавины; атмосферные, почвенные засухи
10	Омская область	Заболоченные территории, впоследствии подвергшиеся осушению; малое количество осадков в течение засушливого периода; пониженные формы рельефа; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью; смена циркуляции в атмосфере	Высокая вероятность возникновения торфяных пожаров; наводнения, половодье (весеннее, осеннее); смерчи, вихри, шквалы, сильные ветры	Крупные лесные пожары
11	Иркутская область	Районы, которым характерно большие площади, занятые лесом, периоды засух; малое количество осадков в течение засушливого периода; наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью; дефицит осадков, возникновение сухих гроз	Высокая степень пожароопасности; наводнения, половодье (весеннее, осеннее); засухи, высокая степень пожароопасности	Землетрясения; подъем воды выше критического уровня
12	Кемеровская область	Наличие водоемов вблизи населенных пунктов; большое количество осадков, выпадаемое весной и осенью	Наводнения, половодье (весеннее, осеннее)	Затопление; сильные продолжительные дожди; сильные ливни с грозами

Циклоны зимой в Сибири вызывают кратковременное потепление, усиление ветра, снегопады и метели. Особенно резкие (до положительных значений) потепления, интенсивные метели и снегопады вызывает зимой выход южных циклонов.

Количество опасных природных процессов (явлений) в субъектах СФО почти всегда достигает высокого уровня, при этом наиболее часто отмечаются стихийные гидрометеорологические явления, ветер ураганной силы, подъем воды в реках выше критического уровня, крупные лесные пожары и т.д. [Игнатьева, Кнауб, 2020].

Из всех федеральных округов наибольшее число опасных явлений наблюдается в СФО, за исключением *сильных ветров, сильных осадков и заморозков*. Это связано с тем, что территория округа обладает наибольшими размерами и характеризуется очень активными атмосферными процессами.

Материал и методы исследования

Основными источниками фактических данных явились материалы из государственных докладов и отчетов МЧС РФ, архив МЧС РФ, материалы многолетних исследований Ю.И. Шокина, В.А. Акимова,

В.В. Лесных, Т.Л. Ляховец, Н.А. Махутова, И.Ю. Олтян, Н.Н. Радаева по изучению потенциальных источников ЧС различного генезиса на территории СФО [Акимов и др., 2001; Шокин и др., 2001; Акимов и др., 2004; Махутов и др., 2013; Олтян, Ляховец, 2016; Государственный доклад..., 2017; Регионы России..., 2019]. К выполнению исследования привлекались также фактические материалы исследований соответствующей тематики, опубликованные в работах, посвященных изучению чрезвычайных ситуаций, их комплексной оценке и районированию [Государственный доклад..., 2017].

Основными источниками фактических данных явились материалы из государственных докладов и отчетов Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, архив Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, материалы многолетних исследований авторов по изучению потенциальных источников катастроф различного генезиса на территории Сибирского федерального округа. В основу работы были положены руководящие документы Министерства Рос-

сийской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. К выполнению исследования привлекались также фактические материалы исследований соответствующей тематики, опубликованные в научных работах, посвященных изучению катастроф различного генезиса, их комплексной оценке и районированию.

Теоретико-методологической базой исследования явились разработки отечественных и зарубежных ученых в области прогноза, районирования и оценки воздействия катастроф [Воробьев и др., 1997; Шойгу и др., 1997; Акимов и др., 2001; Акимов и др., 2004; Баринов и др., 2009; Порфирьев, 2009; Олтян, Ляховец, 2016].

Авторами представленные разработки были дополнены и усовершенствованы [Кнауб, Ignateva, 2019, 2020].

Для перевода денежных единиц в единицы мощности Б.Е. Большаковым (2011) предложена формула

$$P_p = P_{\text{ватт}}/P_{\text{деньги}}, \quad (1)$$

где P_p – мощность валюты, Вт/рубль; $P_{\text{ватт}}$ – валовой региональный продукт, выраженный в единицах мощности, Ватт; $P_{\text{деньги}}$ – валовой региональный продукт, выраженный в денежных единицах, руб.

В работе [Кнауб, 2015] для перевода ущерба от катастроф различного генезиса в единицы мощности предложена следующая формула:

$$P_{\text{чс}} = Y_{\text{чс}}/P_p, \quad (2)$$

где $P_{\text{чс}}$ – мощность катастроф, выраженная в единицах мощности, кВт; $Y_{\text{чс}}$ – материальный ущерб от катастроф, выраженный в рублях, руб.; P_p – мощность валюты, Вт/рубль.

Далее ватты легко переводятся в киловатты и мегаватты соответственно. При этом под определением катастроф различного генезиса в производственной практике используется обычно совместное действие катастроф природного и техногенного характера. Следовательно, формула для определения мощности катастроф совокупного характера (природных и техногенных катастроф) будет иметь следующий вид. Назовём её полной мощностью:

$$N_{\text{чс}} = N_{\text{чс прир}} + N_{\text{чс техн}}, \quad (3)$$

$N_{\text{чс}}$ – мощность катастроф, выраженная в единицах мощности, кВт; $N_{\text{чсприр}}$ – мощность катастроф природного характера, кВт; $N_{\text{чстехног}}$ – мощность катастроф техногенного характера, кВт.

Нами предложены следующие возможности оценки мощности катастроф:

$$K_{\text{чс}} = N_{\text{чс}}/S, \quad (4)$$

где $K_{\text{чс}}$ – коэффициент мощностной нагрузки катастроф или плотность мощности катастроф; $N_{\text{чс}}$ – мощность катастроф; S – площадь региона.

Для определения энергоэкологических пределов существования регионов, в том числе и при воздействии чрезвычайных ситуаций различного генезиса, используется специальный параметр «плотность полной мощности» или антропогенная нагрузка, выраженная в единицах мощности. Плотность полной мощности определяется отношением годового суммарного энергопотребления (N) к площади региона (S) с единицей измерения – киловатт на квадратный километр [Большаков, 2011]. Другим важным показателем для представленной методики является показатель *неустойчивость биосферы* – это отношение плотности полной мощности (антропогенной нагрузки) к константе А.П. Федотова [Федотов, 2008], средние значения которой составляют 15–70 кВт на км².

С учётом плотности мощности катастроф, формула расчёта неустойчивости биосферы будет иметь следующий вид [Кнауб, 2014]:

$$N_{\text{биос}} = P + K_{\text{чс}}/K_{\text{ф}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{биос}}$ – неустойчивость биосферы; P – плотность полной мощности или антропогенная нагрузка; $K_{\text{чс}}$ – плотность мощности катастроф или коэффициент мощностной нагрузки катастроф; $K_{\text{ф}}$ – константа Федотова (15–70 кВт/км²).

Для определения пределов существования регионов с учётом воздействия мощности катастроф авторами учитывались следующие значения нагрузки мощности на биосферу региона:

- 1) до 15 кВт на км² – нагрузка в пределах нормы;
- 2) от 15 до 70 – допустимая нагрузка;
- 3) от 70 до 125 – нагрузка значительная;
- 4) более 125 кВт на км² – экологическая катастрофа.

Энергоэкологическая емкость территорий с учётом мощности катастроф различного генезиса представлена на рис. 2.

Суть отображенной на схеме жизни общества во взаимодействии с природой и учетом воздействия катастроф различного генезиса (А. Путь деградации или биосферной неустойчивости) (рис. 2) заключается в следующем [Кнауб, 2014]:

1) источником техногенных катастроф является общество, человек, в свою очередь, возникшие катастрофы техногенного характера оказывают влияние на общество и природу;

2) источником природных катастроф является природа, в свою очередь, возникшие ЧС природного характера оказывают влияние на общество и природу;

3) техногенные и природные катастрофы оказывают влияние друг на друга – природные могут явиться причиной возникновения техногенных катастроф и, наоборот, техногенные вызвать природные катастрофы;

4) антропогенная нагрузка, оказывающая воздействие на природу и общество, с учетом мощностной

нагрузки катастроф, не должна превышать 70 кВт/км^2 . В случае, отображённом на рис. 2, антропогенная нагрузка с учётом мощности катастроф различного генезиса превышает значения 70 кВт/км^2 , соответственно, энергоэкологический баланс катастроф нарушается и сохраняется путь деградации и биосферной неустойчивости природы и общества.

Таким образом, представленная методология позволяет достаточно полно и комплексно оценить энергоэкологическую безопасность от катастроф различного генезиса.

Результаты и анализ

На рис. 3, 4 представлена динамика техногенных и природных катастроф в субъектах Сибирского федерального округа за период с 2009 по 2019 г.

Согласно графику (рис. 3), начиная с 2010 г., число техногенных ЧС в субъектах СФО идет на понижение. До 2010 г. в субъектах СФО отмечаются как периоды спада, так и увеличения количества ЧС. Среди субъектов-лидеров по количеству чрезвычайных ситуаций до

2010 г. выделяются Красноярский край, Республика Бурятия, Иркутская область. В целом данные субъекты остались лидерами по количеству ЧС, однако показатели значительно снизились с 2010 г.

Рисунок 3 демонстрирует также снижение количества катастроф природного характера, но уже с 2009 г. Только в 2012 г. отмечается резкий скачок количества катастроф в Забайкальском крае. Это можно объяснить наибольшим количеством лесных пожаров, которые произошли в данном году, в сравнении с другими субъектами. До 2009 г. среди лидеров по количеству катастроф природного характера выделяются Красноярский край, Республика Бурятия, Забайкальский край, Кемеровская и Новосибирская области.

Используя данные валового регионального продукта в рублях [Регионы России..., 2019], а также данные по валовому региональному продукту в единицах мощности (полезная мощность), нами была рассчитана мощность валюты. Материалы по полезной мощности взяты из [Электронный атлас параметров...] и представлены в табл. 2.

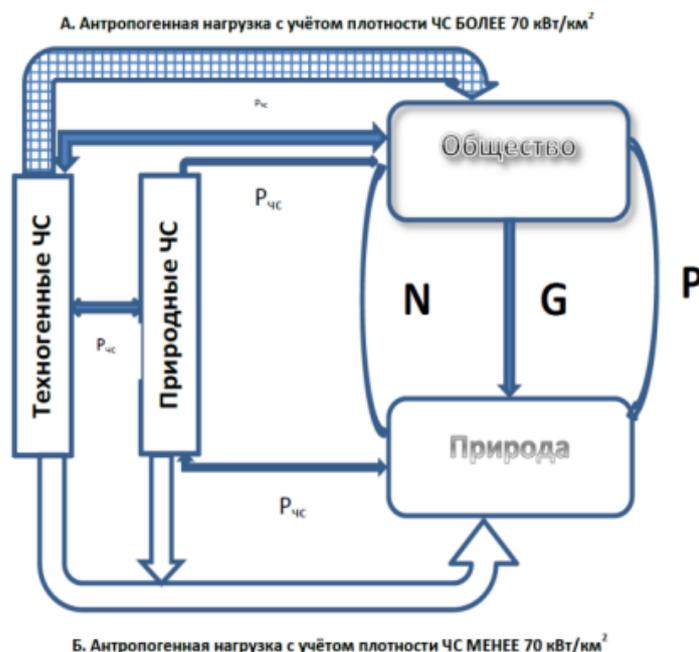


Рис. 2. Схематическое изображение жизни общества во взаимодействии с природой с учетом чрезвычайных ситуаций различного происхождения

A – путь к деградации или биосферной нестабильности; B – путь к устойчивому развитию; N – общая мощность; P – полезная мощность; G – потерянная мощность; P_{em} – мощность чрезвычайной ситуации природного или техногенного характера

Fig. 2. Schematic representation of the Society's life in cooperation with the Nature, with a view to emergencies of different origins

A – the path to degradation or biosphere instability; B – the path to sustainable development; N – total power; P – useful power; G – lost power; P_{em} – power of a natural or man-made emergency

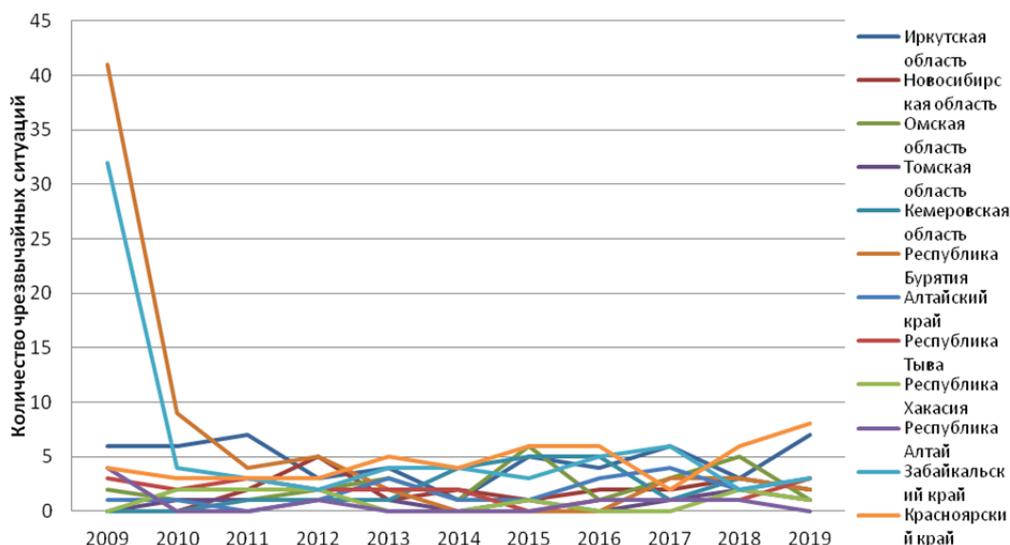


Рис. 3. Количество техногенных катастроф в Сибирском федеральном округе за период с 2009 по 2019 г. [Официальный сайт Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий]

Fig. 3. The number of man-made disasters in the Siberian Federal District for the period from 2009 to 2019 [Official site EMERCOM of Russia]

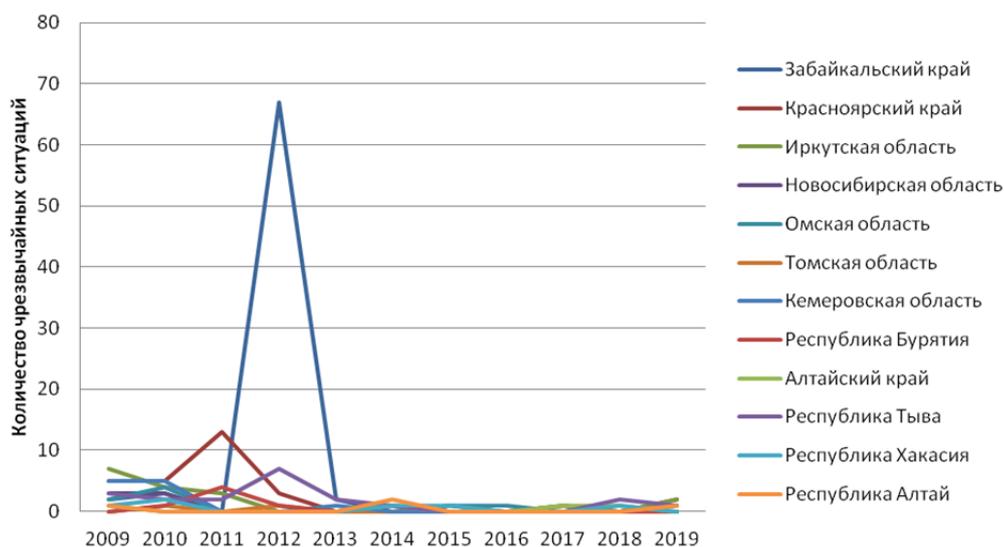


Рис. 4. Количество природных катастроф в Сибирском федеральном округе за период с 2009 по 2019 г. [Официальный сайт Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий]

Fig. 4. The number of natural disasters in the Siberian Federal District for the period from 2009 to 2019 [Official website of the EMERCOM of Russia]

Полезная мощность субъектов Сибирского федерального округа за период с 2009 по 2019 г., ГВт

Таблица 2

Net power of the subjects of the Siberian Federal District for the period from 2009 to 2019, GW

Table 2

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	Полезная мощность										
Республика Алтай	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Республика Тыва	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Республика Хакасия	0,6	0,8	0,9	1,04	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.		2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	Полезная мощность										
Алтайский край	2,2	2,5	2,7	3,0	3,4	3,6	4,0	4,1	4,2	4,5	4,6
Красноярский край	5,9	8,3	9,2	9,3	9,9	11,1	13,1	13,8	14,9	17,9	18,3
Иркутская область	3,8	4,5	5,2	6,03	6,6	7,5	8,2	8,7	9,8	11,4	11,7
Кемеровская область	4,03	4,9	5,9	5,7	5,3	5,9	6,6	6,8	8,3	9,8	7,9
Новосибирская область	3,4	3,9	4,7	5,8	6,5	7,3	8,2	8,3	9,2	9,9	10,3
Омская область	2,3	3,05	3,6	3,9	4,4	4,8	4,9	4,9	5,2	5,4	5,8
Томская область	1,9	2,3	2,7	2,9	3,2	3,4	3,7	3,8	4,1	4,6	4,8
Республика Бурятия	0,9	1,1	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,8	0
Забайкальский край	1,2	1,3	1,6	1,8	1,8	1,9	1,0	2,2	2,4	2,6	0

По данным табл. 2 видно, что за исследуемый период полезная мощность хроноцелостно росла. В целом рост полезной мощности субъектов СФО свидетельствует о поступательном устойчивом развитии в отношении данного показателя. В табл. 3 представлены результаты расчета валюты субъектов СФО. В табл. 4 представлены результаты расчёта мощности валюты субъектов СФО.

Далее по формуле (2) нами была рассчитана мощность катастроф в субъектах СФО.

Анализ табл. 4 показывает, что четкой тенденции на увеличение мощности катастроф нет. За рассматриваемый период с 2009 по 2019 г. мощность катастроф была нулевой в ряде лет наблюдений. Это связано с тем, что в данные годы катастрофы не происходили. Несмотря на то, что мощность катастроф не столь велика, это не говорит о том, что этими значениями можно пренебречь. Ведь такие значения получились в результате деления на всю площадь исследуемого региона. А когда происходит настоящая катастрофа природного или техногенного генезиса, она затрагивает незначительную площадь, особенно опасной она становится в районе города, где плотность населения максимальна в конкретном регионе.

По формуле (4) нами был рассчитан коэффициент мощностной нагрузки катастроф. В качестве исходных данных для расчёта данного показателя мы использовали данные по мощности катастроф (табл. 4) и площади субъектов СФО [Кнауб, Игнатъева, 2020].

По данным из табл. 5 следует, что коэффициент мощностной нагрузки для всех субъектов СФО изменяется от нулевых значений до 0,6 кВт на км². Нулевые значения мощностной нагрузки катастроф объясняются отсутствием проявления природных или техногенных катастроф в конкретный рассматриваемый год.

Далее по формуле (5) нами была рассчитана неустойчивость биосферы с учётом мощности катастроф. В качестве основы для расчётов послужили данные о полной мощности (табл. 6) и мощности катастроф (табл. 4), поделённые на константу Федотова (70 кВт на км²). Результаты расчётов представлены в табл. 6.

В таблице 6 отражены данные по полной мощности субъектов СФО за период с 2009 по 2019 г. [Электронный атлас параметров...]. Анализ табл. 6 показывает, что для всех субъектов СФО характерен рост полной мощности за рассматриваемый период времени. В целом рост полной мощности субъектов СФО свидетельствует о поступательном устойчивом развитии в отношении данного показателя.

Таблица 3

Мощность валюты субъектов СФО, Вт/рубль

Table 3

Currency power of SFD subjects, W/ruble

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	Мощность валюты										
Республика Алтай	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02
Республика Тыва	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95
Республика Хакасия	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02
Алтайский край	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13	8,13
Красноярский край	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88
Иркутская область	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18
Кемеровская область	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	Мощность валюты										
Новосибирская область	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98
Омская область	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96
Томская область	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95
Республика Бурятия	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	7,93	0
Забайкальский край	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91	0

Таблица 4

Мощность катастроф в субъектах СФО, кВт

Table 4

Power of disasters in the subjects of the Siberian Federal District, kW

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	Мощность катастроф										
Республика Алтай	3 740,2	0	79 491	943 901	0	944 001	0	0	103 229	0	0
Республика Тыва	138,1	477,41	8 417,4	10 4678	0	10 4678	0	62,8	0	4 698,8	0
Республика Хакасия	1246,7	0	1 072,2	5 747,3	0	0	22,8	0	0	2 487,4	23,6
Алтайский край	811,2	172 075	38 840	183 863	0	3195,6	0	823,5	5 592,4	6 0657	0
Красноярский край	1737,1	950,9	16 648	91 571	342,3	13 313	566,7	85 579	91 571	114,6	4 303,4
Иркутская область	0	158,9	13 031	41 464	0	5 134,2	0	13 741	41 244	65 160	611,2
Кемеровская область	1 085,9	0	11 785	147 471	0	147 471	3 974,1	88,9	19,06	159,5	1976,8
Новосибирская область	187,9	200,4	1 340,6	5 863,9	0	4 009,5	0	0	0	0	0
Омская область	4 143	13 332	31 009	120 284	0	0	52 627	89 852	41 429	648,4	0
Томская область	0	71 830	12 193	71 830,8	0	38630	0	0	0	0	0
Республика Бурятия	680,3	15245	182748	126711	0	782992	0	0	0	0	0
Забайкальский край	64 463	32 863	50 571	125 159	2 540,6	2 540,6	125 159	12 914	24 559	198 808	0

Таблица 5

Коэффициент мощностной нагрузки катастроф, К_ц, кВт/км² [Шамаева, Кнауб, 2021]

Table 5

Power load factor of catastrophes, kW/km² [Shamaeva, Knaub, 2021]

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	К _ц										
Республика Алтай	0,002	0	0,06	0,6	0	0,6	0	0	0,07	0	0
Республика Тыва	0,000004	0,0002	0,003	0,04	0	0,04	0	0,000002	0	0,002	0
Республика Хакасия	0,001	0	0,001	0,006	0	0	2,3	0	0	0,003	0,000002
Алтайский край	0,0003	0,07	0,026	0,07	0	0,001	0	0,0003	0,002	0,02	0
Красноярский край	0,00004	0,00002	0,0004	0,002	0,0008	0,0003	0,00001	0,002	0,002	0,000003	0,0001
Иркутская область	0	0,00001	0,001	0,004	0	0,0004	0	0,001	0,004	0,006	0,00005
Кемеровская область	0,0007	0	0,007	0,1	0	0,1	0,003	0,00005	0,00001	0,0001	0,001
Новосибирская область	0,00007	0,00007	0,0005	0,002	0	0,001	0	0	0	0	0
Омская область	0,002	0,006	0,01	0,05	0	0	0,02	0,04	0,02	0,0002	0
Томская область	0	0,01	0,002	0,01	0	0,007	0	0	0	0	0
Республика Бурятия	0,0001	0,002	0,03	0,2	0	0,14	0	0	0	0	0
Забайкальский край	0,008	0,004	0,007	0,02	0,0004	0,0004	0,02	0,002	0,004	0,03	0

Таблица 6

Полная мощность субъектов Сибирского федерального округа за период с 2009 по 2019 г., ГВт

Table 6

Full capacity of the subjects of the Siberian Federal District for the period from 2009 to 2019, GW

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	Полная мощность										
Республика Алтай	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6
Республика Тыва	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	2,01	1,9
Республика Хакасия	2,2	2,7	3,1	3,6	3,9	4,4	4,7	5,4	5,7	6,5	6,8
Алтайский край	7,4	8,4	9,2	10,2	11,5	12,4	13,5	13,9	14,3	15,3	15,8
Красноярский край	20,1	28,3	31,4	31,7	33,7	37,6	44,7	46,8	50,9	61,2	62,2
Иркутская область	12,7	15,1	17,6	20,5	22,4	25,4	27,8	29,6	33,2	38,7	39,8
Кемеровская область	13,7	16,7	20,1	19,2	17,8	20,1	22,5	23,1	28,3	33,2	26,8
Новосибирская область	11,5	13,1	16,2	19,7	22,1	24,7	27,7	28,4	31,1	33,9	34,9
Омская область	9,1	10,3	12,2	13,3	14,9	16,3	16,7	16,8	17,6	18,4	19,7
Томская область	6,6	7,6	8,9	9,9	10,8	11,5	12,7	12,9	13,7	15,5	16,3
Республика Бурятия	3,3	3,6	4,1	4,5	4,8	5,08	5,5	5,4	5,5	6,2	–
Забайкальский край	4,02	4,5	5,5	6,06	6,2	6,4	6,7	7,5	8,1	8,8	–

Таблица 7

Неустойчивость биосферы с учётом мощности катастроф, кВт/км² [Шамаева, Кнауб, 2021]

Table 7

Instability of the biosphere, taking into account the power of catastrophes, kW/km² [Shamaeva, Knaub, 2021]

Субъект России	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
	N _{биос}										
Республика Алтай	4,3	0	97,4	1156,7	0	1156,8	0	0	126,5	0	0
Республика Тыва	0,4	1,6	28,1	349,1	0	349,0	0	0,21	0	15,7	0
Республика Хакасия	3,5	0	3,4	18,2	0	0	0,1	0	0	7,8	0,1
Алтайский край	2,5	555,2	125,3	593,2	0	10,3	0	2,6	18,04	195,7	0
Красноярский край	5,1	2,8	50,3	276,8	1,03	40,2	1,7	258,7	276,8	0,3	13,0
Иркутская область	0	0,5	42,3	134,7	0	16,6	0	44,6	133,9	211,6	1,9
Кемеровская область	3,6	0	35,4	443,1	0	443,1	11,9	0,2	0,1	0,4	5,9
Новосибирская область	0,6	0,6	4,1	18,1	0	12,3	0	0	0	0	0
Омская область	13,1	41,0	95,3	369,9	0	0	161,8	276,3	127,4	1,9	0
Томская область	0	219,7	37,3	219,7	0	118,1	0	0	0	0	0
Республика Бурятия	2,1	47,1	564,7	3916	0	2420	0	0	0	0	0
Забайкальский край	186,3	100,5	154,8	383,1	7,7	7,7	383,1	39,5	75,1	609	0

Из табл. 7 следует, что количественные значения неустойчивости биосферы с учётом плотности катастроф изменяются от около нулевых до 1 156,8 кВт на км².

В соответствии с классификацией Федотова [Федотов, 2008] количественные значения неустойчиво-

сти биосферы с учётом мощности катастроф могут изменяться в следующих пределах: 1) до 15 кВт на км² – нагрузка в пределах нормы; 2) от 15 до 70 – допустимая нагрузка; 3) от 70 до 125 – нагрузка значительная; 4) более 125 кВт на км² – экологическая катастрофа.

По результатам проведенного исследований было проведено районирование субъектов СФО по величине неустойчивости биосферы с учётом плотности

катастроф (рис. 5). Районирование проводилось по средним значениям показателя за временной интервал с 2009 по 2019 г.



Легенда

Группировка субъектов Сибирского федерального округа по значениям неустойчивости биосферы субъектов с учетом воздействия катастроф различного генезиса

- до 15 кВт на км²
- от 15 до 70 кВт на км²
- от 70 до 125 кВт на км²
- более 125 кВт на км²

Рис. 5. Неустойчивость биосферы Сибирского федерального округа с учётом воздействия катастроф различного генезиса (средние значения за период с 2009 по 2019 г.)

Fig. 5. Instability of the biosphere of the Siberian Federal District, taking into account the impact of disasters of various origins (average values for the period from 2009 to 2019)

Нагрузка в пределах нормы (до 15 кВт на км²) отмечалась всего лишь у двух субъектов – Новоси-

бирской области и Республики Хакасия. Допустимая нагрузка (от 15 до 70 кВт на км²) отмечалась у Том-

ской и Иркутской областей и Республики Тыва. Нагрузка значительная (от 70 до 125 кВт на км²) отмечалась у Омской области и Красноярского края. Значения, равные экологической катастрофе (более 125 кВт на км²), отмечались в Алтайском и Забайкальских краях, республиках Бурятия и Алтай.

Следует отметить, что основной вклад в неустойчивость биосферы вносит антропогенная нагрузка. Процент роли катастроф в данном случае минимален.

Обсуждение

В качестве интегрированного показателя предложен коэффициент неустойчивости биосферы с учётом плотности катастроф. Отдельно рассматривается энергоэкологический баланс катастроф различного генезиса как основа сбалансированного развития общества. Превышение нагрузки мощности катастроф порога в 70 кВт/км² приведёт к изменению мощности системы «природа–общество–человек», что явится причиной неустойчивого развития системы.

Полученные показатели для СФО получены впервые. Сравнение полученных результатов по СФО с данными других методик затруднено в связи с тем, что только методика Научной школы устойчивого развития использует энергоэкологический подход к оценке потенциала устойчивого развития региона в системе «природа–общество–человек». Для всех регионов мира разработан «Электронный атлас параметров устойчивого инновационного развития» [<http://it-gis.ru/>], отражающий динамику базовых и дополнительных индикаторов устойчивого инновационного развития всех стран мира. Сравнение индикаторов по федеральным округам России в этом интернет-источнике отсутствует.

В большинстве литературных источников, в которых упоминается энергоэкологический подход развития регионов и стран, имеется ввиду экологический подход в электроэнергетике, выражающийся в сокращении потребления электроэнергии [Кузык,

Яковец, 2007; Прогноз и стратегия..., 2009; Энергоэкология...].

Отчасти полученные результаты можно сравнить со следующей методикой [Рейтинги устойчивого развития..., 2009; Методика оценки..., 2010]. Специалисты эколого-энергетического агентства предложили свою систему индикаторов устойчивого развития регионов. По сути полную, полезную мощность и мощность потерь они назвали потоками «Э», «П» и «В» соответственно. Однако эти потоки не были представлены в одной единице измерения, что затрудняет их сравнение. Единственное, что поддаётся сравнению, так это показатель «энергетическая эффективность», что соответствует показателю «коэффициент совершенства технологий».

Заключение

Таким образом, резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Усовершенствована и апробирована методика оценки энергоэкологической ёмкости территорий под действием катастроф различного генезиса.

2. Установлено, что антропогенная нагрузка по субъектам СФО изменяется в широком диапазоне. В пределах нормы (до 15 кВт на км²) отмечалась всего лишь у двух субъектов – Новосибирской области и Республики Хакасия. Допустимая нагрузка (от 15 до 70 кВт на км²) отмечалась у Томской и Иркутской областей и Республики Тыва. Нагрузка значительная (от 70 до 125 кВт на км²) отмечалась у Омской области и Красноярского края. Значения, равные экологической катастрофе (более 125 кВт на км²), отмечались в Алтайском и Забайкальском краях, республиках Бурятия и Алтай.

3. Установление количественных значений антропогенной нагрузки с учётом воздействия катастроф позволит следить за изменениями в системе «природа–общество–человек». Это даст возможность спасательным службам следить за безопасностью среды обитания человека.

Список источников

- Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. М. : Деловой экспресс, 2004. 352 с.
- Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные ЧС: опасности, угрозы, риски. М., 2001. 344 с.
- Баринов А.В., Седнев В.А., Шевчук А.Б. и др. Опасные природные процессы : учебник. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. 334 с.
- Бобылев С.Н. Экономика природопользования : учебник. М. : ИНФРА-М, 2014. 500 с.
- Большаков Б.Е. Наука устойчивого развития. М. : РАЕН, 2011. 270 с.
- Воробьев Ю.Л., Шолох В.П., Шахрамьян М.А., Фалеев М.И., Локтионов Н.И., Шойгу С.К. Катастрофы и человек. Книга 1. Российский опыт противодействия чрезвычайным ситуациям. М. : АСТ-ЛТД, 1997. 256 с.
- Восточная Сибирь // Географический справочник. URL: <http://tui-tur.ru/ii.-vostochnaya-sibir.html> (дата обращения: 06.05.2020).
- Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2017 году». М. : МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018. 376 с.
- Закономерности в природных катастрофах. М. : Знание, 1985. 48 с.

- Игнатьева А.В., Кнауб Р.В.** Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 66–77.
- Кнауб Р.В.** Энергоэкология чрезвычайных ситуаций различного генезиса // Технологии техносферной безопасности. 2014а. Вып. 3 (55). URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2014-3/18-03-14.ttb.pdf> (дата обращения: 18.08.2020).
- Кнауб Р.В.** Энергоэкологическая безопасность от чрезвычайных ситуаций различного генезиса как основа устойчивого развития региона. Томск : Изд-во ТПУ, 2014б. 124 с.
- Кузык Б.Н., Яковец Ю.В.** Глобальная энергоэкологическая революция XXI века. М. : Институт экономических стратегий, 2007. 200 с.
- Махутов Н.А., Лебедев М.П., Большаков А.М., Гаденин М.М.** Научные основы анализа и снижения рисков чрезвычайных ситуаций в районах Сибири и Севера // Арктика: экология и экономика. 2013. № 4 (12). С. 4–15.
- Методика** оценки экологической и энергетической эффективности экономики России. М. : Интерфакс, 2010. 101 с.
- Миркин Б.М., Наумова Л.Г.** Устойчивое развитие : вводный курс. М. : Университетская книга, 2006. 312 с.
- Одум Г., Одум Э.** Энергетический базис человека и природы. М. : Прогресс, 1978. 379 с.
- Олтян И.Ю., Яховец Т.Л.** Разработка терминологии и индикаторов прогресса в области реализации Сендайской рамочной программы по уменьшению риска бедствий на 2015–2030 годы // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т. 13, № 1 (47). С. 22–26.
- Официальный сайт** Института мировых ресурсов (World Resources Institute). URL: <https://www.wri.org/> (дата обращения: 10.09.2020).
- Официальный сайт** Института наблюдения за мировыми процессами (WorldWatch Institute). URL: <http://www.worldwatch.org/> (дата обращения: 15.06.2019).
- Официальный сайт** Международного института по устойчивому развитию (International Institute for Sustainable Development). URL: <https://www.nature.com/> (дата обращения: 01.09.2020).
- Официальный сайт** Центра исследований мира (Centro de Investigacion parala Paz – CIP). URL: ceipaz.org/ (дата обращения: 10.10.2019).
- Официальный сайт** Исследовательского совета Норвегии (The Research Council of Norway). URL: <https://www.forskningsradet.no/en/> (дата обращения: 10.10.2019).
- Официальный сайт** Института развивающихся экономик (Institute of Developing Economies – IDE). URL: <https://www.ide.go.jp/English.html> (дата обращения: 01.09.2020).
- Официальный сайт** Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. URL: www.mchs.gov.ru (дата обращения: 15.12.2019).
- Порфирьев Б.Н.** Финансовые механизмы управления природными рисками // Экономика и управления. 2009. № 2 (41). С. 7–15.
- Прогноз** и стратегия энергоэкологического партнёрства России, Казахстана и ЕврАзЭС. Часть 10. Глобальный прогноз «Будущее цивилизаций» на период до 2050 года / под ред. Ю.В. Яковца, А.Т. Спицина, Н.С. Бектурганова. М. : МИСК, 2009. 164 с.
- Регионы** России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. 2019 : стат. сб. М., 2019. 766 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Reg_sub19.pdf (дата обращения: 10.09.2020).
- Рейтинги** устойчивого развития регионов Российской Федерации. М. : Интерфакс, 2009. 96 с.
- Сибирский** региональный центр МЧС России // МЧС России. 2016. URL: http://siberian.mchs.ru/Regionalnij_centr/Region (дата обращения: 06.05.2016).
- Современные** системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / под общ. ред. В.А. Пучкова. М. : ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013. 352 с.
- Советский** Союз. Географическое описание : в 22 т. Российская Федерация. Восточная Сибирь / отв. ред. В.В. Покшишевский, В.В. Воробьев. М. : Мысль, 1969. 493 с.
- Тарасова Н.П., Кручина Е.Б.** Индексы и индикаторы устойчивого развития // Устойчивое развитие: природа-общество-человек : сб. ст. Т. 1. М., 2006. С. 127–144.
- Трунов И.Л., Айвар Л.К., Харисов Г.Х.** Эквивалент стоимости человеческой жизни // Представительная власть – XXI век. 2006. № 1–3. С. 17–18.
- Федотов А.П.** Развитие глобальной модели планеты Земля. Концентрированный доклад Римскому Клубу. М. : Аспект Пресс, 2008. 64 с.
- Фролов О.П.** Стоимость человеческой жизни в России и за рубежом // Справочник специалиста по охране труда. 2010. № 2. С. 11–17.
- Шамаева Е.Ф., Кнауб Р.В.** К вопросу оценки последствий катастроф различного генезиса в системе «природа-общество-человек» // Геосферные исследования. 2021. № 3. С. 104–114.
- Шокин Ю.И., Махутов Н.А., Москвичев В.В.** Природно-техногенная безопасность регионов Сибири: состояние проблемы и направления действий // Труды Международной конференции RDAMM–2001. 2001. Т. 6, ч. 2, спец. вып. С. 427–436.
- Шойгу С.К., Воробьев Ю.Л., Владимиров В.А.** Катастрофы и государство. М. : Энергоатомиздат, 1997. 512 с.
- Электронный атлас** параметров устойчивого инновационного развития. URL: <http://it-gis.ru/> (дата обращения: 10.06.2020).
- Энергоэкология** как основа устойчивого развития России: опыт, методология и перспективы / Белозеров Д.А., Денисова Н.Н., Закирова А.Н. и др. ; под общ. ред. О.Л. Кузнецова, А.Т. Спицина. Дубна : Государственный университет «Дубна», 2017. 202 с.
- Bostrom N.** Existential Risks. Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards // Journal of Evolution and Technology. March 2002. V. 9. P. 1–27.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters.** URL: <http://www.cred.be> (дата обращения: 10.10.2019).
- Bryant E.** Natural hazards. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. 312 p.
- Ignateva A.V., Knaub R.V.** Assessment of spatial and temporary features of distribution of natural and man-made emergency situations on the territory of Siberian Federal District // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. P. 1–6.

Knaub R.V., Ignateva A.V. Assessment of sustainable development on territories under the impact of different genesis disasters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "Earth Science" – Chapter 1. 2020. С. 022001.

Index for risk-management. Results 2015. URL: www.informindex.org (дата обращения: 05.09.2019).

Knaub R.V. Energy-environmental limits of existence of the regions under the effect of emergency situations of different origin // European science review. 2015. № 7–8. P. 135–136.

Kuzmin S.B. Global Environmental Risk Assessments // Problems of Modern Science and Education Journal. 2015. No. 10 (40). P. 120–125.

Lephowski W. The social thermodynamics of Ilya Prigogin // Chem. Engr. News. 1979. No. 57 (16). P. 30–33.

Mladjan D., Kekic D., Subosic D. Some aspects of natural, technological and social security in modern world. Books o international scientific conferences about civil planning in Belgrade // The Ministry of Deense. 2009. P. 342–351.

Paul B. Environmental Hazards and Disasters: Contexts, Perspectives and Management focuses. Wiley, 2011. 1st ed. 334 p.

Prigogin I., Nicolis G., Babloyantz A. Thermodynamics and evolution // Physics Today. 1972. No. 25 (11). P. 23–38.

The International Disaster Database Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED. URL: <http://www.emdat.be> (дата обращения: 19.08.2019).

Odum H.T. Energy, ecology and economics // Ambio. 1973. No. 2 (6). P. 220–227.

Odum E.P. Ecology: The Link Between the Natural and the Social Sciences. 2nd ed. New York : Holt, Rinehart and Winston, 1975. 244 p.

Odum E.P. Energy, ecosystem development and environmental risk // Risk Insurance. 1976. No. 43 (1). P. 1–16.

Official website of the EMERCOM of Russia. URL: www.mchs.gov.ru (дата обращения: 15.12.2019).

Zhernov E., Nehoda E. The Regioal-Matrix Approach to the Training of Highly Qualified Personnel for the Sustainable Development of the Mining Region // E3S Web of Conferences. 2017. V. 21. P. 1–7.

Wesley J.P. Ecophysics: the Application of Physics to Ecology. Springfield, Ill : Charles C Thomas, 1974. 340 p.

Tian Q., Brown D.G., Bao S., Qi Sh. Assessing and mapping human well-being for sustainable development amid flood hazards: Poyang Lake Region of China // Applied Geography. 2015. V. 63. P. 66–76.

References

Akimov V.A., Lesnykh V.V., Radaev N.N. *Riski v prirode, tekhnosfere, obshchestve i ekonomike* [Risks in nature, technosphere, society and economy] Russian Emergency Situations Ministry. Moscow: Business Express, 2004. 352 p. In Russian

Akimov V.A., Novikov V.D., Radaev N.N. *Prirodnye i tekhnogennye CHS: opasnosti, ugrozy, riski* [Natural and man-made emergencies: hazards, threats, risks]. Moscow, 2001. 344 pp. In Russian

Barinov A.V., Sednev V.A., Shevchuk A.B., and others. *Opasnye prirodnye processy: Uchebnik* [Dangerous natural processes: Textbook]. Moscow: Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2009. 334 p. In Russian

Bobylev S.N. *Ekonomika priropol'zovaniya : uchebnik* [Economics of nature management: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2014. 500 p. In Russian

Bolshakov B.E. *Nauka ustojchivogo razvitiya* [Sustainable Development Science]. Moscow : RAYEN, 2011. 270 pp. In Russian

Vorobiev Yu.L., Sholokh V.P., Shakhramanyan M.A., Faleev M.I., Loktionov N.I., Shoigu S.K. *Rossiiskij opyt protivodejstviya chrezvychajnym situacijam* [Disasters and people. Book 1]. Russian experience in countering emergency situations. Moscow: Publishing house AST-LTD. 1997. 256 p. In Russian

Vostochnaya Sibir' [Eastern Siberia] Electronic resource // Geographical reference book. URL: <http://rui-tur.ru/ii-vostochnay-sibir.html> (Date of accessed: 05.06.2020).

Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorij Rossijskoj Federacii ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tekhnogennogo haraktera v 2017 godu» [State report «On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2017»]. Moscow: EMERCOM of Russia. FSBI VNII GOChS (FC), 2018. 376 p.

Zakonomernosti v prirodnyh katastrofah [Regularities in natural disasters]. Moscow: Znaniye, 1985. 48 pp.

Ignatieva A.V., Knaub R.V. *Prirodnye usloviya razvitiya chrezvychajnyh situacij na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga* [Natural conditions for the development of emergency situations on the territory of the Siberian Federal District] // Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research. 2020. No. 1. pp. 66–77. doi: 10.17223/25421379/14/5 In Russian

Knaub R.V. *Energoekologiya chrezvychajnyh situacij razlichnogo genezisa* [Energy ecology of emergency situations of various genesis] // Scientific Internet-journal "Technologies of technosphere safety", iss. 3 (55), 2014a. [Electronic resource]. URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2014-3/18-03-14.ttb.pdf> (Date of accessed: 08.18.2020). In Russian

Knaub R.V. *Energoekologicheskaya bezopasnost' ot chrezvychajnyh situacij razlichnogo genezisa kak osnova ustojchivogo razvitiya regiona: monografiya* [Energy-ecological safety from emergencies of various genesis as the basis for sustainable development of the region: monograph]. Tomsk: TPU Publishing House, 2014b. 124 p. In Russian

Kuzyk B.N., Yakovets Yu.V. *Global'naya energoekologicheskaya revolyuciya XXI veka* [Global energy-ecological revolution of the XXI century]. Moscow: Institute for Economic Strategies, 2007. 200 p. In Russian

Makhutov N.A., Lebedev M.P., Bolshakov A.M., Gadenin M.M. *Nauchnye osnovy analiza i snizheniya riskov chrezvychajnyh situacij v rajonah Sibiri i Severa* [Scientific basis for the analysis and reduction of the risks of emergencies in the regions of Siberia and the North] // Arctic: ecology and economics. No. 4 (12). 2013. pp. 4–15. In Russian

Metodika ocenki ekologicheskoy i energeticheskoy effektivnosti ekonomiki [Methodology for assessing the environmental and energy efficiency of the Russian economy]. Moscow: "Interfax", 2010. 101 p. In Russian

Mirkin B.M., Naumova L.G. *Ustoychivoye razvitiye: vvodny kurs* [Sustainable Development: An Introductory Course]. Moscow: Universitetskaya kniga, 2006. 312 p. In Russian

Odum G., Odum E. *Energeticheskij bazis cheloveka i prirody* [Energy basis of man and nature]. Moscow: Progress, 1978. 379 p. In Russian

- Oltyan I.Yu., Lyakhovets T.L. *Razrabotka terminologii i indikatorov progressa v oblasti realizatsii Sendayskoy ramochnoy programmy po umen'sheniyu riska bedstviy na 2015–2030 gody* [Development of terminology and indicators of progress in the implementation of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030] // *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Civil Security Technologies]. T. 13, No. 1 (47). 2016. pp. 22–26. In Russian
- Official site of the World Resources Institute [Electronic resource]. URL: <https://www.wri.org/> (Date of accessed: 09.10.2020).
- Official site of the WorldWatch Institute [Electronic resource]. URL: <http://www.worldwatch.org/> (Date of accessed: 15.06.2019).
- Official site of the International Institute for Sustainable Development [Electronic resource]. URL: <https://www.nature.com/> (Date of accessed: 01.09.2020).
- Official site of the Center for Peace Research (Centro de Investigacion parala Paz - CIP) [Electronic resource]. URL: ceipaz.org/ (Date of accessed: 10.10.2019).
- Official site of The Research Council of Norway [Electronic resource]. URL: <https://www.forskingsradet.no/en/> (Date of accessed: 10.10.2019).
- Official site of the Institute of Developing Economies (IDE) [Electronic resource]. URL: <https://www.ide.go.jp/English.html> (Date of accessed: 01.09.2020).
- Porfiriev B.N. *Finansovyye mekhanizmy upravleniya prirodnyimi riskami* [Financial Mechanisms of Natural Risk Management] // *Ekonomika i upravleniya* [Economics and Management], 2009. No. 2 (41). pp. 7–15. In Russian
- Prognoz i strategiya energoekologicheskogo partnerstva Rossii, Kazakhstana i EvrAzES. Chast' 10. Global'nyy prognos «Budushcheye tsivilizatsii» na period do 2050 goda* [Forecast and strategy of energy-ecological partnership between Russia, Kazakhstan and EurAsEC. Part 10. Global forecast "The future of civilizations" for the period up to 2050]. Ed. Yu.V. Yakovets, A.T. Spitsina, N.S. Bekturganov. Moscow: MISK, 2009.164 pp. In Russian
- Regiony Rossii. Osnovnyye kharakteristiki sub'yektov Rossiyskoy Federatsii. 2019* [Regions of Russia. The main characteristics of the constituent entities of the Russian Federation. 2019: stat. Sat.] Electronic resource / Rosstat. M., 2019.766 p. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Reg_sub19.pdf (Date of accessed: 09.10.2020). In Russian
- Reytingi ustoychivogo razvitiya regionov Rossiyskoy Federatsii* [Sustainable development ratings of the regions of the Russian Federation]. Moscow: Interfax, 2009. 96 p.
- Sibirskiy regional'nyy tsentr MChS Rossii* [Siberian regional center EMERCOM of Russia] Electronic resource / EMERCOM of Russia. 2016. URL: http://siberian.mchs.ru/Regionalnij_cent/Region (Date of accessed: 05.06.2016).
- Sovremennyye sistemy monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy* [Modern systems for monitoring and forecasting emergencies] / ed. V.A. Puchkov. Moscow: FKU TsSI GZ EMERCOM of Russia, 2013. 352 p.
- Sovetskiy Soyuz. Geograficheskoye opisaniye v 22-kh tomakh. Rossiyskaya Federatsiya. Vostochnaya Sibir'* [Soviet Union. Geographical description in 22 volumes. Russian Federation. Eastern Siberia] / Main editor V.V. Pokshishevsky, V.V. Vorobiev. Moscow: Mysl', 1969. 493 p. In Russian
- Tarasova N.P., Kruchina E.B. *Indeksy i indikatory ustoychivogo razvitiya* [Indices and indicators of sustainable development] / *Mat. sb. «Ustoychivoye razvitiye: priroda-obshchestvo-chelovek»* [Sustainable Development: Nature-Society-Man]. V.1. Moscow. 2006. pp. 127–144. In Russian
- Trunov I.L., Aivar L.K., Kharisov G.Kh. *Ekvivalent stoimosti chelovecheskoj zhizni* [Equivalent to the cost of human life] // *Representative power – XXI century*. Moscow, No. 1–3. 2006. pp. 17–18. In Russian
- Fedotov A.P. *Razvitiye global'noy modeli planety Zemlya. Kontsentrirovanny doklad Rimskomu Klubu* [Development of the global model of the planet Earth]. Concentrated report to the Club of Rome. Moscow: Aspect Press, 2008. 64 pp. In Russian
- Frolov O.P. *Stoimost' chelovecheskoj zhizni v Rossii i za rubezhom* [The cost of human life in Russia and abroad] // *Spravochnik spetsialista po okhrane truda* [Handbook of a specialist in labor protection]. 2010. No. 2. pp. 11–17. In Russian
- Shamaeva E.F., Knaub R.V. *K voprosu ocenki posledstviy katastrof razlichnogo genezisa v sisteme «priroda-obshchestvo-chelovek»* [On the Issue of Assessing the Consequences of Disasters of Various Genesis in the "Nature-Society-Man" System] // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2021. No. 3. pp. 104–114. In Russian
- Shokin Yu.I., Makhutov N.A., Moskvichev V.V. *Prirodno-tekhnogennaya bezopasnost' regionov Sibiri: sostoyaniye problemy i napravleniya deystviy* [Natural and technogenic safety of Siberian regions: the state of the problem and directions of action] // *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii RDAMM–2001* [Proceedings of the International Conference RDAMM – 2001]. V. 6, Part 2, Spec. Iss. 2001. pp. 427–436. In Russian
- Shoigu S.K., Vorobiev Yu.L., Vladimirov V.A. *Katastrofy i gosudarstvo* [Disasters and the state]. Moscow: Energoatomizdat, 1997. 512 p. In Russian
- Elektronnyy atlas parametrov ustoychivogo innovatsionnogo razvitiya* [Electronic atlas of parameters of sustainable innovative development]. URL: <http://it-gis.ru/> (Date of accessed: 10.06.2020).
- Energoekologiya kak osnova ustoychivogo razvitiya Rossii: opyt, metodologiya i perspektivy: Monografiya* [Energy ecology as the basis for sustainable development of Russia: experience, methodology and prospects: Monograph] / Belozero D.A., Denisova N.N., Zakirova A.N. and etc.; Ministry of Education of the Moscow Region; State University "Dubna"; Russian Academy of Natural Sciences; Under the general ed. O. L. Kuznetsova, AT Spitsyna. Dubna: State University "Dubna", 2017. 202 p. In Russian
- Bostrom N. *Existential Risks. Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards* / *Journal of Evolution and Technology*, March 2002. 2002. V. 9. pp. 1–27.
- Center for Research on the Epidemiology of Disasters [Electronic resource]. URL: <http://www.cred.be> (Date of accessed: 10.10.2019).
- Bryant E. *Natural hazards*. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 312 p.
- Ignateva A.V., Knaub R.V. *Assessment of spatial and temporary features of distribution of natural and man-made emergency situations on the territory of Siberian Federal District* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 272. pp. 1–6.
- Knaub R.V., Ignateva A.V. *Assessment of sustainable development on territories under the impact of different genesis disasters* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "Earth Science" –Chapter 1*. 2020, pp. 022001.
- Index for risk-management. Results 2015 // URL: www.informindex.org (Date of accessed: 05.09.2019).

Knaub R.V. Energy-environmental limits of existence of the regions under the effect of emergency situations of different origin // "European science review", № 7-8 2015 July-August, Vienna: "East West" Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2015. pp. 135–136.

Kuzmin S. B. Global Environmental Risk Assessments / Problems of Modern Science and Education Journal, Ivanovo: Olimp, No. 10 (40), 2015. pp. 120–125.

Lephowski W. The social thermodynamics of Ilya Prigogin. Chem. Engr. News, 57 (16). 1979. pp. 30–33.

Mladjan D., Kekic, D., Subotic D. Some aspects of natural, technological and social security in modern world. Books o international scientific conferences about civil planning in Belgrade, The Ministry of Deense. 2009. pp. 342–351.

Paul B. Environmental Hazards and Disasters: Contexts, Perspectives and Management focuses; Publisher: Wiley. 2011. 1st ed. 334 p.

Prigogin I., Nicolis G., Babloyantz A. Thermodynamics and evolution, Physics Today. 25 (11). 23–38; 25 (12). 1972. pp. 138–144.

The International Disaster Database Center for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED [Electronic resource]. URL: <http://www.emdat.be> (Date of accessed: 19.08.2019).

Odum H.T. Energy, ecology and economics. Ambio. 2 (6). 1973. pp. 220–227.

Odum E.P. Ecology: The Link Between the Natural and the Social Sciences (2nd ed.). New York: Holt, Rinehart and Winston. 1975. 244 p.

Odum E.P. Energy, ecosystem development and environmental risk, Risk Insurance. 1976. 43 (1). pp. 1–16.

Official website of the EMERCOM of Russia URL: www.mchs.gov.ru (Date of accessed: 15.12.2019).

Zhernov E., Nehoda E. The Regional-Matrix Approach to the Training of Highly Qualified Personnel for the Sustainable Development of the Mining Region // E3S Web of Conferences. 2017. V. 21. pp. 1–7.

Wesley J.P. Ecophysics: the Application of Physics to Ecology, Springfield, Ill. Charles C Thomas. 1974. 340 p.

Tian Q., Brown D.G., Bao S., Qi Sh. Assessing and mapping human well-being for sustainable development amid flood hazards: Poyang Lake Region of China / Applied Geography. V. 63. 2015. pp. 66–76.

Информация об авторах:

Кнауб Р.В., кандидат географических наук, доцент, кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: knaubrv@mail.ru

Дутова Е.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет; профессор, отделение геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: dutova@tpu.ru

Игнатъева А.В., ассистент, кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: anna_tomsktsu@mail.ru

Вклад авторов: Кнауб Р.В. – 55 %, Дутова Е.М. – 30 %, Игнатъева А.В. – 15 %.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Knaub R.V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Faculty of Geology and Geography, Department of Nature Management, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: knaubrv@mail.ru

Dutova E.M., Dr. Sci. (Geol-Min.), Professor, Department of Nature Management, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University; Professor, Department of Geology, School of Engineering of Natural Resources, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: dutova@tpu.ru

Ignateva A.V., Assistant, National Research Tomsk State University, Faculty of Geology and Geography, Department of Environmental Management, Tomsk, Russia

E-mail: anna_tomsktsu@mail.ru

Contribution of the authors: Knaub R.V. – 55 %, Dutova E.M. – 30 %, Ignateva A.V. – 15 %.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.10.2021; одобрена после рецензирования 28.08.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 04.10.2021; approved after reviewing 28.08.2022; accepted for publication 13.03.2023

Научная статья
УДК 502.4; 911.53
doi: 10.17223/25421379/26/8

ЭКОСИСТЕМНЫЕ БЛАГА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В ГОРАХ (НА ПРИМЕРЕ БОЛГАРСКИХ РОДОП И РУССКОГО АЛТАЯ)



Дмитрий Владимирович Черных¹, Лилия Федоровна Лубенец²,
Алина Евгеньевна Зиновьева³, Мария Глушкова⁴, Миглена Жиянски⁵,
Татьяна Валерьевна Яшина⁶

^{1, 2, 3} *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*

¹ *Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия*

^{4, 5} *Лесной институт Болгарской академии наук, София, Болгария*

⁶ *ФГБУ «Государственный природный биосферный заповедник «Катунский», Усть-Кокса, Россия*

¹ *chernykh@mail.ru*

² *lilia_lubenets@mail.ru*

³ *charming-alin@yandex.ru*

⁴ *m_glushkova@abv.bg*

⁵ *zhiyanski@abv.bg*

⁶ *altai-yashina@yandex.ru*

Аннотация. Проведена сравнительная оценка мнения населения Болгарских Родоп и Русского Алтая относительно объема природных благ, предоставляемых горными экосистемами, и эффективности охраняемых природных территорий в горах. Всего было опрошено 374 человека, из них 227 в Усть-Коксинском районе Республики Алтай (Россия) и 147 в Смолянской области (Болгария).

Ключевые слова: экосистемные блага и услуги, охраняемые природные территории, Родопы, Русский Алтай, интервьюирование

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (№ FUFZ-2021-0007) при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-55-18001_Болг_а.

Для цитирования: Черных Д.В., Лубенец Л.Ф., Зиновьева А.Е., Глушкова М., Жиянски М., Яшина Т.В. Экосистемные блага и эффективность особо охраняемых природных территорий в горах (на примере Болгарских Родоп и Русского Алтая) // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 106–117. doi: 10.17223/25421379/26/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/26/8

ECOSYSTEM GOODS AND EFFICIENCY OF PROTECTED AREAS IN THE MOUNTAINS (BULGARIAN RHODOPE AND RUSSIAN ALTAI AS THE CASE STUDY)

Dmitry V. Chernykh¹, Lilia F. Lubenets², Alina E. Zinovyeva³,
Maria Glushkova⁴, Miglena Zhiyanski⁵, Tatjana V. Yashina⁶

^{1, 2, 3} *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

¹ *Altai State University, Barnaul, Russia*

^{4, 5} *Forest Research Institute Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

⁶ *Katunskiy Biosphere Reserve, Ust-Koksa, Russia*

¹ *chernykh@mail.ru*

² *lilia_lubenets@mail.ru*

³ *charming-alin@yandex.ru*

⁴ *m_glushkova@abv.bg*

⁵ *zhiyanski@abv.bg*

⁶ *altai-yashina@yandex.ru*

Abstract. Mountains have been recognized as flagship lands of nature conservation around the world. The ecosystem services approach is now being incorporated in global protected areas and biodiversity conservation policies. Natural protected areas

in the mountains provide society with a rich flow of ecosystem-related benefits. Russia and Bulgaria have significant experience in the establishment and management of mountain protected areas. The Altai Mountains in Russia and the Rhodope Mountains in Bulgaria were selected as key mountain territories for comparison in this research due to their similar specialization: agriculture, forest exploitation, tourism activities, etc. The study is based on the interviewing of population from the model mountain territories about the benefits provided by mountain landscapes and the effectiveness of protected natural areas. It was performed in nine villages within the Ust-Koksinsky District in Russia and five villages within Smolyan region in Bulgaria. The results stem from interviews with 374 persons (227 in Russia and 147 in Bulgaria) that were analyzed with statistical techniques. The interviewing results illustrate both common and different views of people from these model regions. Residents of the Smolyansk region and Ust-Koksinsky district consider wild plants for nutrition, materials or energy, possibilities for livestock, water for drinking and fresh air as the most important provisioning ecosystem benefits in the mountains. Among the nonmaterial benefits provided to people by landscapes, respondents most often called possibility for recreation and enjoying fresh air. The respondents in Bulgaria find aesthetic value in centuries-old forests, lakes, mountain peaks and green meadows. The combination of mountain slopes and peaks with a forest and a reservoir and the virgin landscape are most aesthetic for people in Russian Altai. Local people of both countries assess their area of residence as aesthetically attractive. Devil's Bridge, Marvelous Bridges, Yagodinska Cave, Devil's Throat Cave in Bulgaria, Mount Belukha and Multinskie Lakes in Russia are the most interesting sites to tourists. Residents of Russia assess the positive role of protected areas more unequivocally. Most of the respondents in the Smolyan region of Bulgaria believe that tourists should pay for the opportunity to enjoy the beautiful landscapes. Less than half of the residents in the Ust-Koksinsky region of Russia are share this opinion. We conclude that ecosystem services assessments should be pushed ahead as indispensable elements in the management and protection of mountain landscapes. Spatially explicit information on ecosystem services that incorporates the differentiated perceptions of local populations provides a rich basis for the development of sustainable land management strategies.

Keywords: *ecosystem goods and services protected areas, Rhodope, Russian Altai, interview.*

Source of financing: The study was carried out within the framework of the Research Program of IWEP SB RAS (№ FUFZ-2021-0007) with a partial support from the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 19-55-18001_Болг_а).

For citation: Chernykh D.V., Lubenets L.F., Zinovyeva A.E., Glushkova M., Zhiyanski M., Yashina T.V. (2023) Ecosystem goods and efficiency of protected areas in the mountains (Bulgarian Rhodope and Russian Altai as the case study). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 106–117. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/8

Введение

Ландшафты в горах являются важным элементом природного капитала и культурного наследия как внутри самих горных систем, так и за их пределами: эпицентры биологического разнообразия, «водонапорные башни», колыбели большинства цивилизаций и т.д. Наконец, горная среда, в силу экстремальности природных условий, рассматривается как хрупкая и остро реагирующая на внешние воздействия природного и антропогенного генезиса. Соответственно, горные экосистемы представляют собой районы первостепенной природоохранной ценности [Messerli, Ives 1997; Hamilton, 2002; Körner, Ohsawa 2006].

Концепция экосистемных услуг (ЭУ) привела к смене парадигм в заповедном деле. Как было отмечено в знаковой работе «Оценка экосистем на пороге тысячелетия», охрана природы должна осуществляться в интересах благополучия человека [MEA, 2005]. В подтверждение этого было показано, что многофункциональные ландшафты могут обеспечить больший объем экосистемных услуг и большую экономическую выгоду, чем одностороннее использование, даже если это жесткая охрана [Martín-López et al., 2012]. Однако есть немало противников изменения стратегии [Palomo et al., 2014], так как особо охраняемые природные территории (ООПТ) со строгим режимом в большинстве случаев успешно за-

щищают экосистемы и биоразнообразие. Кроме этого, они обеспечивают максимальное хранение углерода, регулируют сток и предотвращают эрозию [Castro et al., 2015].

Одним из последствий изменения природоохранной парадигмы для горных ООПТ будет увеличение нагрузок на ландшафты. Как минимум рекреационных нагрузок. Однако значительные рекреационные потоки, с целью максимального использования многочисленных ЭУ, предоставляемых горными ландшафтами на ООПТ, могут инициировать или усугубить ряд проблем. Среди них такие, как снижение биологического и ландшафтного разнообразия, конфликты местного населения и рекреантов, противоречия между местным населением и ООПТ.

Всесторонняя оценка экосистемных благ горных территорий должна включать разнообразные методы, в том числе и социологические, позволяющие собирать разнообразную информацию от множества заинтересованных сторон [Palomo et al., 2014]. Одной из наиболее эффективных форм оценок в данном случае является проведение содержательного интервьюирования с местным населением относительно его представлений о выгодах, исходящих от горных экосистем [Bieling, Plininger, 2013] на основе специальных опросников [Grêt-Regamey, 2012; Schirpke, 2014].

В горах Болгарии и России сосредоточено значительное количество ООПТ, которые созданы для со-

хранения биологического и ландшафтного разнообразия, а также организации экологического туризма [Meine, 1994; Georgiev, 2010; Концепция..., 2011; Схема..., 2013]. Основная цель исследования – на основе данных интервьюирования проанализировать и сравнить мнения населения Болгарских Родоп и Русского Алтая относительно объема природных благ, предоставляемых горными экосистемами, и эффективности особо охраняемых природных территорий в горах.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) выявить наиболее значимые с точки зрения местного населения природные блага, предоставляемые экосистемами в Родопах (Болгария) и на Алтае (Россия);
- 2) выявить природные и культурные объекты в пределах модельных горных территорий, представляющие наибольший интерес для местных жителей и туристов;
- 3) определить эстетические предпочтения населения;
- 4) оценить с позиций местного населения роль ООПТ в сохранении потенциала экосистемных услуг;
- 5) проанализировать степень готовности местного населения платить за пользование природными благами на территории их проживания.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в Смолянской области (Болгария) и в Усть-Коксинском районе Республики Алтай (Россия). Смолянская область находится на юге Болгарии в Родопах и граничит с Грецией. В области имеется 25 охраняемых территорий, включая природные объекты Natura 2000, резерваты и так называемые поддерживаемые резерваты Сосковчето, Казаните и Кастракли, Момчиловски дол, Амзово, Шабаница. Усть-Коксинский административный район расположен в юго-западной части Республики Алтай, в самой высокой части Алтайских гор, и граничит с Республикой Казахстан. В пределах района расположены Катунский биосферный заповедник, природный парк Белуха с самой высокой вершиной Сибири и несколько памятников природы.

Оценка экосистемных благ и выявление отношения местных жителей к ООПТ проводились с помощью формализованного интервьюирования населения. В исследовании использовался опросник с четко определенными порядком и формулировками вопросов открытого и закрытого типа. Вопросы объединены в три блока. Блок 1 содержит вопросы, направленные на получение информации о том, какие блага местное население получает от ландшафтов в районах их проживания и какие мероприятия необходимо проводить для их сохранения. Блок 2 включает вопросы, отвечая на

которые респондент выбирает ответ из нескольких предложенных вариантов, касающихся эстетического предпочтения жителей относительно ландшафтов. Вопросы блока 3 направлены на выявление степени готовности местного населения платить за те экосистемные блага, которыми оно пользуется.

Всего в интервьюировании приняли участие 374 человека, в том числе 227 из России и 147 из Болгарии. В России это жители девяти поселений зоны сотрудничества заповедника «Катунский» – с. Усть-Кокса, с. Катанда, с. Верх-Уймон, с. Мульта, с. Нижний Уймон, с. Тихоньякая, с. Горбуново, пос. Октябрьское, с. Огневка и жители четырех поселений, не входящих в зону сотрудничества заповедника – с. Кастакта, с. Курунда, с. Чендек, пос. Тюгуюк. В Болгарии были опрошены жители пяти поселений – г. Смолян, с. Борино, г. Девин, г. Доспат и г. Чепеларе. Полученные данные обрабатывались с помощью программного пакета Excel.

Результаты и обсуждение

Наиболее значимые с точки зрения местного населения экосистемные блага. Среди наиболее востребованных благ, предоставляемых ландшафтами населению на территориях их проживания, чаще всего в обеих странах назывались продукты питания растительного происхождения (ягоды, грибы и лекарственные травы; в России еще и кедровые орехи), благоприятные условия для развития животноводства (в Болгарии – пастбища, а в России – сенокосные угодья) и питьевая вода (табл. 1). В Болгарии высокий процент опрошенных назвали деловую древесину, а в России – заготовку древесины, используемую в первую очередь для отопления жилищ. В России сельчане к важным благам отнесли также продукты питания рыболовства и животного происхождения (мясо диких животных и мед), условия для развития деятельности человека (земледелия, рыбалки, охоты и активного отдыха) и природные строительные материалы (песок, природные камни и глина).

Из нематериальных благ, предоставляемых ландшафтами, возможность для отдыха назвали 82 % опрошенных в Болгарии и 35 % в России (рис. 1). Значительная доля респондентов в обеих странах указали на наслаждение чистым воздухом: 53 % в Смолянской области и 37 % в Усть-Коксинском районе. Распространенными ответами также стали в Болгарии возможность развития туризма 64 % и спорта 26 %, а в России – эстетическое удовлетворение 51 % и наслаждение чистой прозрачной водой 19 %.

Незначительный процент ответивших (10 % и менее) в населенных пунктах Смолянской области указали на восхищение красивыми видами (10 %) и возможность прогулок (10 %), а в Усть-Коксинском

районе – оздоровление (10 %), вдохновение (7 %), наслаждение природой без мусора и туристов (3 %), религиозные и культовые ценности (3 %) и наслаждение звуками природы (1 %).

Оценка населением Болгарских Родоп и Русского Алтая эстетической ценности ландшафтов. Респонденты, проживающие в Болгарских Родобах, отмечали, что, по их мнению, красивый пейзаж – это старовозрастные леса (76 %), озера (63 %), горные вершины (52 %) и зеленые луга (26 %) (рис. 2). Жителей Русского Алтая привлекают в первую очередь горные пейзажи (35 %). Кроме того, опрошенные из России часто указывали на то, что для них важно, чтобы горный рельеф сочетался с другими элементами (например, крутые склоны + лес + водоем (22 %) или сочетание гор и рек (15 %)) и ландшафт был первозданным (19 %).

В Усть-Коксинском районе небольшая доля опрошенных важным в эстетическом восприятии ландшафта посчитали его цветное разнообразие (весеннее и летнее цветение растений, закаты над горами) (12 %), а также наличие ледников и снежников на вершинах (5 %) и чистый воздух (1 %).

В Смолянской области Болгарии на вопрос «Что для вас, в первую очередь, определяет высокую эстетичность территории?» (45 % жителей) ответили неоднозначно: «наличие различных атрибутов ландшафта (например, горы, лес и водоем)» и «отдаленность от туристской инфраструктуры» (рис. 3).

В Усть-Коксинском районе были получены более четкие ответы. Значительная часть респондентов указали на «наличие различных атрибутов ландшафта» (70 %), меньшая часть – «отсутствие людей и мусора на территории» (18 %) и «отдаленность от туристской инфраструктуры» (10 %).

Роль горных экосистем в обеспечении благополучия местных жителей на основе самоидентификации населения. Жители обеих стран местность, которая их окружает, считают привлекательной в эстетическом отношении (рис. 4). При этом в Болгарии 81 % опрошенных ответили, что им «важно, но не слишком», а в России 76 %, что «очень важно» жить в окружении ландшафтов с высокими эстетическими достоинствами (рис. 5).

Наиболее ценные для местных жителей материальные блага, предоставляемые ландшафтами

The most important provisioning ecosystem benefits in the mountains

№	Природное благо	Болгария	Россия	
		Доля ответивших, %		
1	Продукты питания растительного происхождения	ягоды	99	63
2		грибы	27	55
3		травы (в том числе лекарственные)	26	38
4	Благоприятные условия для развития животноводства		55	30
5	Питьевая вода		19	63
6	Деловая древесина		73	7
7	Дрова		21	52
8	Чистый воздух		18	11



Рис. 1. Нематериальные блага, согласно мнению населения, предоставляемые ландшафтами Болгарских Родоп и Русского Алтая

Fig. 1. Nonmaterial benefits provided to people by landscapes of the Bulgarian Rhodope and Russian Altai



Рис. 2. Эстетические предпочтения населения Болгарских Родоп и Русского Алтая

Fig. 2. Aesthetic preferences of the population of the Bulgarian Rhodope and Russian Altai

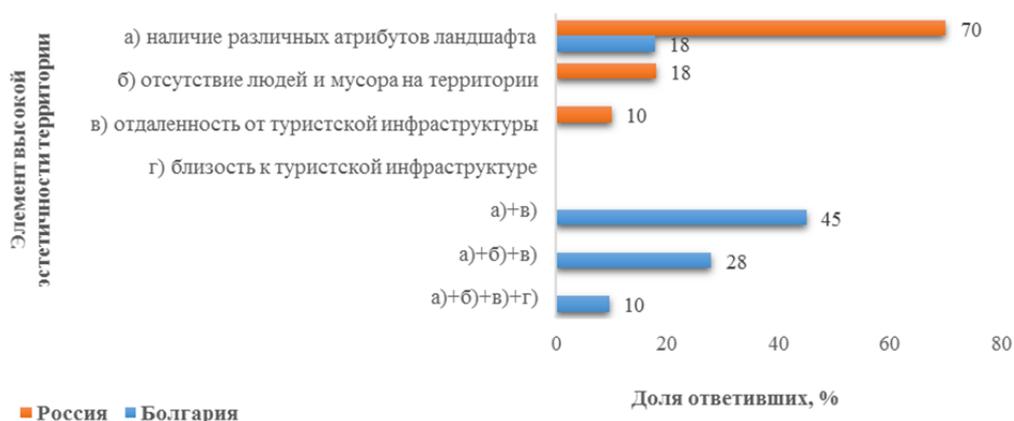


Рис. 3. Требования жителей Болгарских Родоп и Русского Алтая к ландшафту с высокими эстетическими достоинствами

Fig. 3. Requirements of residents of the Bulgarian Rhodope and Russian Altai to a landscape with high aesthetic qualities

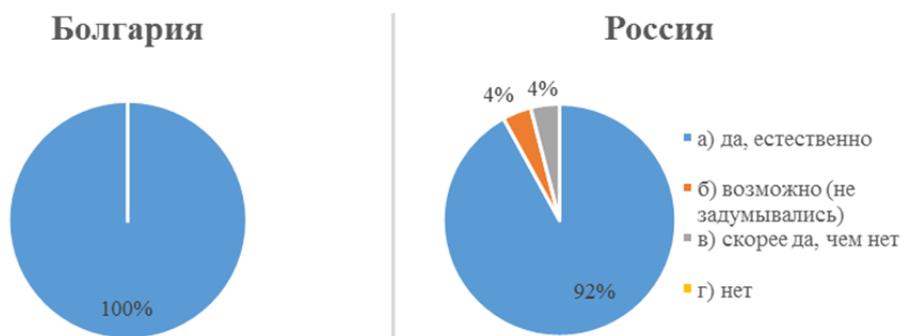


Рис. 4. Мнение жителей Болгарских Родоп и Русского Алтая относительно привлекательности в эстетическом отношении местности их проживания

Fig. 4. The attractiveness assessment of local people their area of residence

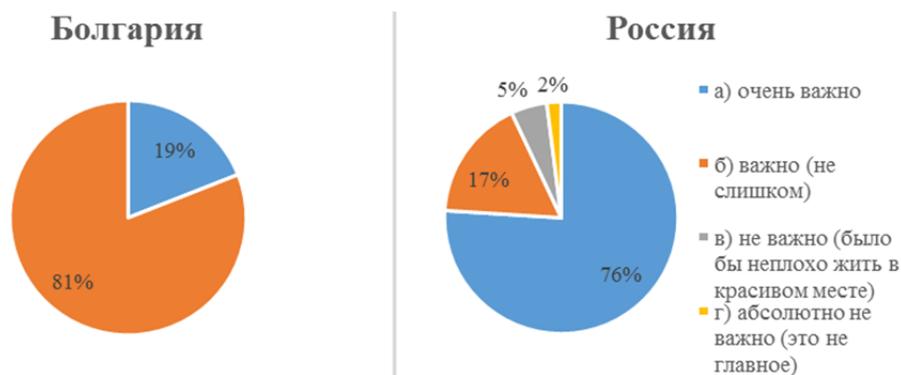


Рис. 5. Значимость для жителей Болгарских Родоп и Русского Алтая проживать в окружении ландшафтов с высокими эстетическими достоинствами

Fig. 5. Significance for the people of the Bulgarian Rhodope and Russian Altai to live into aesthetic landscapes

Необходимо отметить, что респонденты с Русского Алтая нередко отмечали не только важность проживания в «красивых местах». Часто в ответах звучали фразы «моя/наша земля», «мое село», «мы жители здешних мест», «наши горы», «наш лог» и т.п. Указанный факт свидетельствует об очевидности проявления у жителей Усть-Коксинского района самоидентификации, выражающейся, в более узком смысле, как поселенческая (поселение, в котором живу), а в широком понимании – как территориальная/ландшафтная (эко-

системы, формирующие чувство принадлежности к месту проживания) самоидентификация.

В этой связи интересно сравнить мнение респондентов двух стран относительно количества посещения мест с красивыми пейзажами за пределами района их проживания. В Болгарии 36 % из опрошенных выезжают более 5 раз в год, 9 % – 3–4 раза в год, 27 % – 1–2 раза в год и 29 % – реже одного раза в год; в России – 14, 11, 30, 45 % соответственно (рис. 6).

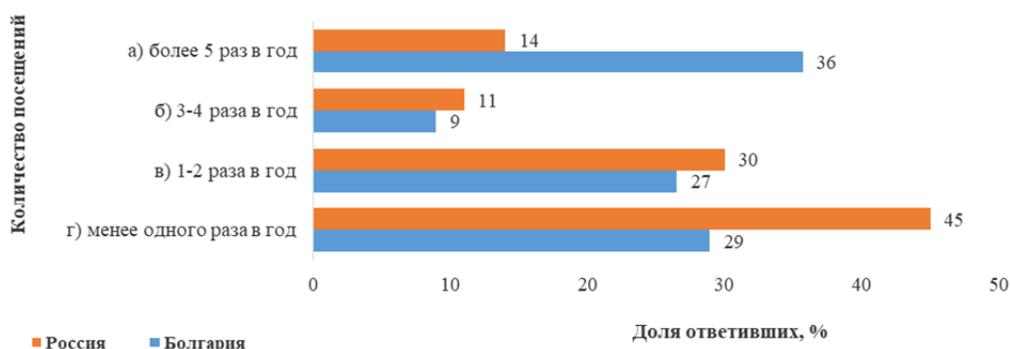


Рис. 6. Количество поездок в год жителей Болгарских Родоп и Русского Алтая в места с красивыми пейзажами за пределами района их проживания

Fig. 6. The number of visits per year by people of the Bulgarian Rhodope and Russian Altai the places with aesthetic landscapes outside their area of residence

Результаты исследования показали, что жители Русского Алтая – это скорее «представители конкретного поселения или конкретного вмещающего ландшафта», в то время как население Болгарских Родоп менее четко воспринимают себя жителями определенного населенного пункта/участка. Поселенческие аспекты идентификации населения Усть-

Коксинского района имеют высокую долю оправданности. В пределах района проживают коренные народы – алтайцы совместно с русскими и их крупной субэтнической группой – старообрядческой, для которых характерно сохранение этнических традиций или их элементов, как в религиозно-культурно-бытовой, так и хозяйственной сферах, проявляю-

щихся в поддержании самобытности этноса (субэтноса). Кроме того, после изменения рыночных условий в постсоветский период (особенно после распада колхозно-совхозной системы ведения хозяйства) многие представители этнических групп в сложившихся социально-экономических условиях постепенно стали вновь более усиленно концентрироваться на традиционном образе жизни с присущими ему способами хозяйствования. Это стало основой выживания местного населения в сложившейся в стране обстановке.

Природные и культурные объекты Болгарских Родоп и Русского Алтая, наиболее привлекательные для местных жителей и туристов. Наиболее популярные для посещения объекты (которые назвали более 30 % респондентов) являются известными не только для модельных территорий, а также и для

туристов из других стран: в Смолянской области – Devil's Bridge, Marvelous Bridges, Yagodinska Cave, Devil's Throat Cave; в Усть-Коксинском районе – гора Белуха и Мультигинские озера (Google Search, Яндекс). Жители обеих стран называли также свои местные достопримечательности (менее 30 %) (табл. 2).

Меры, необходимые, по мнению местного населения, для сохранения эстетически привлекательных ландшафтов и роль ООПТ в сохранении потенциала экосистемных услуг. По мнению более половины опрошенных жителей Болгарии (66 %), для сохранения в районе их проживания ландшафтов, обладающих высокой пейзажной ценностью, необходимо организовать утилизацию отходов и ограничить вырубку леса. Более 25 % респондентов считают важным вести борьбу с загрязнением и с браконьерством (рис. 7).

Таблица 2

Природные и культурные объекты модельных горных территорий Болгарии и России, представляющие наибольший интерес для посетителей, % ответивших от общего количества*

Table 2

Title The favorite natural and cultural sites of the Bulgaria and Russia mountain areas

Болгария		Россия	
Название объекта	% *	Название объекта	% *
<i>Более 31 %</i>			
Devil's Bridge	40	Гора Белуха	46
Marvelous Bridges	38	Озера Мультигинские	43
Yagodinska Cave	38		
Devil's Throat Cave	35		
<i>20–30 %</i>			
Veikata peak	30	Гора Красная	29
Eagle Rock	29	Музей Рериха (с. Верх-Уймон)	27
Panoramic site "Eagle's Eye"	29	Река Катунь	27
Orpheus rocks	27	Музей истории и культуры Уймонской долины (с. Верх-Уймон)	23
<i>10–20 %</i>			
Roman bridges	18	Озеро Таймень	10
Canyon at the waterfalls	11		
Rock "The bride"	11		
Devil's path	10		
Perelik peak	10		
<i>Менее 10 %</i>			
Нет		Музей «Самоцветы»	9
		Озеро Башталинские	8
		Гора Камза	7
		Озеро Кучерлинское	7
		Гора Гладкий камень	6
		Памятник Петру Сухову	6
		Перевал и река Громотура	5
		Озеро Аккемское	5
		Гора Филаретова	4
		Источник Аржан	4
		Каменные бабы	4
		Курганы в окрестностях с. Катанда	4
		Озера Чендекские	4
		Слияние рек Катунь и Кокса	4
		Гора Сапган	3
		Дом творчества с. Мульта	3
		Озеро Акчан	3
		Река Кокса	3

Болгария		Россия	
Название объекта	% *	Название объекта	% *
		Урочище «Палатки»	3
		Гора Баданка	2
		Исток р. Курунда и гора Курунда	2
		Источник Шилов	2
		Музей «Аяс»	2
		Музей «Пирамида» (с. Нижний Уймон)	2
		Озера Крепкие	2
		Озеро Куйгук	2
		Памятник павшим героям Великой Отечественной войны (с. Кастахта)	2
1 %			
Нет		Водопад Аржан	1
		Водопад Куйгук	1
		Гора Болтовская	1
		Гора Большой Тетей	1
		Гора Высокий камень	1
		Гора Кастахта	1
		Гора Колбан	1
		Гора Холодный белок	1
		Исток р. Катунь	1
		Источник Кызыл-Тё	1
		Краеведческий музей (с. Верх-Уймон)	1
		Краеведческий музей (с. Усть-Кокса)	1
		Лес участок с. Тихонкая (Катунская забoka)	1
		Озера Кастахтинские	1
		Озеро Кырзыз	1
		Перевал Каратюрк	1
		Река Бирюкса	1
		Река и озера Караган	1
		Река Чендек	1
		Слияние рек Катунь и Кастахта	1
		Слияние рек Катунь и Катанда	1
		Слияние рек Катунь и Мульта	1
		Слияние рек Тюгюрюк и Кокса	1
		Урочище Большая Катанда	1
		Урочище Тургунда	1



Рис. 7. Необходимые, по мнению местных жителей, мероприятия для сохранения ландшафтов их местности, обладающих высокой пейзажной ценностью

Fig. 7. Key measures to preserve the aesthetic landscapes according local people the opinion

Сельские жители Усть-Коксинского района под утилизацией отходов понимают, в первую очередь, организованный вывоз мусора в отведенное место. При этом наиболее распространенным среди российских сельчан стал ответ «необходимо организовать места для хранения мусора, а лучше самим поддерживать чистоту территории, водных объектов и лесов» (43 %). Около 21 % респондентов посчитали важным ограничить поток туристов, а также усилить охрану ландшафтов (18 %) и воспитание себя и молодого поколения (17 %). Еще меньшая доля предложили ограничить сбор дикоросов и лекарственных растений (золотой корень, красный корень) и усилить борьбу с браконьерством (7 %), делать акцент на просвещение населения (4 %), запретить разведение костров (4 %) и обустроить места для заготовки кедрового ореха (2 %).

Полученные данные отличаются высокой вариативностью, особенно на российской территории. Между тем уточняющий вопрос с ограниченным набором ответов позволил выявить приоритетные для местных жителей меры в отношении сохранения природы на территории их проживания. Увеличение популярности территории для туристов назвали 62 % опрошенных в Болгарии, при этом в России эту меру

назвали лишь 9 % (рис. 8). Однако в Усть-Коксинском районе России почти половина жителей (48 %) хотели бы для территории своего проживания, в первую очередь, усиление ее охранного статуса.

На вопрос «Как вы оцениваете роль особо охраняемых территорий (заповедников, национальных парков и др.) в сохранении эстетической привлекательности ландшафтов?» в Болгарии 18 % респондентов ответили, что «эта роль, однозначно, положительная», 53 % – «эта роль скорее положительная, чем отрицательная», 29 % – «эта роль скорее отрицательная, чем положительная» (рис. 9). В России ответов «однозначно положительная» было почти в три раза больше – 58 %, а «скорее положительная, чем отрицательная» меньше – 34 %. Значительно меньше отмечали отрицательную роль – 7 %, 1 % указывали на то, что «эта роль однозначно отрицательная»; 1 % затруднились ответить.

На вопрос «Приносит ли пользу местному населению наличие особо охраняемых природных территорий?» в Смолянкой области Болгарии 43 % ответили, что «приносит однозначно», 13 % – «скорее да, чем нет», не было ответов – «скорее нет», 44 % – «что не приносит»; в Усть-Коксинском районе – 52, 33, 11, 4 % соответственно (рис. 10).



Рис. 8. Приоритетные, по мнению местных жителей, меры для сохранения природы

Fig. 8. Key measures to the nature maintenance according local people the opinion



Рис. 9. Роль особо охраняемых территорий в сохранении эстетической привлекательности ландшафтов

Fig. 9. The importance of protected areas for maintaining the attractiveness of landscapes



Рис. 10. Роль особо охраняемых природных территорий для местного населения

Fig. 10. The importance of the protected area for the local people

Готовность местного населения платить за пользование природными благами на территории их проживания. В Болгарии на вопрос «Согласны ли вы на введение туристического налога на вашей территории?» отрицательно ответили 64 %, положительно – 36 %; в России – 52 и 48 %, соответственно (табл. 3). При этом то, что отдыхающие должны платить за возможность наслаждаться красивым пейзажем, в Болгарии считают правильным 88 % опрошенных, в России – лишь 43 %. Оказать раз-

ную материальную поддержку для улучшения экологического состояния местности в районе проживания в Болгарии готовы 90 % опрошенных, оказывать такую поддержку на регулярной основе – 91 %; в России – 24 и 68 % соответственно. Однако безвозмездно помогать в очистке/уходе за территорией проживания для сохранения ее эстетической привлекательности в Болгарии готовы однозначно 82 % опрошенных, скорее да, чем нет – 18 %, а в России – 75 и 23 % соответственно.

Таблица 3

Готовность жителей платить за пользование природными благами и на введение туристического налога на территории их проживания

Table 3

The position of local people to payments for the use of natural goods and tourist tax

Вопрос	Ответ «Да»		Ответ «Нет»	
	Болгария	Россия	Болгария	Россия
Согласны ли вы на введение туристического налога на вашей территории?	36	48	64	52
Должны ли отдыхающие платить за возможность наслаждаться красивым пейзажем?	88	43	12	57
Готовы ли вы оказать разовую материальную поддержку для улучшения экологического состояния вашей местности?	90	24	10	76
Готовы ли Вы оказывать на постоянной основе материальную поддержку для улучшения экологического состояния вашей местности?	91	68	9	32

Выводы

1. Жители Смоленской области (Болгария) и Усть-Коксинского района (Россия) рассматривают в качестве важнейших экосистемных благ в горах продукты питания растительного происхождения (ягоды, грибы и лекарственные травы; в России еще и кедровые орехи), благоприятные условия для развития животноводства (в Болгарии – пастбища, а в России – сенокосные угодья), питьевую воду и чистый воздух.

2. Среди нематериальных благ, предоставляемых людям горными ландшафтами, население обеих стран отмечает возможность отдыха и наслаждение чистым воздухом. Распространенными от-

ветами в Болгарии также являются возможность развития туризма и спорта, а в России – эстетическое удовлетворение и наслаждение чистой прозрачной водой.

3. Респонденты Болгарских Родоп считают, что неотъемлемой частью красивого пейзажа должно быть наличие старовозрастных лесов, озер, горных вершин, а также зеленых лугов. Местное население Русского Алтая указывает на присутствие горных склонов и вершин в сочетании с лесом и водоемом и первозданность ландшафта.

4. Жители Смоленской области считают, что высокую эстетичность территории определяет, в первую очередь, наличие различных атрибутов ландшафта при условии отдаленности их от турист-

ской инфраструктуры. Респонденты Усть-Коксинского района указывают на важность при оценке высокой эстетической ценности территории наибольшего количества вариантов сочетания элементов максимально естественного ландшафта.

5. Большинство жителей обеих стран, принимавших участие в опросах, оценивают территорию своего проживания как эстетически привлекательную, и в целом для них значимо (в Болгарии «важно», в России «очень важно») жить в окружении ландшафтов с высокими эстетическими достоинствами.

6. Поселенческие аспекты самоидентификации населения в Русском Алтае играют более важную роль, чем в Болгарских Родопах. Подавляющее большинство опрошиваемых в Усть-Коксинском районе – это представители коренных народов (алтайцы с русскими и их крупной субэтнической старообрядческой группой), которые в силу сохранившихся религиозно-культурно-бытовых и этнохозяйственных традиций (их элементов) ассоциируют себя с конкретным местом (населенный пункт и окружающие ландшафты), определяющим нужный ряд услуг для благополучной жизни.

7. В перечне природных и культурных объектов, расположенных в пределах модельных территорий и представляющих наибольший интерес для посетителей, респонденты на первое место поставили объекты, известные за пределами изучаемых стран: в Болгарии – Devil's Bridge, Marvelous Bridges, Yagodinska Cave, Devil's Throat Cave; в России – гора Белуха и Мультиинские озера.

8. Жители России более однозначно оценивают положительную роль особо охраняемых природных территорий (заповедников, национальных парков и др.) в сохранении эстетической привлекательности ландшафтов. В Болгарии более половины опрошенных считают, что это роль скорее положительная, чем отрицательная.

9. Большая часть опрошенных в Смолянской области Болгарии считает, что отдыхающие должны платить за возможность наслаждаться красивым пейзажем. В Усть-Коксинском районе России такого мнения придерживаются менее половины жителей. Однако более половины респондентов Болгарии против введения туристического налога. Мнения россиян в отношении введения туристического налога распределились примерно пополам.

Список источников

Концепция развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 22 декабря 2011 г. № 2322-р).

Схема развития и размещения особо охраняемых природных территорий Алтайского края на период до 2025 года // Постановление Администрации Алтайского края № 418 от 12.08.2013.

Bieling C., Plieninger T. Recording manifestations of cultural ecosystem services in the landscape // Landscape Research. 2013. V. 38 (5). P. 649–667.

Castro A.J., Martín-Lopez B., Lopez E., Plieninger T., Alcaraz-Segura D., Vaughn C.C., Cabello J. Do protected areas networks ensure the supply of ecosystem services? Spatial patterns of two nature reserve systems in semi-arid Spain // Appl Geogr. 2015. V. 60. P. 1–9.

Georgiev L. The system of protected areas in Bulgaria in terms of the implementation of the concepts of sustainable and alternative tourism // Geographica Pannonica. 2010. V. 14 (3). P. 83–91.

Grêt-Regamey A., Brunner S.H., Kienast F. Mountain Ecosystem Services: Who Cares? // Mountain Research and Development. 2012. V. 32. P. 23–34.

Hamilton L.S. Why mountains matter // World Conserv (IUCN). 2012. V. 33 (1). P. 4–5.

Körner C., Ohsawa M. Mountain systems // Ecosystems and human well-being: current state and trends, 1 / ed. by R. Hassan, R. Scholes, N. Ash. Washington, DC : Island Press, 2006. P. 681–716.

Martín-Lopez B., Iniesta-Arandia I., García-Llorente M., Palomo I., Casado-Arzuaga I., García del Amo D. et al. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences // PLoS One. 2012. V. 7. e38970.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC : Island Press, 2005.

Meine C. Conserving biological diversity in Bulgaria: the national biological diversity conservation strategy. Washington, DC : Biodiversity Support Program, 1994. P. 116.

Messerli B., Ives J.D. Mountains of the world: a global priority. New York : Parthenon, 1997.

Palomo I., Montes C., Martín-Lopez B., Gonzalez J.A., García-Llorente M., Alcorlo P. et al. Incorporating the socialecological approach in protected areas in the Anthropocene // Bioscience. 2014. V. 64. P. 181–191.

Schirpke U., Tasser E., Tappeiner U. Mapping ecosystem services supply in mountain regions: a case study from South Tyrol (Italy) // Annals of Botany. 2014. V. 4. P. 35–43.

References

Kontsepsiya razvitiya sistemy osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy federal'nogo znacheniya na period do 2020 goda (utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva RF ot 22 dekabrya 2011 g. N 2322-r). [Concept for the Development of Specially Protected Natural Areas of Federal Importance to 2020]. In Russian

Skhema razvitiya i razmeshcheniya osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy Altayskogo kraya na period do 2025 goda / Postanovleniye Administratsii Altayskogo kraya № 418 ot 12.08.2013. [Scheme of Development and Placement of Protected Areas in the Altai Territory for the Period until 2025]. In Russian

Bieling C., Plieninger T. Recording manifestations of cultural ecosystem services in the landscape // Landscape Research. 2013. V. 38(5). pp. 649–667.

- Castro A.J., Martín-Lopez B., Lopez E., Plieninger T., Alcaraz-Segura D., Vaughn C.C., Cabello J. Do protected areas networks ensure the supply of ecosystem services? Spatial patterns of two nature reserve systems in semi-arid Spain. *Appl Geogr* 60: 2015. pp. 1–9.
- Georgiev L. The system of protected areas in Bulgaria in terms of the implementation of the concepts of sustainable and alternative tourism // *Geographica Pannonica*. 2010. V. 14(3). pp. 83–91.
- Grêt-Regamey A., Brunner S.H., Kienast F. Mountain Ecosystem Services: Who Cares? // *Mountain Research and Development*. 2012. V. 32. pp. 23–34.
- Hamilton L.S. Why mountains matter // *World Conserv (IUCN)*. 2012. V. 33(1). pp. 4–5.
- Körner C., Ohsawa M. Mountain systems // In: Hassan R, Scholes R, Ash N (eds) *Ecosystems and human well-being: current state and trends*, 1. Island Press, Washington, DC. 2006. pp. 681–716.
- Martín-Lopez B., Iniesta-Arandia I., García-Llorente M., Palomo I., Casado-Arzuaga I., García del Amo D. et al. Uncovering ecosystem service bundles through social preferences // *PLoS One*. 2012. V. 7, e38970.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press. 2005.
- Meine C. Conserving biological diversity in Bulgaria: the national biological diversity conservation strategy. Washington, DC: Biodiversity Support Program. 1994. p. 116.
- Messerli B., Ives J.D. *Mountains of the world: a global priority*. New York : Parthenon, 1997.
- Palomo I., Montes C., Martín-Lopez B., Gonzalez J.A., García-Llorente M., Alcorlo P. et al. Incorporating the socioecological approach in protected areas in the Anthropocene // *Bioscience*. 2014. V. 64. pp. 181–191.
- Schirpke U., Tasser E., Tappeiner U. Mapping ecosystem services supply in mountain regions: a case study from South Tyrol (Italy) // *Annals of Botany*. 2014. V. 4. pp. 35–43.

Информация об авторах:

Черных Д.В., главный научный сотрудник, лаборатория ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, Институт водных и экологических проблем СО РАН; профессор, кафедра экологии, биохимии и биотехнологии, Биологический факультет, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

E-mail: chernykh@mail.ru

Лубенец Л.Ф., кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия.

E-mail: lilia_lubenets@mail.ru

Зиновьева А.Е., преподаватель, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

E-mail: charming-alin@yandex.ru

Глушкова М., доцент, Департамент лесной генетики, физиологии и лесонасаждений, Лесной институт Болгарской академии наук, София, Болгария.

E-mail: m_glushkova@abv.bg

Жиянски М., профессор, председатель ученого совета, Лесной институт Болгарской академии наук, София, Болгария.

E-mail: zhiyanski@abv.bg

Яшина Т.В., заместитель директора по научной работе ФГУ «Государственный природный биосферный заповедник «Катунский», с. Усть-Кокса, Россия.

E-mail: altai-yashina@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Chernykh D.V., Dr. Sci. (Geography), Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia; Professor, Altai State University, Barnaul, Russia.

E-mail: chernykh@mail.ru

Lubenets L.F., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia.

E-mail: lilia_lubenets@mail.ru

Zinovyeva A.E., lecturer, Altai State University, Barnaul, Russia.

E-mail: charming-alin@yandex.ru

Glushkova M., PhD, Associate Professor, Department Forest Genetics, Physiology and Plantations, Forest Research Institute Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria.

E-mail: m_glushkova@abv.bg

Zhiyanski M., PhD, Professor, Chairman of the Scientific Council, Forest Research Institute Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria.

E-mail: zhiyanski@abv.bg

Yashina T.V., Deputy Director for Science, Katunskiy Biosphere Reserve, Ust-Koksa, Russia.

E-mail: altai-yashina@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.08.2021; одобрена после рецензирования 02.11.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 23.08.2021; approved after reviewing 02.11.2022; accepted for publication 13.03.2023

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 532.88+551.55

doi: 10.17223/25421379/26/9

МНОГОЛЕТНЯЯ КЛИМАТОГЕННАЯ ДИНАМИКА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОЗЕР УЛУГ-ХЕМСКОЙ КОТЛОВИНЫ (РЕСПУБЛИКА ТЫВА)



Леонид Васильевич Замана¹, Елена Викторовна Носкова²,
Ольга Ивановна Кальная³, Ирина Леонидовна Вахнина⁴, Марина Алексеевна Кашницкая⁵

^{1,2,4} Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

³ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

⁵ Федеральное государственное бюджетное учреждение «НИЦ «Планета»», Москва, Россия

¹ l.v.zamana@mail.ru

² elena-noskova-2011@mail.ru

³ kalnaja@mail.ru

⁴ vahnina_il@mail.ru

⁵ marina-sosnina1993@yandex.ru

Аннотация. С использованием данных дистанционного зондирования Земли определены ежегодные площади водной поверхности озер центральной части территории Республики Тыва за период 1989–2020 гг. Анализ связи динамики их акваторий с изменениями основных характеристик климата показал, что наиболее высокие значимые связи получены с температурой воздуха ($r = -0,63$) и индексом Педа ($r = -0,64$) для условий текущего и предшествующего года. По результатам гидрохимического опробования исследуемые озера являются солеными с минерализацией рапы 15,1–159,8 г/дм³, наибольшая минерализация воды в оз. Дус-Холь.

Ключевые слова: соленые озера, космические снимки, водный индекс, площади акваторий, температура воздуха, атмосферные осадки, показатели засушливости и увлажнения, гидрохимия озер

Источник финансирования: статья подготовлена в рамках бюджетных исследований учреждений, указанных в аффилиациях авторов.

Для цитирования: Замана Л.В., Кальная О.И., Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Кашницкая М.А. Многолетняя климатогенная динамика водной поверхности озер Улуг-Хемской котловины (Республика Тыва) // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 118–131. doi: 10.17223/25421379/26/9

Original article

doi: 10.17223/25421379/26/9

LONG-TERM CLIMATOGENIC DYNAMICS WATER SURFACE OF THE ULUG-KHEM KOTLOVINA LAKES (TYVA REPUBLIC)

Leonid V. Zamana¹, Elena V. Noskova², Olga I. Kalnaya³, Irina L. Vakhnina⁴, Marina A. Kashnitskaya⁵

^{1,2,4} Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

³ Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

⁵ Federal State Budgetary Institution "Research Center" Planet"

¹ l.v.zamana@mail.ru

² elena-noskova-2011@mail.ru

³ kalnaja@mail.ru

⁴ vahnina_il@mail.ru

⁵ marina-sosnina1993@yandex.ru

Abstract. The annual water surface areas of five lakes (Kak-Khol, Dus-Khol, Khadyn, Bezymyannoe, Cheder) in the central part of the territory of the Tyva Republic for the period 1989–2020 were determined using Earth remote sensing data from the Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2A, Sentinel-2B. The areas of the lakes are calculated based on the modified normalized difference water index (MNDWI) obtained as a result of processing satellite images using the ArcGIS program. Characteristics of climatic conditions (surface air temperature, atmospheric precipitation) and calculations of the hydrothermal moisture coefficient G.T. Selyaninov and D.A. Peda were performed according to the Kyzyl weather station data for 1943–2020. Palmer Drought Severity Index values are taken for the coordinates of this weather station from public electronic archives. The investi-

gated lakes, depending on the area of the water surface at the maximum filling, are categorized as very small, small and medium. During the period under consideration, none of the lakes dried up. The water surface area of the smallest of them during the study period varied from 0.09 (2015) to 0.14 (1993) km², the largest – from 0.24 (2009) to 25.1 (1998) km². The dynamics of the water areas for the period under consideration has multidirectional trends – for three lakes, the trends are negative (Lake Kak-Khol, Khadyn, Bezymyanoe), Cheder – positive, at the lake Dus-Khol with short-period fluctuations, the area for the analyzed period remains stable, however, a significant trend was revealed only for the lake Khadyn. Analysis of changes in the main climatic parameters over the past 78 years has shown that they are characterized by significant positive linear trends. So, for the average annual air temperature it was 0.61 C/10 years or 4.8 °C for the entire period, and for the annual amount of atmospheric precipitation – 4.82 mm/10 years or 37.6 mm for the entire period. In the mode of atmospheric precipitation, significant high-frequency cycles with a duration of 2–8 years were revealed. According to the Selyaninov hydrothermal coefficient, the conditions are defined as arid, according to the Pedy and Palmer indices, the climatic humidity of the territory is estimated mainly as optimal. Analysis of the relationship between the dynamics of the water areas of the studied lakes with changes in the main characteristics of the climate showed that the highest significant relationships were obtained with the air temperature ($r = -0.63$) and the Pedy index ($r = -0.64$) for the conditions of the current and previous year. The stability of the water surface area of the considered lakes to climatic fluctuations is influenced by the feeding characteristics of the lakes, for example, for the lake. Khadyn there is no significant correlation with climatic indicators, which is due to the predominance of river runoff in its water supply, which is formed in mountainous areas with climatic characteristics different from the steppe zone. According to the results of hydrochemical testing, the investigated lakes are saline with brine mineralization 15.1–159.8 g/dm³, the highest water mineralization in the lake. Dus-Khol. The non-susceptibility of the main lakes to drying out is a reliable basis for their therapeutic and recreational use.

Keywords: salt lakes, satellite images, water index, water areas, air temperature, precipitation, indicators of aridity and moisture, hydrochemistry of lakes

Source of financing: The article was prepared as part of the budget studies of the institutions indicated in the affiliations authors.

For citation: Zamana L.V., Noskova E.V., Kalnaya O.I., Vakhnina I.L., Kashnitskaya M.A. (2023) Long-term climatogenic dynamics water surface of the Ulug-Khem kotlovina lakes (Tyva Republic). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 118–131. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/9

Введение

Одна из характерных особенностей степной зоны Сибири – широкое распространение соленых озер, многие из которых подвержены периодическому высыханию. Происходящие изменения климатических условий имеют региональные особенности и по-разному влияют на изменение компонентов природной среды, особенно озер степной зоны, которые играют важную экологическую роль в расселении и сезонных миграциях орнитофауны, а некоторые являются объектами рекреации и бальнеотерапии. Анализ ситуации с озерами в Забайкалье, к примеру, показал, что за последние 20–30 лет в отдельные годы существенно сокращалась их суммарная площадь, а общее количество уменьшалось до 10 раз, практически полностью высыхали не только мелкие, но и такие крупные водоемы, как Барун-Торей, Зун-Торей, Малое Еравное, площади которых в периоды наполнения достигали 580, 300 и 60 км² соответственно [Голятина и др., 2018; Вахнина и др., 2020; Zamana et al., 2020; Кашницкая, 2021; Кашницкая, Болгов, 2021]. На территории Республики Тыва небольшая группа соленых озер находится в южной части Улуг-Хемской котловины, являющейся составной частью Центрально-Тувинской котловины и расположенной в центре региона. Два из них относятся к особо охраняемым природным территориям и имеют статус региональных памятников природы,

при этом одно (оз. Дус-Холь (Сватиково)) активно используется как рекреационный водоем, а второе (оз. Хадын) включено в Каталог ключевых орнитологических территорий России (КОТР) международного значения [Кальная и др., 2015]. На третьем (оз. Чедер) до недавнего времени существовал бальнеологический курорт. Отсюда очевидна экологическая и социальная значимость стабильного существования этих, по крайней мере, трех водоемов.

В настоящей статье изложены результаты определения ежегодных площадей водной поверхности пяти озер данной группы за три последних десятилетия, а также анализ связи динамики их акваторий с изменениями основных характеристик климата (температуры воздуха, количества атмосферных осадков) и трех показателей увлажненности территории. В рекреационном и особенно в бальнеологическом отношении важны гидрохимические характеристики водного объекта. В этой связи рассмотрены данные по гидрохимии трех основных озер группы, полученные в последние годы.

Материалы и методы исследования

Выбранные в качестве объектов исследования озера (рис. 1) расположены в замкнутых бессточных понижениях Улуг-Хемской котловины, которая представляет собой волнистую равнину с обширными плосковершинными одиночными холмами и не-

высокими сопочными грядами, разделенными широкими ложбинами, суходолами и плоскими мелкими котловинами (западинами) разных размеров. Абсолютные отметки поверхности котловины изменяются от 1 250–1 280 м на юге в пределах отрогов хр. Западный Танну-Ола до 600–630 м в долине р. Енисей. Ландшафт котловины в центральной ее части засушливо-степной, с изреженной травянистой растительностью, с участием кустарниковых караган и незначительным присутствием в районе озер древесных форм, в частности, небольшого колка леса у оз. Чедер. Значительные площади в

котловине заняты эоловыми песками, которые в ряде мест сильно развеваются, образуя дюнно-бугристые массивы, почти лишенные растительности. Геологический разрез в районе озер представлен юрскими терригенно-осадочными породами (конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, углистые сланцы), перекрытыми неогеновыми глинами с прослоями валунно-галечного и линзами песчано-гравийного материала и четвертичными делювиально-пролювиальными супесями, суглинками с дресвой и щебнем и эоловыми песками [Кальная и др., 2015].

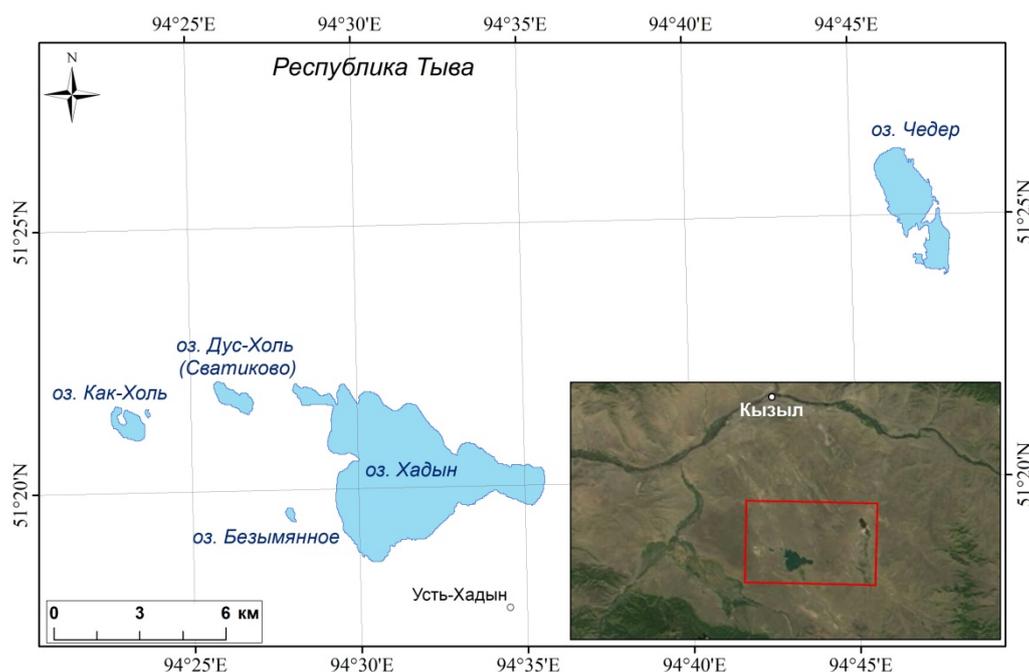


Рис. 1. Карта-схема расположения озер Улуг-Хемской котловины на территории Республики Тыва

Fig. 1. Schematic map of the lakes location of the Ulug-Khem depression on the Republic of Tuva territory

Исследуемые озера в зависимости от площади водной поверхности при максимальном наполнении относятся к категориям очень малых (0,1–1,0 км²) – Безымянное и Дус-Холь, малых (1,0–10 км²) – Как-Холь и Чедер, средних (10,1–100 км²) – Хадын. Соответственно, разнятся озера и по другим морфометрическим характеристикам. Так, длина оз. Хадын доходит до 10 км, ширина – до 6 км, а глубина в наиболее глубоководной части – до 10 м. Аналогичные показатели второго по величине оз. Чедер имеют значения 4,5 км, 1,8 км и 1,5 м, а оз. Дус-Холь вытянуто на 1,6 км при ширине 0,3–0,7 км, глубина его достигает 3,5 м. Наиболее мелким является оз. Как-Холь с глубиной не более 0,5 м. В питании исследуемых озер кроме атмосферных осадков участвуют подземные

воды, а в питании оз. Хадын и Чедер еще и речной сток. Все озера бессточные, практически единственной расходной частью водного баланса является испарение с водной поверхности, исключая оз. Хадын, из которого, как мы полагаем, часть воды уходит на подземный сток.

Для анализа пространственно-временной динамики площадей водной поверхности озер использовались данные дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2A, Sentinel-2B за период с мая 1989 г. по по сентябрь 2020 г. Пространственное разрешение спутниковых изображений аппаратов серии Landsat составляет 30 м, периодичность съемки – 16 дней, серии Sentinel – 10 м, периодичность 2–3 дня. Для каждого года выбирался наилучший

снимок с минимальным покрытием облачностью, преимущество отдавалось снимкам, полученным в весенний и летне-осенний периоды во время межени (май, август, сентябрь). Таким образом, минимизировалось влияние обильных атмосферных осадков на площадь водного зеркала озер.

Подбор спутниковых изображений и их первоначальная обработка, включая вычисление модифицированного нормализованного разностного водного индекса (MNDWI) [Xu, 2006], производились в веб-сервисе Vega-Science [VEGA-Science...], который является составной частью Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг Института космических исследований РАН. По данным изучения озер в степной зоне юго-востока Забайкалья, вычисление индекса MNDWI признано наилучшим способом распознавания водных поверхностей [Курганович, Носкова, 2015]. Для дальнейшего расчета площади акваторий озер использовалась программа ArcGIS, по которой осуществлялась конвертация растровых индексных изображений в векторный формат. Всего было отобрано и обработано 35 спутниковых изображений за временной интервал в 32 года.

Характеристика климатических параметров (температура приземного воздуха, количество атмосферных осадков) и расчет показателей засушливости и увлажненности территории выполнены по данным ВНИИГМИ-МЦД [Булыгина и др. (электронный ресурс); Булыгина и др. др. (электронный ресурс); Булыгина и др. др. (электронный ресурс)] по метеорологической станции Кызыл (51,72° с.ш., 94,50° в.д., 626 м н.у.м), расположенной в 40 км к северу от наиболее крупного в системе оз. Хадын, за период с начала инструментальных наблюдений (1943 г.) до 2020 г. Метеостанция входит в состав реперной климатической сети Росгидромета.

Для определения типа увлажненности применяли известные количественные показатели:

- гидротермический коэффициент увлажнения Г.Т. Селянинова (*ГТК*);
- индекс засушливости Д.А. Педя (*SI*);
- индекс суровости засухи Палмера (*PDSI* – Palmer Drought Severity Index).

Гидротермический коэффициент характеризует увлажнение по соотношению влаги и тепла и определяется как $ГТК = P/0,1T$, где T – сумма средних суточных температур воздуха за период с температурами их более 10 °С, P – количество осадков за тот же период, мм [Переведенцев и др., 2008]. Индекс Педя определяет засуху по разности отношений месячных аномалий температур (T) и осадков (P) к их среднеквадратичным отклонениям и рассчитывается по формуле $SI = dT/vT - dP/vP$ [Педь, 1975]. Индекс *PDSI* [Palmer, 1965] отражает региональные запасы

влаги, стандартизированные по отношению к климатической норме для данной территории, и рассчитывается по эмпирическим зависимостям. Он является одним из основных показателей, используемых для характеристики засушливых условий в США, но редко используется в России [Черенкова, 2013]. Порядок расчетов, раскрывающих содержание *PDSI*, приведен в этой же ссылке. Нами ежемесячные значения *PDSI* взяты для координат метеостанции Кызыл из архивов [KNMI Climate Explorer], находящихся в свободном доступе.

Аномалии среднемесячных температур воздуха и количества атмосферных осадков рассчитаны относительно климатических норм – средних за период 1961–1990 гг., рекомендованный в качестве базового Всемирной метеорологической организацией [BMON1203, 2017]. Влагообеспеченность территории по значениям *ГТК* и индекса *SI* классифицировалась в соответствии с [Галимова и др., 2019], классификация значений *PDSI* для засушливых и влажных периодов проводилась на основе [Newman, Oliver, 2005]. Тренды во временных рядах выделялись методом наименьших квадратов. Оценка их значимости выполнялась с использованием *t*-критерия Стьюдента.

Анализ химического состава водных проб выполнены по общепринятым нормативным методикам в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск (пробы 2018 г.) и Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита (проба 2015 г.).

Результаты и их обсуждение

Определенные в результате обработки спутниковых изображений площади акваторий озер по годам представлены в табл. 1.

В рассматриваемый период ни одно из озер не пересыхало, максимальное наполнение трех малых озер произошло в один год, тогда как минимальные площади всех озер пришлись на разные годы (табл. 2). Наиболее устойчивым во времени оказалось самое крупное оз. Хадын, амплитуда экстремальных размеров которого всего лишь на 4,3 % отличается от среднего. Этот факт может быть обусловлен морфометрическими особенностями озера, а именно узкой полосой мелководий (латерали), или увеличением подземного оттока при повышении уровня воды в озере. Маловероятно, чтобы с ростом приходной составляющей водного баланса (увеличением количества осадков, речного стока в озеро) одновременно пропорционально росло испарение как основная расходная часть.

Наибольшей амплитудой площади водной поверхности по отношению к среднесуточному ее значению характеризуется оз. Как-Холь (табл. 2). Просмотр спутниковых изображений за 1975–1977 гг. показал, что в последнем из этих лет озеро полностью высохло, высохшим было и оз. Безымянное. На приведенном в [Кальная и др., 2015] фрагменте топокарты, отража-

ющем ситуацию на начало-середину 1960-х гг., на месте оз. Как-Холь показан солончак. В большинстве случаев значения площадей водного зеркала исследуемых озер значительно коррелируют между собой (табл. 3). Несмотря на то, что динамика площадей характеризуется разнонаправленными трендами (рис. 2), значимый тренд выявлен лишь для оз. Хадын.

Таблица 1

Площади водной поверхности озер, км², по годам за период 1989–2020 гг.

Table 1

Water surface areas of lakes, km², by years for the period 1989–2020

Год	Озеро					Год	Озеро				
	Как-Холь	Дус-Холь	Хадын	Безымянное	Чедер		Как-Холь	Дус-Холь	Хадын	Безымянное	Чедер
1989	0,87	0,80	24,2	0,11	5,18	2005	0,94	0,80	24,3	0,11	5,70
1990	0,89	0,80	24,2	0,11	5,15	2006	0,96	0,83	24,3	0,11	5,82
1991	0,92	0,79	24,2	0,11	5,12	2007	0,67	0,80	24,1	0,10	5,73
1992	1,07	0,82	24,4	0,13	5,38	2008	0,71	0,80	24,1	0,11	5,20
1993	1,21	0,85	24,6	0,14	5,65	2009	0,90	0,80	24,0	0,11	5,31
1994	1,11	0,81	24,5	0,12	6,50	2010	1,15	0,81	24,1	0,12	7,19
1995	1,14	0,83	24,8	0,11	7,15	2011	1,04	0,81	24,3	0,12	7,25
1996	1,05	0,82	24,9	0,12	6,63	2012	0,88	0,79	24,1	0,11	6,51
1997	1,13	0,82	24,7	0,13	7,03	2013	0,70	0,82	24,2	0,10	6,74
1998	1,06	0,78	25,1	0,13	7,06	2014	0,95	0,81	24,2	0,12	6,53
1999	0,98	0,81	24,6	0,11	6,06	2015	0,84	0,80	24,1	0,09	6,47
2000	0,79	0,79	24,3	0,10	5,50	2016	0,86	0,80	24,1	0,10	5,57
2001	0,71	0,80	24,4	0,11	5,65	2017	1,00	0,81	24,1	0,12	5,87
2002	0,63	0,81	24,5	0,11	5,81	2018	1,02	0,81	24,1	0,12	5,66
2003	0,85	0,81	24,4	0,11	5,14	2019	0,97	0,82	24,2	0,10	5,72
2004	1,02	0,80	24,3	0,12	6,34	2020	1,07	0,83	24,2	0,12	6,83

Примечание. Полу жирным выделены минимальные и максимальные значения.

Note. Minimum and maximum values are in bold.

Таблица 2

Площади водной поверхности озер Улуг-Хемской котловины в 1989–2020 гг.

Table 2

The area of the water surface of the lakes of the Ulug-Khem depression in 1989–2020

Озеро	Максимальная площадь, км ²	Год	Минимальная площадь, км ²	Год	Средняя площадь, км ²	Max – min среднее, %
Как-Холь	1,21	1993	0,63	2002	0,94	62,0
Дус-Холь	0,85	1993	0,78	1998	0,81	8,8
Хадын	25,1	1998	24,0	2009	24,33	4,3
Безымянное	0,14	1993	0,10	2015	0,11	39,4
Чедер	7,25	2011	5,12	1991	6,04	35,2

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции ($r_{cr} = |0,361|$) между площадями водной поверхности озер Улуг-Хемской котловины

Table 3

Pair correlation coefficients ($r_{cr} = |0,361|$) between the areas of the water surface of the lakes of the Ulug-Khem depression

Озеро	Как-Холь	Дус-Холь	Хадын	Безымянное
Дус-Холь	0,45	1		
Хадын	0,43	0,23	1	
Безымянное	0,69	0,47	0,49	1
Чедер	0,46	0,18	0,40	0,27

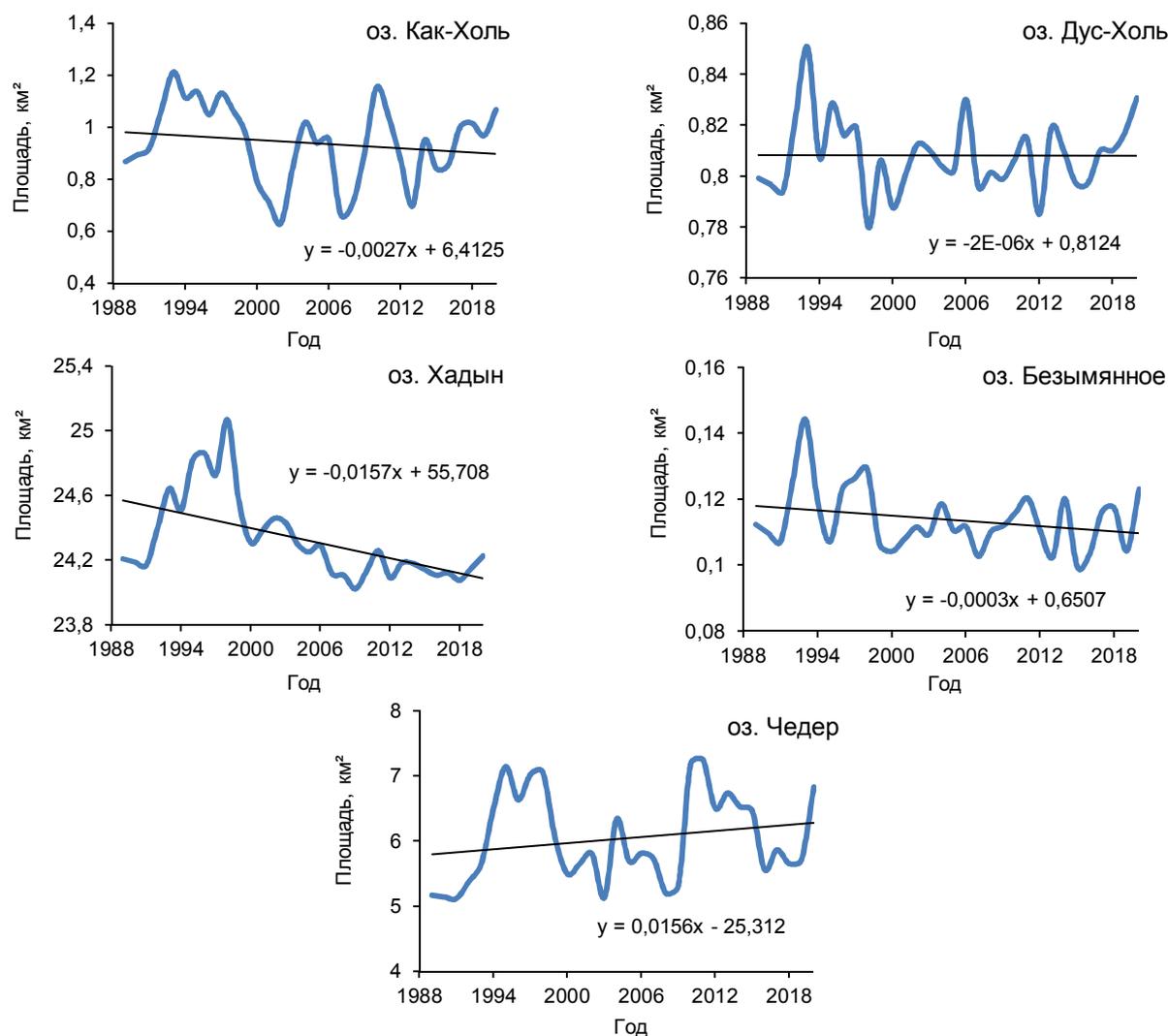


Рис. 2. Динамика изменения площадей водной поверхности озер Улуг-Хемской котловины за период 1989–2020 гг.

Fig. 2. Curves of changes in the areas of the water surface of lakes Ulug-Khem depression for the period 1989–2020

Основными климатическими показателями, определяющими общую увлажненность территории и динамику акваторий бессточных озер, являются температура приземного воздуха и атмосферные осадки.

Средняя годовая температура воздуха в районе расположения метеостанции Кызыл отрицательная (рис. 3), в среднем за период метеонаблюдений она составляет $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (климатическая норма за базовый период $-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Самым теплым был 2015 г. ($+0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), самым холодным – 1943 г. ($-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Средняя температура воздуха самого холодного месяца (январь) равна $-30,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, самого теплого (июль) – $+20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосферных осадков на рассматриваемой территории выпадает в среднем около 220 мм в год при норме за базовый период 210 мм, минимум их отмечен в 1975 г. (137,2 мм), а максимум – в 2020 г. (340,6 мм). Наибольшее количество

осадков отмечается летом (59 % от годовой суммы), при этом на июль–август приходится в среднем 44 % от их среднегодовой суммы.

За последние 78 лет среднегодовая температура воздуха увеличивалась в среднем на $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет ($4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за весь период) (линейный тренд). При этом среднегодовая температура воздуха выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ фиксировалась только с 1998 г. (отмечено семь случаев за 23 года). Рост температуры характерен для всех месяцев года: наибольшее увеличение выявлено в марте – $1,46\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет ($11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ за весь период), наименьшее – в сентябре на $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет ($1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ за весь период). Все тренды статически достоверны при уровне значимости $\alpha = 5\%$.

Анализ многолетнего хода аномалий среднемесячных значений температуры воздуха показал, что

превышение среднегодовой нормы характерно для последних 35 лет (рис. 4). Положительные аномалии, превышающие $2,5^{\circ}\text{C}$, были отмечены в 1998, 2002, 2007, 2013–2015, 2017, 2019 и 2020 гг.

В многолетнем ходе атмосферных осадков на метеостанции Кызыл годы с положительными аномалиями чередуются с годами с отрицательными аномалиями, при этом количество лет с положительными аномалиями превышает 50 % за весь период (рис. 5). За последние 5 лет отрицательные аномалии не фиксировались. В режиме увлажнения южной части Улуг-Хемской котловины значимая цикличность в чередовании влажных и засушливых лет не превышает 2–8 лет, в то время как для территории Забайкалья, сходной по климатическим условиям, характерны более продолжительные квази-тридцатилетние циклы [Вахнина и др., 2018; Носкова, Вахнина, Курганович, 2019; Zamana et al., 2020]. С 1943 по 2020 г. величина линейного тренда годовой суммы атмосферных осадков составила $4,82\text{ мм}/10\text{ лет}$ ($37,6\text{ мм}$ за весь период). Тренд статически достоверен при уровне значимости $\alpha = 5\%$.

По значениям ГТК, рассчитанным за теплый период года (май–сентябрь), влагообеспеченность территории низкая (ГТК = $0,67$ – слабая засуха). За рассматриваемый период достаточная (оптимальная) влагообеспеченность (ГТК = $1,11$ – $1,40$) была отмечена лишь дважды – в 1970 и 1985 гг. (рис. 6). Исключительно низкой (сильная засуха) (ГТК = $0,21$ – $0,40$) она была в 1945, 1975, 2007, 2012 и 2015 гг.

Средние за май–сентябрь величины индекса Педя по исследуемой территории составляют около 0, что по принятым для этого показателя значениям определяет условия увлажнения как нормальные. Засушливые условия (слабая засуха) по значениям индекса SI отмечались в 1953, 1990, 1999–2002, 2007, 2012 и 2015 гг. (рис. 7). Погодно-климатические условия в 1985 г., когда выпало $325,1\text{ мм}$ осадков (второе по величине значение за период метеонаблюдений), характеризуются как слабое избыточное увлажнение (влажные условия), а значение SI в 2020 г., когда отмечался абсолютный максимум осадков ($340,6\text{ мм}$), попадает в градацию «нормальные условия увлажнения», что обусловлено более высокой температурой воздуха.

По среднегодовым значениям индекса Палмера ($-0,28$) условия увлажнения на территории исследований классифицируются как нормальные. В многолетнем их ходе 1952, 1955, 1961, 1985, 1994 и 2020 гг. по этому индексу были умеренно влажными, а 1972, 1973, 1979, 1980, 1989, 1996, 2002, 2005 и 2008 гг. – годами с сильной засухой (рис. 8).

Корреляционный анализ площадей водного зеркала озер с рассматриваемыми климатическими характеристиками показал влияние условий текущего и предшествующего года (табл. 4). Для более ранних лет (2–5) достоверных связей выявлено не было. Наиболее высокие значимые коэффициенты корреляции (обратная связь) получены с температурой воздуха и индексом Педя.

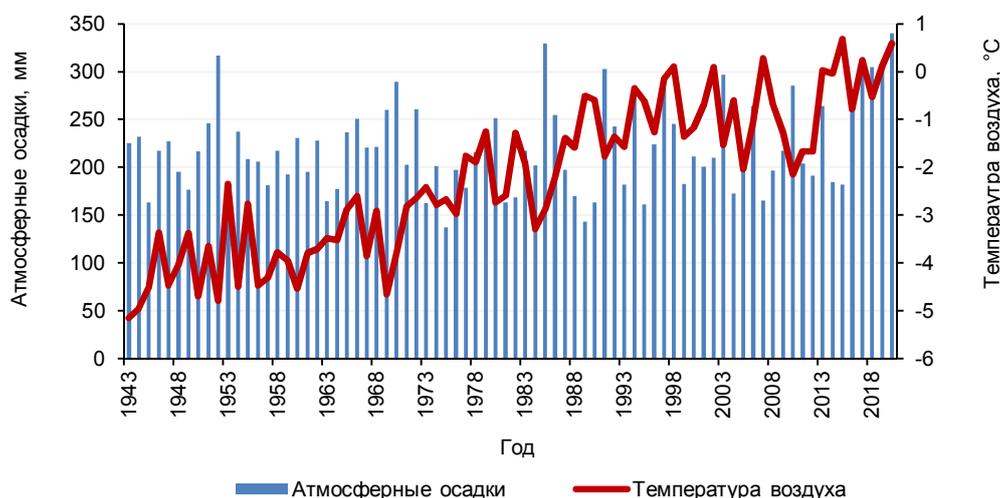


Рис. 3. Среднегодовые температуры воздуха и суммы атмосферных осадков за год за период наблюдений по метеостанции Кызыл

Fig. 3. Average annual air temperatures and the amount of precipitation for the year for the observation period at the Kyzyl meteorological station

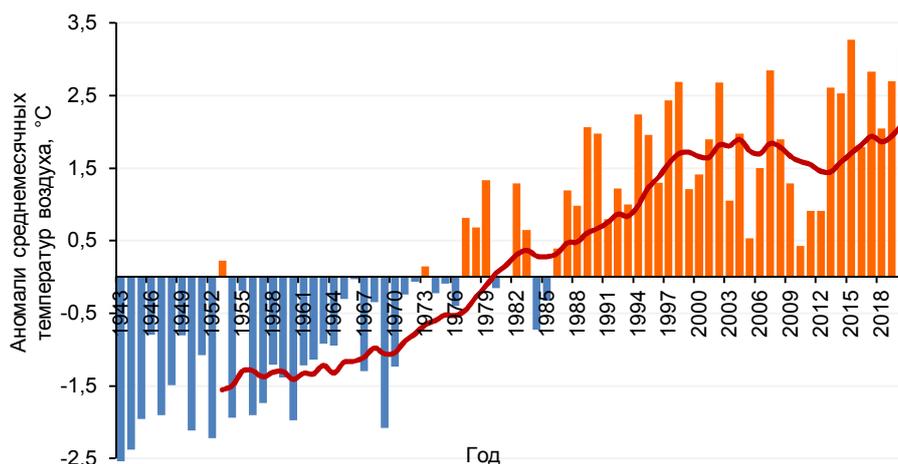


Рис. 4. Среднегодовые аномалии среднемесячных значений температуры воздуха по метеостанции Кызыл. Кривая – скользящие 11-летние средние значения

Fig. 4. Average annual anomalies of average monthly air temperature values at the Kyzyl meteorological station. Curve – 11-year moving averages

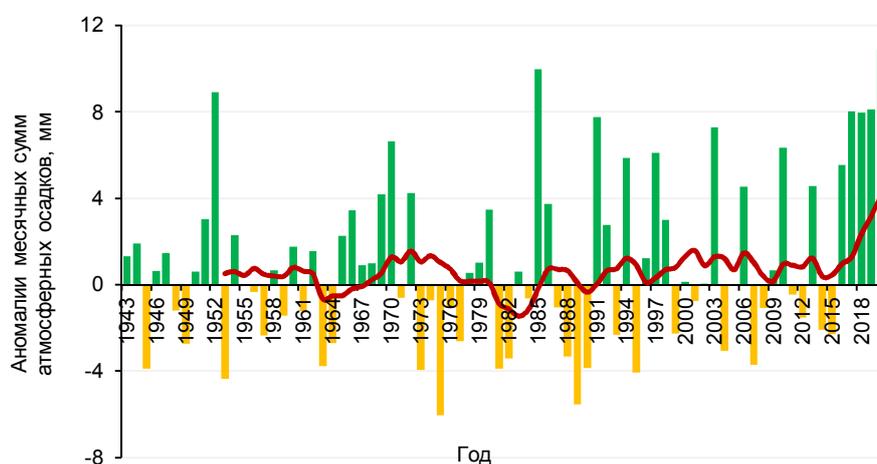


Рис. 5. Среднегодовые аномалии месячных сумм атмосферных осадков по метеостанции Кызыл. Кривая – скользящие 11-летние средние значения

Fig. 5. Average annual anomalies of monthly amounts of atmospheric precipitation at the Kyzyl meteorological station. Curve – 11-year moving averages

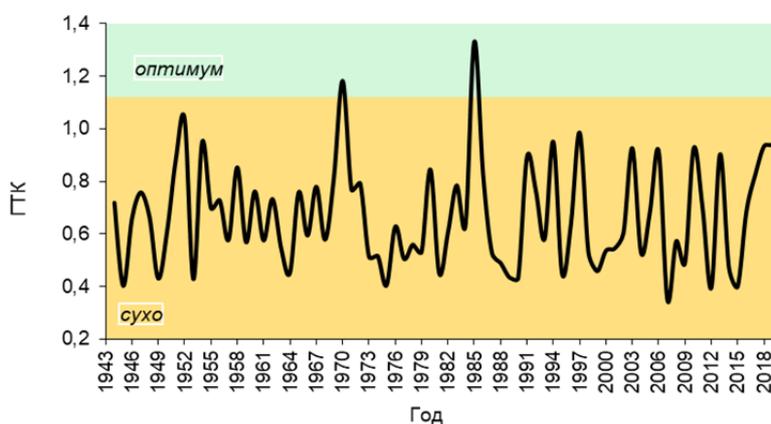


Рис. 6. Средние значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова за май–сентябрь по данным метеостанции Кызыл

Fig. 6. Average values of the hydrothermal coefficient of G.T. Selyaninov for May–September according to the Kyzyl weather station

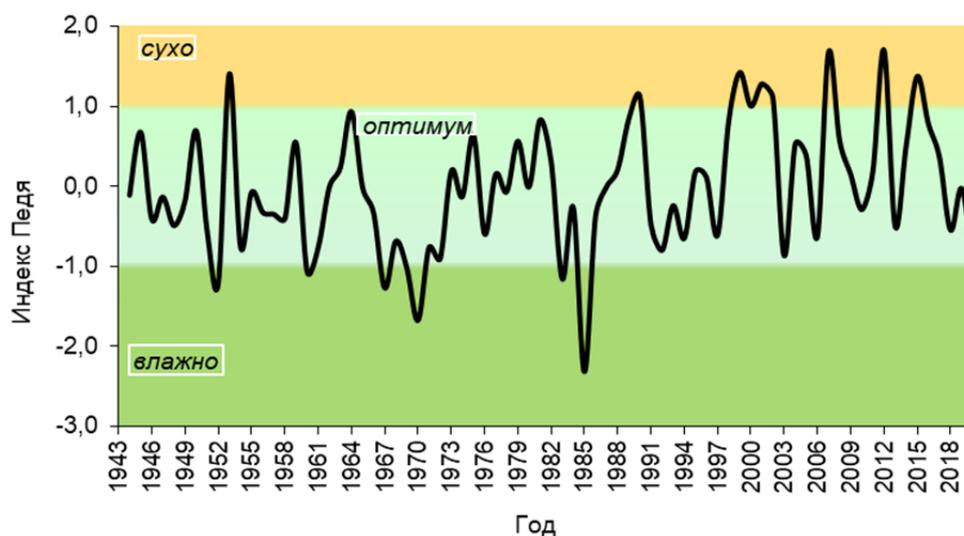


Рис. 7. Средние значения индекса засушливости Д.А. Педя за май–сентябрь по данным метеостанции Кызыл

Fig. 7. Average values of the drought index D.A. Pedy for May–September according to the Kyzyl weather station

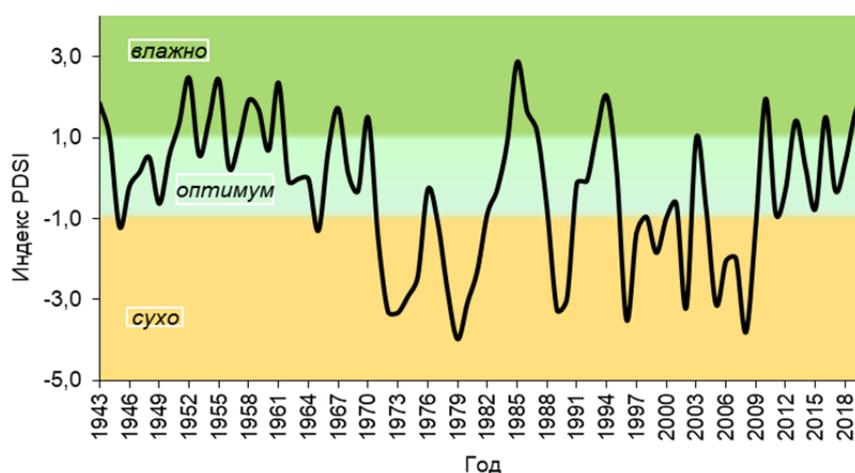


Рис. 8. Среднегодовые значения индекса суровости засухи Палмера по метеостанции Кызыл

Fig. 8. Average annual values of the Palmer drought severity index at the Kyzyl meteorological station

С атмосферными осадками, индексом Палмера и ГТК зависимости выражены слабее и проявляются для меньшего количества озер. Для площади водной поверхности оз. Хадын значимая корреляция с климатическими показателями отсутствует. Объясняется это тем, что основным источником пополнения озера водой служит одноименная река, основной сток которой формируется в горной местности с иными климатическими условиями, чем в котловине. Из-за участия речного стока в водном питании оз. Чедер корреляция площади с характеристиками климата менее выражена. В водном питании оз. Дус-

Холь определенная роль принадлежит наземной разгрузке подземных вод в виде двух родников с дебитами, по фондовым данным гидрогеологических работ, 2,1–2,5 и 2,3–3,7 л/с, которые находятся на берегах юго-восточной оконечности озера. С этим, как и с вероятной субаквальной разгрузкой подземных вод, связана слабая корреляция площади акватории озера с атмосферными осадками.

Различия в формировании водного баланса озер находят отражение в их гидрохимических характеристиках – общей минерализации и химическом составе. Наименьшая минерализация воды оз. Хадын

(табл. 5) обусловлена притоком слабоминерализованных речных вод и, очевидно, значительной долей в расходных составляющих баланса потери воды на фильтрацию в водоносный комплекс подстилающих угленосно-терригенных отложений юрского возраста. Наибольшая минерализация воды в оз. Дус-Холь – результат концентрирования солей вслед-

ствие испарения как единственной значимой расходной составляющей водного баланса, не считая незначительного по количеству перехода воды в виде H₂O и OH в состав вторичных минеральных новообразований, формирующих донные осадки. По данным Е.В. Пиннекер [1968], соленость рапы в озере достигала 298,7 мг/дм³.

Таблица 4

Значимые коэффициенты корреляции ($r_{cr} = |0,361|$) площади водной поверхности озер с исследуемыми климатическими характеристиками в среднем за май–сентябрь

Table 4

Significant correlation coefficients ($r_{cr} = |0,361|$) of the water surface area of lakes with the studied climatic characteristics on average for May–September

Озеро	Т		Р	Показатели увлажнения					
				ГТК		SI		PDSI	
	0	1		0	1	0	1	0	1
Как-Холь	-0,55	-0,51	0,45		0,43	-0,52	-0,64	0,42	
Дус-Холь	-0,63			0,42		-0,61		0,37	
Хадын									
Безымянное	-0,43	-0,43	0,40		0,42	-0,41	-0,55		
Чедер		-0,38			0,37		-0,42		0,51

Примечание. Т – температура воздуха; Р – атмосферные осадки; 0 – значение за текущий год; 1 – кросс-корреляция со сдвигом на 1 год.

Note. T – air temperature; P – precipitation; 0 – value for the current year; 1 – cross-correlation with a shift of 1 year.

Таблица 5

Гидрохимия озер Улуг-Хемской котловины и родников у оз. Дус-Холь

Table 5

Hydrochemistry of the lakes of the Ulug-Khem depression and springs near the lake. Dus-Khol

Номер пробы	Водопункт	Дата отбора	pH	Компоненты, мг/дм ³				
				CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
1	Оз. Дус-Холь	29.06.2015	7,80	91,5	884	13 910	94 620	983
2	““	09.06.2018	7,84	≤10	769	8 970	95 397	7,22
3	Родник 1	““	7,50	≤10	459	185,9	249,5	2,70
4	Родник 2	““	7,70	≤10	537	622	675	3,45
5	Оз. Хадын	““	9,28	≤10	2196	4 561	3 069	1,60
6	Оз. Чедер	““	8,82	≤10	1964	43 883	19 124	5,65

Таблица 5, правая часть

Table 5, right side

Номер пробы	Компоненты, мг/дм ³				Сумма ионов	Формула химического состава
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
1	838	15 841	36 079	311	162 483	Cl90 SO ₄ 10 Na53 Mg45 Ca1
2	320	13 277	34 465	504	159 790	Cl93 SO ₄ 6 HCO ₃ 1 (Na+K)62 Mg37 Ca1
3	70,5	55,4	190	2,05	1 341	HCO ₃ 40 Cl35 SO19 CO ₃ 6 (Na+K)60 Mg23 Ca17
4	131	137	531,6	5,04	2 662	Cl45 SO ₄ 31 HCO ₃ 22 CO ₃ 2 (Na+K)58 Mg27 Ca15
5	7,85	271	4 471	65,8	15 074	SO ₄ 40 Cl36 HCO ₃ 18 CO ₃ 6 (Na+K)91 Mg9
6	58,3	2 216	28 078	256	95 993	SO ₄ 61 C36 HCO ₃ 2 CO ₃ 1 (Na+K)88 Mg12

По мере роста минерализации анионный состав воды из гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатного

(оз. Хадын) преобразуется в хлоридно-сульфатный (оз. Чедер) и далее становится чисто хлоридным

(оз. Дус-Холь). Сульфаты в основной массе переходят в донные осадки, частично сера восстанавливается с образованием сероводорода и сульфидных минералов, формируются среднесульфидные грязи, мощность которых в оз. Дус-Холь достигает 2,0 м [Кальная и др., 2015]. По составу катионов вода оз. Дус-Холь магниево-натриевая, двух других озер – натриевая. Обратим внимание на преобладание иона хлора в анионном составе родника 2 при минерализации воды 2,7 г/дм³ и удовлетворительной сходимости по катионам и анионам. Аналогичный состав воды этого родника приведен в работе [Пиннекер, 1968], сохранялся он в ходе двухлетних режимных наблюдений при выполнении гидрогеологических работ (Высотина, 2008 г.), подтвержден данными опробования в июне 2021 г. и связан, по-видимому, с восходящей разгрузкой глубокозалегающих подземных вод водоносного комплекса карбонатно-терригенных пород девона, подстилающих осадочные отложения юрского возраста.

Главным источником восполнения озерной рапы оз. Дус-Холь солями Е.В. Пиннекер [Пиннекер, 1968] считал упомянутые родники, что, учитывая роль их в водном балансе озера, маловероятно. Исходя из сезонного функционирования родников, при суммарном дебите 6 л/с в расчете на слой воды в озере сток их составит не более 100–120 мм. Испарение с водной поверхности водоемов, как показано по озерам степной зоны Забайкалья, составляет 650–750 мм в год [Асеев, 1985]. За вычетом количества атмосферных осадков на водную поверхность озера (200–230 мм) дефицит водного баланса будет составлять не менее 300–350 мм. При фактическом отсутствии впадающих в озеро водотоков он должен восполняться за счет субаквальной разгрузки подземных вод, минерализация которых даже при обратной вертикальной гидрохимической зональности не может быть ниже, чем у родников. Стабильность разгрузки обеспечивает незначительные пространственно-временные изменения акватории озера, а сама стабильность достигается, очевидно, за счет инфильтрации из оз. Хадын, абсолютная отметка уреза воды в котором (около 708 м н.у.м.) примерно на 7 м выше, чем в оз. Дус-Холь, при расстоянии между озерами около 3 км. Подтверждением гидравлической связи между ними является тот факт, что после максимального наполнения оз. Хадын в 1993 г. на следующий год площадь акватории оз. Дус-Холь также выросла, тогда как озера Как-Холь и Безымянное в 1994 г. сокращались (см. табл. 1).

Озера Дус-Холь и Хадын широко используются местным населением и приезжими для отдыха и самостоятельного лечения. На оз. Чедер существовал курорт с водо- и грязелечением, который был ликви-

дирован, но в настоящее время восстанавливается, кроме ремонта старого корпуса строятся новые. На оз. Дус-Холь существует несколько баз отдыха. Вода его кроме высокой минерализации как главного лечебного фактора содержит из других бальнеологических компонентов бром в количестве до 263,0 мг/дм³ и ортоборную кислоту Н₃ВО₃ до 63,6 мг/дм³ [Клоптова, Сидорина, 2013]. Бальнеологическое и рекреационное значение озера усиливает явление гелиотермии – роста температуры воды на глубине за счет солнечного прогрева. По замерам в августе 2012 г. в верхнем слое мощностью 1,5 м температура воды варьировала в пределах 20–22 °С. С глубиной происходило резкое увеличение температуры до 36,6–32,8 °С на глубине 2,0 м и до 40–45 °С у дна (2,5–2,6 м) [Аюнов и др., 2014].

Заключение

Приведенные результаты обработки изображений дистанционного зондирования водных поверхностей пяти соленых озер Улуг-Хемской котловины, расположенной в центральной части территории Республики Тыва, показали, что в период 1989–2020 гг. они не пересыхали, в отличие от озер Забайкалья, также приуроченных к сухостепной климатической зоне, многие из которых, в том числе наиболее крупные, высыхали полностью. В более ранние сроки два озера в результате дефицита атмосферных осадков и высокого испарения с водной поверхности в отдельные годы тоже исчезали. Динамика акваторий за рассматриваемый период имеет разнонаправленные тренды – у трех озер тренды отрицательные (оз. Как-Холь, Хадын, Безымянное), у оз. Чедер – положительный, у оз. Дус-Холь при короткопериодных колебаниях площадь за анализируемый период остается стабильной, однако значимый тренд выявлен лишь для оз. Хадын.

Наиболее высокой устойчивостью акваторий отличаются оз. Хадын и Дус-Холь: первое – из-за преобладания в водном питании речного стока, формирующегося в горной местности с отличными от степной зоны климатическими характеристиками, а второе – из-за участия в водном питании подземных вод, включая подземный переток из оз. Хадын.

Анализ основных климатических параметров за последние 78 лет показал увеличение среднегодовой температуры воздуха (линейный тренд) в среднем на 0,61 °С/10 лет, или 4,8 °С за весь период. С 1943 по 2020 г. величина линейного тренда годовой суммы атмосферных осадков составила 4,82 мм/10 лет, или 37,6 мм за весь период. По показателям увлажнения оценки расходятся. По гидротермическому коэффициенту Селянинова условия определяются как за-

сушливые, по индексам Педея и Палмера климатическая увлажненность территории оценивается преимущественно как оптимальная.

Корреляционный анализ показал значимые отрицательные связи площади водных зеркал озер с температурой воздуха, как и должно быть в случае бессточных озер, и более слабую положительную корреляцию с количеством осадков ввиду разной их доли в наполнении озер. Из показателей увлажненности более высокие значимые коэффициенты корреляции получены с индексами Педея и Палмера.

Испарение с водной поверхности озер как единственная или доминирующая расходная составляющая их водного баланса не только определяет динамику акваторий, но и их гидрохимические характеристики. Все озера являются солеными с минерализацией рапы 15,1–159,8 г/дм³ по разовым определениям по состоянию на летний период 2018 г. Устойчивое существование оз. Дус-Холь с высокой минерализацией рапы, содержанием ряда важных для бальнеологии других химических компонентов и сероводородных грязей определяет его как надежную базу для создания водо- и грязелечебницы.

Список источников

- Асеев В.В.** Региональная оценка ресурсов испарения с поверхности малых водоемов юга Восточной Сибири // Географический анализ природных ресурсов Иркутской области. Иркутск, 1985. С. 22–39.
- Аюнов Д.Е., Рычкова К.М., Дучков А.Д.** Температурные исследования оз. Дус-Холь (Сватиково) // Известия Тувинского государственного университета // Географические и сельскохозяйственные науки. 2014. № 2. С. 104–108.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В.** Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 15.06.2021).
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.** Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 15.06.2021).
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.** Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ) // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 15.06.2021).
- Вахнина И.Л., Носкова Е.В., Голятина М.А.** Особенности изменения площадей водной поверхности и количества озер степной зоны Восточного Забайкалья // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 3. С. 13–23. doi: 10.17308/geo.2020.3/3019
- Вахнина И.Л., Обязов В.А., Замана Л.В.** Динамика увлажнения в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья с начала XIX столетия по кернам сосны обыкновенной // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2018. № 2. С. 28–33.
- ВЕГА-Science:** уникальный инструмент научного анализа данных спутниковых наблюдений. URL: <http://sci-vega.ru/> (дата обращения: 20.07.2021).
- ВМО-№ 1203.** Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. 2017. 32 с.
- Галимова Р.Г., Переведенцев Ю.П., Яманаев Г.А.** Агроклиматические ресурсы республики Башкортостан // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2019. № 3. С. 29–39.
- Голятина М.А., Вахнина И.Л., Курганович К.А.** Динамика количества и площадей водного зеркала озер Восточного Забайкалья // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : XVIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. / отв. ред. А.В. Шапиева. 2018. С. 120–124.
- Кальная О.И., Аюнова О.Д., Забелин В.И., Арчимаева Т.П., Рычкова К.М.** Бальнеологические свойства и экологические проблемы озер Дус-Холь и Хадын // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2015. Т. 2, № 1–1. С. 56–60.
- Кашницкая М.А.** Исследование динамики площадей водной поверхности озер степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 242–253. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-242-253
- Кашницкая М.А., Болгов М.В.** Бессточные Торейские озера: можно ли дать прогноз изменений гидрологического режима // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 95–98. doi: 10.52002/0130-2906-2021-5-95-98
- Клопотова Н.Г., Сидорина Н.Г.** Современное состояние и изученность лечебных гидроминеральных ресурсов Тувы и сопредельных регионов // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2013. № 1. С. 16–19.
- Курганович К.А., Носкова Е.В.** Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 06 (121). С. 16–24.
- Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Курганович К.А.** Характеристика условий увлажненности территории бессточных озер Торейской равнины с использованием метеорологических данных // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 3. С. 22–30. doi: 10.21209/2227-9245-2019-25-3-22-30
- Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Наумов Э.П., Верещагин М.А., Хабутдинов Ю.Г., Исмагилов Н.В. и др.** Основные особенности климата последних десятилетий на территории Татарстана // Ученые записки Казанского университета. 2008. Т. 150, кн. 4. С. 21–32.
- Педь Д.А.** О показателе засухи и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 156. С. 19–38.
- Пиннекер Е.В.** Минеральные воды Тувы. Кызыл : Тувин. кн. изд-во, 1968. 106 с.

Черенкова Е.А. Количественные оценки атмосферных засух в федеральных округах Европейской территории России // Известия РАН. Сер. Географическая. 2013. № 6. С. 76–85.

KNMI Climate Explorer. URL: http://climexp.climexp-knmi.surf-osted.nl/select.cgi?id=someone_@some-where&field=scpdsi (дата обращения: 20.09.2021).

Newman J.E., Oliver J.E. Palmer Index/Palmer Drought Severity Index // Encyclopedia of World Climatology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. 2005. P. 571–573. doi: 10.1007/1-4020-3266-8_159.

Palmer W.C. Meteorological drought. Washington : U.S. Department of Commerce Research, 1965. V. 45. 58 p.

Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. of Remote Sensing. 2006. No. 27. P. 3025–3033.

Zamana L.V., Vakhnina I.L., Golyatina M.A., Noskova E.V. Dynamics of the water surface of the Eravno-Khorginsky system lakes (Western Transbaikalia) in 1990-2020 according to remote sensing data // Limnology and Freshwater Biology. 2020. No. 4. P. 634–636. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-634

References

Aseev V.V. *Regional'naya otsenka resursov ispareniya s poverkhnosti malykh vodoyemov yuga Vostochnoy Sibiri* [Regional assessment of evaporation resources from the surface of small water bodies in the south of Eastern Siberia] // Geographic analysis of natural resources of the Irkutsk region. Irkutsk, 1985. pp. 22–39. In Russian

Ayunov D.E., Rychkova K.M., Duchkov A.D. *Temperaturnyye issledovaniya oz. Dus-Khol' (Svatikovo) [Temperature research of Dus-Khol Lake (Svatikovo)]* // Bulletin of the Tuvian state university Geographical and agricultural sciences. 2014. No. 2. pp. 104–108. In Russian

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Opisaniye massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii* [Description of the data array of the mean monthly air temperature at the stations of Russia. Certificate of state registration of the database No. 2014621485]. <http://meteo.ru/data/156-temperature#description-mass-data> (Date of accessed 15.06.2021). In Russian

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. *Opisaniye massiva dannykh srednemesyachnoy temperatury vozdukha na stantsiyakh Rossii* [Description of the data array of monthly precipitation totals at Russian stations. Certificate of state registration of the database No. 2015620394]. <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#description-mass-data> (Date of accessed 15.06.2021). In Russian

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR)* [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR). Certificate of state registration of the database No. 2014620942]. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#opisaniye-massiva-dannykh> (Date of accessed 15.06.2021). In Russian

Vakhnina I.L., Noskova E.V., Golyatina M.A. *Osobennosti izmeneniya ploshchadey vodnoy poverkhnosti i kolichestva ozor stepnoy zony Vostochnogo Zabaykal'ya* [Features of change in area of a water mirror and the number of lakes in the steppe zone of the Eastern Transbaikalia] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geografiya. Geoekologiya. 2020. No. 3. pp. 13–23. doi: <https://doi.org/10.17308/geo.2020.3/3019>. In Russian

Vakhnina I.L., Obyazov V.A., Zamana L.V. *Dinamika uvlazhneniya v stepnoy zone Yugo-Vostochnogo Zabaykal'ya s nachala XIX stoletiya po kernam sosny obyknovennoy* [Dynamics of humidification in the steppe zone of Southeastern Transbaikalia since the beginning of the 19th century evidenced by the cores of scots pine]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2018. No. 2. pp. 28–33. In Russian

VEGA-Science: *unikal'nyy instrument nauchnogo analiza dannykh sputnikovykh nablyudeniy* [VEGA-Science: a unique tool for scientific analysis of satellite observation data]. URL: <http://sci-vega.ru/> (Date of accessed 20.07.2021). In Russian

VMO-№ 1203. *Rukovodyashchiye ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm* [WMO Guidelines for the calculation of climate standards]. 2017. 32 p. In Russian

Galimova R.G., Perevedentsev Yu.P., Yanaev G.A. *Agroklimaticheskiye resursy respubliki Bashkortostan* [Agro-climatic resources of the Republic of Bashkortostan] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2019. No. 3. pp. 29–39. In Russian

Golyatina M.A., Vakhnina I.L., Kurganovich K.A. *Dinamika kolichestva i ploshchadey vodnogo zerkala ozor Vostochnogo Zabaykal'ya* [Dynamics of the number and areas of the water surface of the lakes of Eastern Transbaikalia]. Kulagin Readings: Technique and Technology of Production Processes. XVIII Int. scientific-practical conf.: in 3 parts. Resp. ed. A.V. Shapiev. 2018. pp. 120–124. In Russian

Kalnaya O.I., Ayunova O.D., Zabelin V.I., Archimaeva T.P., Rychkova K.M. *Bal'neologicheskiye svoystva i ekologicheskiye problemy ozor Dus-Khol' i Khadyn* [Balneological properties and ecological problems of lakes Dus-Khol and Khadyn] // Resort base and natural health-improving areas of Tuva and adjacent regions. 2015. V. 2. No. 1–1. pp. 56–60. In Russian

Kashnitskaya, M.A. *Issledovaniye dinamiki ploshchadey vodnoy poverkhnosti ozor stepnoy zony Vostochnogo Zabaykal'ya na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Investigation of the dynamics of the water surface areas of lakes in the steppe zone of Eastern Transbaikalia based on data from remote sensing of the Earth] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. No. 3. pp. 242–253. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-242-253. In Russian

Kashnitskaya M. A., Bolgov M. V. *Besstochny'e Torejskie ozera: mozjno li dat` prognoz izmenenij gidrologicheskogo rezhima?* [Closed Torey lakes: is it possible to predict changes in hydrological regime?]. Meteorologiya i gidrologiya. 2021. No. 5. pp. 95–98.

Klopotova N.G., Sidorina N.G. *Sovremennoye sostoyaniye i izuchennost' lechebnykh gidromineral'nykh resursov Tuvy i sopedel'nykh regionov* [The current state and knowledge of the medicinal hydro-mineral resources of Tuva and adjacent regions] // Resort base and natural health-improving areas of Tuva and adjacent regions. 2013. No. 1. pp. 16–19. In Russian

Kurganovich K.A., Noskova E.V. *Ispol'zovaniye vodnykh indeksov dlya otsenki izmeneniya ploshchadey vodnogo zerkala stepnykh sodovykh ozor yugo-vostoka Zabaykal'ya po dannym distantsionnogo zondirovaniya* [The use of water indices to assess changes in the water surface of steppe soda lakes in the southeast of Transbaikalia, according to remote sensing data] // Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No. 6 (121). pp. 16–24. In Russian

Noskova E.V., Vakhnina I.L., Kurganovich K.A. *Kharakteristika usloviy uvlazhnenosti territorii besstochnykh ozor Toreyskoy ravniny s ispol'zovaniyem meteorologicheskikh dannykh* [Characteristics of the moisture conditions of the territory of the closed lakes of

the Torey plain using meteorological data] // Transbaikal State University Journal. 2019. T. 25. No 3. pp. 22–30. doi: 10.21209/2227-9245-2019-25-3-22-30.

Perevedentsev Yu.P., Sherstyukov B.G., Naumov E.P., Vereshchagin M.A., Khabutdinov Yu.G., Ismagilov N.V., Tudriy V.D. *Osnovnyye osobennosti klimata poslednikh desyatiletiy na territorii Tatarstana* [The main features of the climate of recent decades on the territory of Tatarstan] // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki. 2008. V. 150. No. 4. pp. 21–32. In Russian

Ped D.A. *O pokazatele zasukhi i izbytochnogo uvlazhneniya* [About the indicator of drought and excessive moisture] // Proc. of the Hydrometeorological Center USSR. 1975. V. 156. pp. 19–38. In Russian

Pinneker E.V. *Mineral'nyye vody Tuvy* [Mineral waters of Tuva]. Kyzyl: Tuvian book publishing house, 1968. 106 p. In Russian.

Cherenkova Ye.A. *Kolichestvennyye otsenki atmosferykh zasukh v federal'nykh okrugakh Yevropeyskoy territorii Rossii* [Quantitative Evaluation of Atmospheric Drought in Federal Districts of the European Russia] // Izvestiya RAS. Ser. Geographic. 2013. No. 6, pp. 76–85. In Russian

KNMI Climate Explorer [Электронный ресурс]. URL: <http://climexp.climexp-knmi.surf-osted.nl/select.cgi?id=someone@somewhere&field=scpdsi> (Date of accessed 20.09.2021).

Newman J.E., Oliver J.E. Palmer Index/Palmer Drought Severity Index // Encyclopedia of World Climatology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. 2005. pp. 571–573. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_159.

Palmer W.C. Meteorological drought. Washington: U.S. Department of Commerce Research, 1965. V. 45. 58 p.

Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International J. of Remote Sensing, 2006. No. 27. pp. 3025–3033.

Zamana L.V., Vakhnina I.L., Golyatina M.A., Noskova E.V. Dynamics of the water surface of the Eravno-Khorginsky system lakes (Western Transbaikalia) in 1990-2020 according to remote sensing data. Limnology and Freshwater Biology. 2020. No. 4. pp. 634–636. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-634.

Информация об авторах:

Замана Л.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: l.v.zamana@mail.ru

Носкова Е.В., кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории географии и регионального природопользования, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: elena-noskova-2011@mail.ru

Кальная О.И., кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: kalnaja@mail.ru

Вахнина И.В., кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории географии и регионального природопользования, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: vahnina_il@mail.ru

Кашицкая М.А., младший научный сотрудник, ФГБУ «НИЦ «Планета», Москва, Россия.

E-mail: marina-sosnina1993@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Zamana L.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geoecology and Hydrogeochemistry, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia.

E-mail: l.v.zamana@mail.ru

Noskova E.V., Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Laboratory of Geography and Regional Environmental Management Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia.

E-mail: elena-noskova-2011@mail.ru

Kalnaya O.I., Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher laboratory, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: kalnaja@mail.ru

Vakhnina Irina L., Cand. Sci. (Biol.), Head of Geography and Regional Environmental Management Laboratory Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia.

E-mail: vahnina_il@mail.ru

Kashnitskaya M.A., Junior Researcher, Federal State Budgetary Institution "Research Center" Planet", Moscow, Russia.

E-mail: marina-sosnina1993@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.01.2022; одобрена после рецензирования 04.02.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 13.01.2022; approved after reviewing 04.02.2022; accepted for publication 13.03.2023

Научная статья
УДК 551.584.61
doi: 10.17223/25421379/26/10

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ОТОПИТЕЛЬНОГО СЕЗОНА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Наталья Николаевна Чередыко^{1,2}, Марина Александровна Волкова², Olesya Scholtz³



¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Deutscher Wetterdienst, Branch Office Essen. Essen, Germany

¹ atnik3@rambler.ru

² mv2101@mail.ru

³ olesya.scholz@dwd.de

Аннотация. Рассмотрены показатели отопительного периода и их динамика на фоне происходящих изменений климата. Значимого сокращения продолжительности отопительных сезонов в последние десятилетия не выявлено, линейные тренды за период 1966–2018 гг. отражают слабую отрицательную динамику сумм градусо-дней отопления HDD и слабую положительную для температурных показателей. Изменение показателей отопительного периода имеет колебательный характер, выявленная цикличность может существенно уточнять предельный максимум потенциальных затрат на отопление при долгосрочном планировании.

Ключевые слова: изменение климата, тренд анализ, отопительный период, сумма градусо-дней отопления (HDD), циклические изменения

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке по субсидии ИМКЭС СО РАН (проект 121031300155-8).

Для цитирования: Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Scholtz O. Оценка термических ресурсов отопительного сезона Томской области в период современного изменения климата // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 132–143. doi: 10.17223/25421379/26/10

Original article
doi: 10.17223/25421379/26/10

ASSESSMENT OF THE HEATING SEASON RESOURCES IN THE TOMSK REGION DURING THE PERIOD OF CURRENT CLIMATE CHANGE

Natalia N. Cheredko^{1,2}, Marina A. Volkova², Olesya Scholtz³

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ Deutscher Wetterdienst, Branch Office Essen, Essen, Germany

¹ atnik3@rambler.ru

² mv2101@mail.ru

³ olesya.scholz@dwd.de

Abstract. The paper examines indicators of heating seasons and their dynamics in the Tomsk Region against the background of the ongoing climate changes. According to the data of the meteorological stations Tomsk and Vanzhil-Kynak, the paper presents the results and analysis of calculations of heating degree-days (HDD), the start and end dates, the durations and average temperatures of the heating seasons within the period of 1966–2018. These characteristics are estimated for the intervals of years (1966–1975, 1976–1997, 1998–2018) corresponding to the peculiarities of climatic variability in the instrumental period.

The durations of heating seasons vary within 194–268 days in Tomsk and 219–281 in Vanzhil-Kynak. The average values of heating degree-days differ between the north and south of the region by 21 %: 5,828 at the station Tomsk compared to 7,031 at the station Vanzhil-Kynak.

The study shows that no significant reduction in the durations of heating seasons is revealed in recent decades. The start and end dates of heating seasons and their durations vary significantly from year to year, but their average values in the different climatic periods under consideration do not change greatly.

For the stations considered, the average HDD value is 6–7 % smaller during the periods of highest warming rates (1976–1997) compared to the abnormally cold decade of 1966–1975; by 7–8 % or less – during the warming slowdown in 1998–2018

than in the period from 1966 to 1975. The linear trends for the entire considered period reflect a weak negative dynamics of HDD and the durations of the heating seasons, as well as a weak positive dynamics for temperature indicators; however, these trends are statistically insignificant at both stations.

The analysis of the heating season characteristics at the stations of the Tomsk Region in different climatic periods shows that there are no prerequisites for the region to prepare for a significant restructuring of the heating system. The main indicators are within the limits of their climatic variability. It is premature to talk about a decrease in the severity of the cold season climatic conditions in the Tomsk Region or a significant reduction in energy consumption for heating.

The dynamics of the heating season indicators is rather of a fluctuating nature. The analysis of the cyclicity in the HDD rows and the temperature indicators of heating periods shows the presence of most significant harmonics (with the maximum fluctuation amplitude) equal to periods of 4 and 8 years. Harmonics equal to periods of 3, 5, 9 and 12–13 years are also found, but their contribution to the amplitude of variability of the considered indicators is smaller. In the fluctuations of the heating season durations the most significant harmonics are the quasi 30-, 11-, 8-9-year harmonics. Taking into account the identified cyclicity is of high practical importance and, with long-term planning, can significantly clarify the maximum potential costs for heating in the Tomsk Region.

Determining the climate regulation impact and its degree of influence on the energy demand for heating in different regions is essential for building strategies of mitigation or adaptation to changing climatic conditions. At the same time, it is necessary to take into account global climate-regulating factors with an inter-decadal time scale of manifestation. Such time scales are most pronounced in the parameters of heating seasons and typical for planning energy consumption.

Keywords: climate change, trend analysis, heating season, heating degree-days (HDD), cyclical changes

Source of financing: The study was carried out within the framework of the state task of the IMCES SB RAS.

For citation: Cheredko N.N., Volkova M.A., Scholtz O. (2023) Assessment of the heating season resources in the Tomsk region during the period of current climate change. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 132–143. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/26/10

Введение

Анализ изменений климата и выявление их закономерностей сохраняют актуальность в связи с обширным спектром возможных вариантов реакции природно-хозяйственных систем на эти изменения. Региональный подход к исследованию актуален в связи с первостепенностью оценки последствий климатической изменчивости в непосредственном локальном управлении социально-экономической деятельностью. В частности, вследствие изменения внешних условий меняются показатели использования энергии для отопления и охлаждения зданий: наблюдаемое потепление климата должно приводить к снижению затрат энергии на отопление, и логично ожидать роста энергопотребления на кондиционирование помещений [Клименко и др., 2002; Spinoni et al., 2014; Isaac, van Vuuren, 2009; Labriet et al., 2015; Alola et al., 2019; Larsen et al., 2020]. Это же отмечается и в оценочных докладах [Climate Change, 2013, Второй оценочный доклад..., 2014]. В меняющихся климатических условиях высоки риски снижения эффективности сложившихся десятилетиями региональных структур энергопотребления. Обогрев помещений разного типа является одной из ключевых составляющих энергопотребления. По масштабам систем теплоснабжения Россия занимает первое место в мире [Некрасов и др., 2012]. Территория страны характеризуется большим спектром региональных особенностей климата и, соответственно, масштабами необходимого производства тепла. Чув-

ствительность отрасли к внешним климатическим условиям может выражаться в формировании разнонаправленных мезо-метеорологических обратных связей [Labriet et al., 2015; Демченко, Гинзбург, 2019; Alola et al., 2019]. Отсюда возможна неоднозначность оценок зависимости характеристик отопительного периода от изменений климата для различных регионов [Клименко и др., 2002]. Кроме того, энергетическая отрасль является одной из определяющих масштабы глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов. Таким образом, мониторинг изменчивости взаимосвязей климатических условий – затраты энергии на обеспечение теплового комфорта помещений – не теряет актуальности и его результаты важно учитывать при разработке программ адаптации к меняющимся условиям окружающей среды, стратегий устойчивого развития регионов.

В большинстве работ по исследованию влияния климатических изменений на характеристики отопительного периода для российских регионов диагностируется снижение нагрузки на системы отопления, сокращение продолжительности и рост средней температуры отопительного периода [Шерстюков, 2007; Барашкова и др., 2011; Клименко и др., 2012; Гинзбург и др., 2016; Носырева и др., 2019]. Для большинства российских регионов отмечается уменьшение продолжительности отопительного периода в среднем на 5 % [Шерстюков, 2007]. Уровень затрат на отопление, конечно, определяется не только температурой окружающего воздуха, но и другими показателями. Например, влажностью, скоростью и

направлением ветра, характеристиками самого здания и даже особенностями предпочтения жильцов. Но в среднем изменение суточной температуры воздуха на 1 °С способствует изменению генерирующей мощности в Единой энергетической системе на 1 млн кВт [Бедрицкий и др., 1998], т.е. температурные характеристики являются показательными для оценки изменения условий отопительного периода в связи с изменениями климата.

На фоне потепления климата многими исследователями отмечается рост экстремальных температурных событий. Такие события несут собой существенные риски для систем отопления, формируя пиковые нагрузки. Наибольшие риски связаны с резкими изменениями температуры наружного воздуха, что является нормой для континентального климата Томской области. Для холодного полугодия в Томской области экстремальными событиями являются периоды сильного мороза, аномально холодной погоды, периодов низких температур. Ранее нами [Волкова и др., 2019] для территории юга Западной Сибири выявлено уменьшение частоты и продолжительности экстремальных температурных событий холодного полугодия, главным образом, для периода наибольших скоростей глобального потепления. В период замедления потепления на большинстве станций эта тенденция сменилась на обратную.

Представляет интерес проанализировать изменения термических показателей отопительного периода в Томской области на фоне изменения климата, отражают ли они потенциальное снижение затрат энергии на отопление. Такой анализ являлся целью данной работы.

Материалы и методы исследования

Период года, когда необходим дополнительный обогрев помещений для обеспечения и поддержания температурного комфорта для жизнедеятельности населения, называют отопительным, его продолжительность определяется по датам устойчивого перехода средней суточной температуры наружного воздуха через 8 °С [СП 131.13330.2019..., 2019; Постановление Правительства..., 2018]. Переход считают устойчивым, и отопительный период должен начинаться, если пять дней подряд средняя суточная температура, соответственно, ниже/выше 8 °С [Постановление Правительства..., 2018].

В данной работе даты начала и окончания отопительных сезонов определялись по приведенным методикам по фактическим рядам средней, максимальной и минимальной суточной температуры. Фактическая продолжительность отопительного периода в конкретном населенном пункте может отличаться от

расчетного ввиду особенностей технологии подачи тепла потребителям, но они согласованы по своим характеристикам.

Существуют различные показатели отопительного сезона. В данной работе представлены результаты и анализ расчетов градусо-дней отопления (*HDD*) по данным метеостанций Томской области за период 1966–2018 гг. Используются данные регулярной метеорологической сети станций из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [Всероссийский..., 2020]. Показатель *HDD*, который еще называют индексом потребления энергии или дефицитом тепла, отражает число дней в году с температурой ниже порога комфортности. Понятие порога комфортности используют для учета влияния внешних условий на потребление энергии для обогрева помещений и рассчитывают как сумму ежедневных отклонений температуры наружного воздуха от температуры комфорта. Ключевые сильные стороны метода – его универсальность и относительная простота. Градусо-дни широко используют для оценок влияния изменчивости и изменения климата на энергетический сектор экономики. Подходов для расчета этой характеристики потребления энергии несколько. Часто для оптимизации расчеты проводят по данным средней среднесуточной температуры за отопительный период и продолжительности сезона. Мы использовали подход, принятый в [Matzarakis, Balafoutis, 2004; Azevedo et al., 2015]. Это более точный анализ, так как *HDD* рассчитывается как сумма градусо-дней за каждые сутки, когда энергия затрачивалась на отопление. Число градусо-дней для одного дня рассчитывалось как разность температуры 18 °С (температура воздуха в помещении, принятая в России как порог комфортности [ГОСТ 30494-2011, 2011]) и среднесуточной температуры наружного воздуха, определяемой как среднее максимальное и минимальное значений температуры в течение суток. Месячное/сезонное число *HDD* – это сумма градусо-дней, соответствующих каждому дню месяца/сезона. Многочисленные измерения расхода топлива показали, что месячная нагрузка отопления здания пропорциональна месячному числу градусо-дней, рассчитанному рассмотренным выше методом. Для г. Томска, по данным, представленным на сайте <http://energo.tom.ru> с 2014 г., нами получено, что отпуск тепловой энергии с коллекторов электростанциями АО «Томская генерация» на 80 % описывается *HDD*.

Также для каждого отопительного периода для рассмотренного периода лет, 1966–2018 гг., были рассчитаны средние суточные температуры ($t_{\text{он}}$), средние температуры самой холодной пятидневки

($t_{\text{оп}}^5$). Кроме того, данные характеристики оценивались для интервалов лет, соответствующих особенностям климатической изменчивости в инструментальный период. В среднем для территории России и для осредненных глобально временных рядов температурных аномалий выделяется временной промежуток с 1976 г. по настоящее время как период наиболее интенсивного потепления [Climate Change, 2013; Второй оценочный доклад..., 2014], с 1998 г. многими исследователями диагностируется замедление потепления, в том числе для территории Западной Сибири [Climate Change, 2013; Чередыко и др., 2014; Ипполитов и др., 2014; Паромов и др., 2017].

Цикличность в рядах характеристик любых процессов есть следствие наложения действия независимых воздействующих/регулирующих факторов. Для выявления количественных показателей цикличности в изменениях каких-либо характеристик, как правило, используют методы, основанные на автокорреляционной функции или преобразовании Фурье. В данной работе анализ цикличности в рядах характеристик отопительных сезонов проводился с использованием методики, предложенной в [Серебрянников, Первозванский, 1965], который оптимизирован нами для выделения скрытых периодичностей в геофизических рядах. Выявлялись и учитывались в дальнейшем в анализе первые десять самых значимых гармоник, которые определялись в процессе итерации по принципу максимальности их амплитуды в спектре рядов данных, из которых на начальном этапе удалялся тренд, а также по величине коэффициента корреляции между исходным рядом и суммой учтенных гармоник, который рассчитывался на каждом вычислительном этапе. Такой подход выделения циклов во временных рядах объективнее методов визуальной оценки цикличности и позволяет избежать относительной трудоемкости вейвлет-анализа, а также позволяет уходить от недостатков метода Фурье: зависимость периода гармоник от длины временного ряда и потеря циклов в относительно низкочастотном диапазоне, что способствует более полному учету временных характеристик реальных природных циклов и отражению сути процессов.

В статье представлены результаты для двух станций области: Томск и Ванжиль-Кынак. Станция Томск расположена на крайнем юге области. Средняя годовая температура на ней ($0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) является максимальной среди метеостанций региона. Станция Ванжиль-Кынак расположена на крайнем северо-востоке области, она не самая северная среди станций Томской области, но средняя годовая температура на ней самая низкая в регионе ($-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Стоит отметить, что основные потребители тепловой энер-

гии сосредоточены, конечно, в областном центре. В остальных населенных пунктах и существенно меньше население, и велика доля хозяйств, не пользующихся услугами центрального отопления. Тем не менее сравнительный анализ позволяет проводить оценки и выстраивать ориентирование при построении стратегий развития региона, оценивать риски климатических нагрузок и социально-экономического обеспечения в связи с изменениями климатических ресурсов.

Результаты и обсуждение

Климатические характеристики отопительного периода для нескольких станций области представлены в справочной литературе. Анализ предыдущих переизданий [СП 131.13330.2019..., 2019] за 1999, 2002, 2012 г. выявил изменения используемых для оценки условий отопительного периода средних показателей, что закономерно на фоне меняющегося климата. В работе [Носырева и др., 2019], по данным за 2011–2018 гг., отмечается уменьшение числа градусо-дней в Томске в последнее десятилетие вследствие изменения климата. Авторы [Барашкова и др., 2011] отмечают сокращение продолжительности отопительного периода и, соответственно, затрат энергии для обогрева. Эти выводы согласуются с данными Б.Г. Шерстюкова [Шерстюков, 2007], по которым за последние три десятилетия на территории Томской области продолжительность отопительного периода уменьшилась в среднем на 2–4 % в северной части области, в южной – на 4–6 %. За этот же период индекс потребления топлива уменьшился приблизительно на 6–8 %. Оценки в приведенных работах и в полученные нами могут несколько различаться из-за расхождения применяемых методик подсчета HDD и $d_{\text{оп}}$. Тем не менее основные тенденции должны сохраняться.

Отопительный период в Томской области длится, как правило, с сентября по май. В период 1966–2018 гг. продолжительность отопительного сезона менялась в пределах 194–268 дней в Томске и 219–281 в Ванжиль-Кынаке. Средние значения градусо-дней отопления отличаются между севером и югом области на 21 %: 5 828 на станции Томск в сравнении с 7 031 на станции Ванжиль-Кынак (табл. 1).

По данным, используемым в представляемом исследовании, для рассмотренных станций среднее отклонений продолжительности отопительных сезонов от их многолетней средней равны нулю. Среднее за период потепления 1976–2018 гг. и за период ускоренного потепления 1976–1997 гг. по сравнению со средним за весь рассмотренный период выше на 0,2 и 0,1% соответственно. Значимого сокращения про-

должительности отопительных сезонов в последние десятилетия не выявлено. Даты начала и окончания отопительных периодов и их продолжительность $d_{он}$

изменяются от года к году существенно. Средние их значения в разные рассмотренные климатические периоды почти не меняются (табл. 1).

Средние и экстремальные показатели отопительного периода в Томской области для различных климатических периодов

Таблица 1

Table 1

Average and extreme indicators of the heating season in the Tomsk region for different climatic periods

Томск	1966–2018			1966–1975			1976–1997			1998–2018		
	Ср	Мак	Мин	Ср	Мак	Мин	Ср	Мак	Мин	Ср	Мак	Мин
$d_{он}$	236	268	194	240	262	194	236	261	216	235	268	206
$t_{он}$	-7,2	-2,9	-13,0	-8,5	-5,3	-13,0	-7,0	-3,8	-10,7	-6,7	-2,9	-11,1
$t_{он}^5$	-30,9	-21,9	-41,1	-33,8	-27,1	-41,1	-29,3	-22,3	-38,1	-31,1	-21,9	-39,5
HDD	5 828	7 698	5 107	6 180	7 698	5 647	5 791	6 754	5 107	5 694	6 536	5 132
ДН	25 сент.	1 сент.	23 окт.	24 сент.	7 сент.	18 окт.	24 сент.	1 сент.	13 окт.	25 сент.	11 сент.	23 окт.
ДО	18 мая	24 апр.	14 июня	21 мая	24 апр.	1 июня	17 мая	3 мая	5 июня	17 мая	5 мая	14 июня
В-Кынак	1966–2018			1966–1975			1976–1997			1998–2018		
	Ср	Мак	Мин	Ср	Мак	Мин	Ср	Мак	Мин	Ср	Мак	Мин
$d_{он}$	256	281	219	256	269	222	259	281	219	252	269	237
$t_{он}$	-9,8	-6,4	-15,5	-11,0	-7,5	-15,5	-9,5	-6,4	-13,5	-9,6	-6,5	-14,3
$t_{он}^5$	-37,7	-28,5	-48,1	-39,5	-31,9	-43,3	-36,4	-28,5	-45,3	-38,1	-30,8	-48,1
HDD	7 031	8 948	6 184	7 359	8 948	6 730	7 031	7 845	6 184	6 868	7 698	6 306
ДН	17 сент.	28 авг.	14 окт.	18 сент.	30 авг.	12 окт.	15 сент.	28 авг.	11 окт.	18 сент.	6 сент.	14 окт.
ДО	30 мая	6 мая	18 июня	1 июня	21 мая	11 июня	1 июня	16 мая	13 апр.	26 мая	6 мая	15 июня

Примечание. $d_{он}$ – продолжительность отопительного периода, $t_{он}$ – средняя температура отопительного периода, $t_{он}^5$ – средняя температура самой холодной пятидневки за отопительный период, HDD – сумма градусо-дней за отопительный период, ДН и ДО – даты начала и окончания отопительного сезона.

Note. $d_{он}$ – the duration of the heating period, $t_{он}$ – the average temperature of the heating period, $t_{он}^5$ – the average temperature of the coldest five-day period for the heating period, HDD – the heating degree-days, DN and DO – the start and end dates of the heating season.

Средние и максимальные значения HDD от периода к периоду уменьшаются. Для станций Томск и Ванжиль-Кынак, соответственно, среднее значение HDD на 7 % и 6 % меньше в период наибольших скоростей потепления по сравнению с аномально холодным десятилетием 1966–1975 гг., на 8 % и 7 % меньше в период замедления потепления, чем в период 1966–1975 гг. Различия средних HDD для периодов 1976–1997 гг. и 1998–2018 гг. не более 2 %. Среднее индекса потребления топлива за период 1976–2018 гг. меньше среднего за весь период всего на 1,4 % в Томске и 1,1 % в Ванжиль-Кынаке. Минимальные суммы градусо-дней в период замедления потепления увеличиваются по сравнению с периодом наибольших скоростей потепления. Линейные тренды за весь рассмотренный период действительно отражают очень слабую отрицательную динамику HDD и продолжительности отопительного периода и слабую положительную для температурных показателей, но эти тренды незначимы на обеих станциях.

Размах значений разных показателей в зависимости от периода меняется незначительно. Вопреки известному тезису об увеличении изменчивости климатических показателей при потеплении, для характеристик отопительных сезонов это не выявлено. Например, разница между минимальным и макси-

мальным значением HDD в период наибольших темпов потепления оказалась наименьшей, наибольшей она была в самый холодный период (см. табл. 1).

Интервал лет 1966–1975 гг. характеризуется как наиболее затратный в смысле потребления энергии (табл. 1). В этот период отмечены самые низкие средние годовые температуры в регионе за весь рассмотренный период и самые холодные отопительные сезоны: 1966–1967 ($t_{он}$ в Томске и в Ванжиль-Кынаке $-13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 1968–1969 гг. ($t_{он}$ в Томске $-12,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, в Ванжиль-Кынаке $-15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Тем не менее отопительный сезон 1966–1967 гг., самый холодный в г. Томске и второй из самых холодных в Ванжиль-Кынаке, был самым коротким за весь исследованный интервал лет и характеризовался HDD, близкими к средней. Второй самый холодный сезон этого и всего исследованного интервала лет, сезон 1968–1969 гг., характеризуется максимальными суммами HDD и был одним из самых продолжительных за весь период исследования. Как видно и из табл. 2, зависимость суммы градусо-дней от продолжительности отопительного периода невелика в любом из рассмотренных интервалов лет, особенно в период замедления потепления. В практике оценки характеристик отопительных сезонов опираются на оба основных фактора: средняя температура сезона и его

продолжительность (<http://energo.tom.ru>). По данным метеостанций Томск и Ванжиль-Кынак мы построили модельные диаграммы (рис. 1), которые отражают фактическое распределение *HDD* в зависимости от продолжительности отопительного периода и данных средней температуры. Из них также следует неоднозначность этой зависимости для условий Томской области. Так, например, в Томске при средней температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и продолжительности отопительного сезона 210–230 дней *HDD* составляет менее 5 000 градусо-дней, а при продолжительности менее 210 увеличивается до 5 500 градусо-дней.

Действительно, в большей степени показатели потребности в отоплении определяются средней температурой сезона, чем изменениями его продол-

жительности. То же показано, например, и для Московского региона [Гинзбург и др., 2016]. Хотя в период 1966–1975 гг. для станции Томск корреляция со средней температурой низкая (табл. 2). Полученные данные показывают, что этот фактор ведущий, но не определяющий. Можно отметить увеличение коэффициентов корреляции *HDD* с температурными показателями отопительного сезона в период замедления потепления, особенно в Ванжиль-Кынаке, где два отопительных сезона этого периода характеризовались не только низкими средними $t_{\text{он}}$, но и самыми низкими температурами самой холодной пятидневки за весь рассмотренный временной интервал: зима 2005–2006 гг. ($-48,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и зима 1998–1999 гг. ($-45,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таблица 2

Корреляция показателей отопительного периода по данным станций Томской области для различных климатических периодов

Table 2

Correlation of indicators of the heating period according stations of the Tomsk region for different climatic periods

Период	1966–2018		1966–1975		1976–1997		1998–2018	
Станция	Томск	В-Кынак	Томск	В-Кынак	Томск	В-Кынак	Томск	В-Кынак
$\text{corr}(HDD \times d_{\text{он}})$	0,36	0,25	0,49	0,47	0,44	0,41	0,07	-0,34
$\text{corr}(HDD \times t_{\text{он}})$	-0,63	-0,73	-0,36	-0,72	-0,65	-0,53	-0,74	-0,91
$\text{corr}(HDD \times t_{\text{он}}^5)$	-0,63	-0,54	-0,44	-0,45	-0,68	-0,58	-0,67	-0,91
$\text{corr}(t_{\text{он}} \times d_{\text{он}})$	0,49	0,45	0,64	0,27	0,38	0,52	0,62	0,69
$\text{corr}(t_{\text{он}} \times t_{\text{он}}^5)$	0,59	0,59	0,81	0,58	0,56	0,67	0,42	0,50
$\text{corr}(t_{\text{он}}^5 \times d_{\text{он}})$	-0,03	0,15	0,38	0,08	-0,15	0,18	-0,16	0,07

Примечание. *corr* – коэффициент корреляции соответствующих показателей: $d_{\text{он}}$ – продолжительность отопительного периода, $t_{\text{он}}$ – средняя температура отопительного периода, $t_{\text{он}}^5$ – средняя температура самой холодной пятидневки за отопительный период, *HDD* – сумма градусо-дней за отопительный период.

Note. *corr* – correlation coefficient of indicators: $d_{\text{он}}$ – duration of the heating period, $t_{\text{он}}$ – average temperature of the heating period, $t_{\text{он}}^5$ – average temperature of the coldest five-day period for the heating period, *HDD* – the heating degree-days.

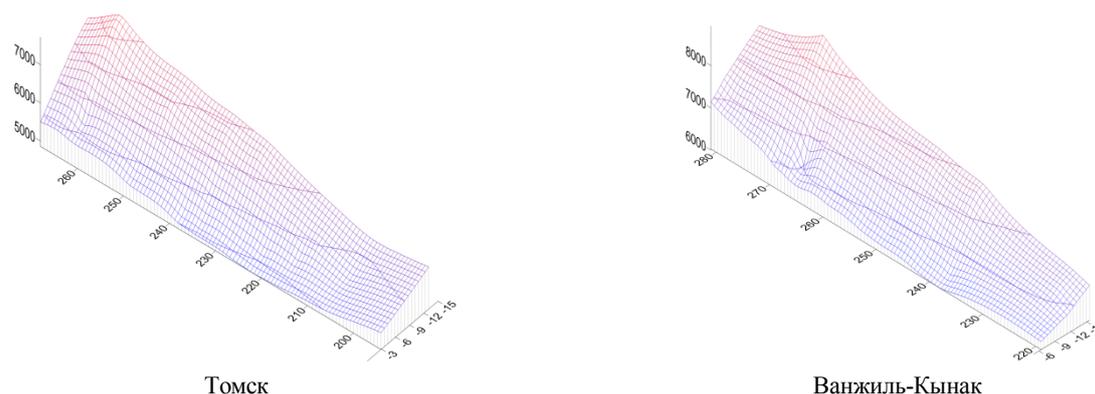


Рис. 1. Сумма градусо-дней (*HDD*) отопительных сезонов по данным станций Томск и Ванжиль-Кынак за 1966–2018 гг. в зависимости от продолжительности и средней суточной температуры отопительного периода

Fig. 1. The heating degree-days (*HDD*) at Tomsk and Vanzhil-Kynak stations for 1966–2018 depending on the duration and average daily temperature of the heating period

В работе [Носырева и др., 2019] рассматривалась проблема переходных периодов установления и окончания отопительного сезона, которые характеризуются существенными колебаниями температу-

ры, частыми похолоданиями/потеплениями, приносящими существенный дискомфорт для населения. Авторами отмечена меньшая длительность периода установления отопительного сезона по сравнению с

периодом окончания. По данным за 1966–2018 гг., такая закономерность сохраняется, разница в среднем порядка 6 дней.

Аномально холодные зимы синхронизируют показатели отопительного сезона. Переходные периоды начала отопительного сезона имеют минимальную продолжительность на обеих станциях в зиму 1968–1969 гг., локальные максимумы – в холодные зимы 1975–1976, 2000–2001, 2002–2003, 2009–2010 гг. Переходные периоды окончания отопительного сезона в большей степени синхронизируются теплыми зимами: локальные максимумы – в теплые сезоны 1996–1997, 2006–2007, 2013–2014 гг., хотя также имеют минимальную продолжительность на обеих станциях в очень холодную зиму 1968–1969 гг. Это может определяться масштабностью формирующих зимние условия внешних влияющих факторов. В целом в аномальные зимы продолжительность переходных периодов к отопительному и после него увеличивается. Явной значимой связи между датой начала/завершения отопительного периода и его продолжительностью не выявлено.

Динамика показателей отопительного периода имеет, скорее, колебательный характер. В колебаниях *HDD* на всех станциях наиболее значимы гармониками периодом 4 и 8 лет. Амплитуда колебаний потребности в отоплении в этих циклах максимальна. Наиболее выраженные локальные и абсолютный максимумы сумм градусо-дней приходятся на годы «резонирования» 4- и 8-летней гармоник, т.е. в 8-летнем цикле. Также значимы в колебаниях *HDD* на всех станциях гармониками с периодами 3-, 5-, 9-летний и 12–13-летний циклы, но их вклад в амплитуду изменчивости рассмотренных показателей меньше.

Температурные показатели в наибольшей степени изменяются в таких же временных масштабах. Наиболее значимые гармониками в колебаниях продолжительности отопительного периода – квази 30-, 11-, 8–9-летние. Еще в работе [Quayle, Diaz, 1980] был выявлен 11-летний период энергопотребления и в этой связи сделано заключение о температуре как основной причине колебаний энергопотребления. Но, как показано выше, наиболее доминирующий периодический режим максимальных *HDD* – 8-летний.

Атмосфера, как известно, имеет ограниченную динамическую память, но через инерционную реакцию океанов на изменения внешних воздействий могут формироваться долгопериодные аномалии крупномасштабной циркуляции, которые, в свою очередь, формируют региональную специфичность откликов полей температуры и осадков. Изменчивость порядка 2–7 лет модулируется такой океанической модой, как Эль-Ниньо – Южное колебание – интенсивный наиболее доминирующий в межгодо-

вых временных масштабах крупномасштабный квазициклический процесс в экваториальной части Тихого океана, который, как известно, характеризуется различными дальними аномалиями в региональных климатах [Воскресенская, Полонский, 1992; Осипов, Гущина, 2018; Wang et al., 2017]. В работе [Осипов, Гущина, 2018] показано, что в Сибири в период очень сильного Эль-Ниньо 2015–2016 гг. наблюдались аномально теплые условия, это авторы связывают с положительной температурной аномалией в Арктике, что могло отразиться на характеристиках полярных вторжений. Предложены механизмы воздействия Эль-Ниньо на средние и высокие широты путем возбуждения волновых цепочек непосредственно тепловых потоков или через смещение струйных течений [Yang et al., 2018]. Активация подобных событий происходит, в том числе, под действием солнечно-космических факторов [Вовк, Егорова, 2009].

В период очень мощных Эль-Ниньо 1982–1983 и 1997–1998 гг. резко возросли коэффициенты корреляции между *HDD* и остальными рассмотренными показателями отопительного периода (продолжительность отопительного периода, средняя температура и температура самой холодной пятидневки) на обеих станциях, что может являться следствием усиления западной циркуляции в умеренных широтах во время любого типа Эль-Ниньо [Полонский, 2008].

Также 4-летний цикл выявляется в изменчивости гидрофизических характеристик течения Гольфстрим [Карлин и др., 2013]. С изменчивостью Гольфстрима, температурного поля Северной Атлантики, связывают и 8-летний цикл [Groth et al., 2017]. Процессы атмосферно-океанического взаимодействия в этой энергоактивной зоне Мирового океана могут являться основным звеном передачи возмущений Эль-Ниньо в средние и высокие широты Евразии. Рост температуры поверхности Северной Атлантики усиливает западный перенос, его влияние распространяется на большую территорию, при этом пути перемещения циклонов смещаются к северу и меняется их интенсивность [Полонский, 2008].

Учет выявленной цикличности при долгосрочном планировании может существенно уточнять горизонт потенциальных затрат на отопление в Томской области. Закономерно, что динамика показателей отопительного периода на станциях Томской области вполне согласована. Территория области равнинная, процессы, формирующие условия отопительного периода, одни и те же, большую часть холодного периода года область находится под влиянием Сибирского антициклона. На территории Томской области периоды понижения температуры связаны с Азиатским центром высокого давления. По-

тепления холодного периода чаще всего обусловлены ослаблением этого антициклона и адвекцией тепла с запада, приносимой европейскими циклонами.

Экстремально холодные дни создают критические нагрузки на системы отопления. Особо выделяются на обеих станциях зима 1968–1969 гг., выходит по HDD за диапазон 3σ, и зима 1984–1985 гг. – за 2σ. Аномально морозные зимы в Западной Сибири, сказавшиеся на темпах потепления регионально-го климата, были в 2000–2001, 2009–2010 гг. и январе 2006 г. [Волкова и др., 2019].

Одним из показателей экстремальности температурного режима в холодное полугодие являются «низкие температуры» – периоды, когда значение минимальной температуры воздуха –30 °С и ниже любой продолжительности. Такие события в Томской области наблюдаются каждый год, они наиболее часты и продолжительны в сравнении с другими критериями экстремальности температурного режима в холодное полугодие (аномально холодная погода и сильный мороз) и включают их в себя [Волкова и др., 2019].

Средняя минимальная температура в такие события в среднем для всех станций Томской области (табл. 3) в сезон 1968–1969 гг. составила –39,4 °С (–40,7 °С в Ванжиль-Кынаке ÷ –38,0 °С в Александровском, абсолютный минимум –52,1 °С в Ванжиль-Кынаке), в зиму 1984–1985 гг. – –36,4 °С (–37,9 °С в Ванжиль-Кынаке и Среднем Васюгане –33,3 °С в Томске, абсолютный минимум –53,0 °С в Ванжиль-Кынаке), при этом на половине станций абсолютные минимумы понизились, а средние суточные температуры в события «низкие температуры» увеличились на всех станциях.

Средняя минимальная температура в такие события в среднем для всех станций Томской области (табл. 3) в сезон 1968–1969 гг. составила –39,4 °С (–40,7 °С в Ванжиль-Кынаке ÷ –38,0 °С в Александровском, абсолютный минимум –52,1 °С в Ванжиль-Кынаке), в зиму 1984–1985 гг. – –36,4 °С (–37,9 °С в Ванжиль-Кынаке и Среднем Васюгане –33,3 °С в Томске, абсолютный минимум –53,0 °С в Ванжиль-Кынаке), при этом на половине станций абсолютные минимумы понизились, а средние суточные температуры в события «низкие температуры» увеличились на всех станциях.

Таблица 3
Средняя температура периодов низких температур в самые холодные отопительные сезоны по данным станций Томской области, °С

Table 3

Average temperature of low temperatures periods in the coldest heating seasons according to the Tomsk region stations, °C

Станция	1968–1969			1984–1985		
	Средняя минимальная	Минимум	Средняя суточная	Средняя минимальная	Минимум	Средняя суточная
Александровское	–38,0	–51,1	–28,3	–37,0	–49,6	–25,9
Бакчар	–39,3	–47,5	–28,3	–35,6	–47,3	–23,6
Ванжиль-Кынак	–40,7	–52,1	–30,9	–37,9	–53,0	–27,0
Колпашево	–38,8	–47,6	–31,0	–35,9	–49,0	–24,5
Напас	–40,2	–50,1	–30,1	–37,7	–51,6	–25,2
Первомайское	–39,5	–48,7	–31,7	–34,9	–49,3	–24,1
Пудино	–38,8	–50,0	–29,4	–36,5	–48,7	–23,4
Средний Васюган	–39,0	–50,3	–30,4	–37,9	–49,0	–23,7
Томск	–39,1	–48,2	–31,9	–33,3	–44,9	–22,5
Усть-Озерное	–40,3	–49,7	–31,1	–37,3	–50,9	–26,2

За период исследования максимальная непрерывная продолжительность события «низкие температуры» была зафиксирована на станции Ванжиль-Кынак в Томской области, началось оно 6 января 2006 г. и продолжалось 32 дня. В Томске это событие началось 10 января и длилось 7 дней, далее было ослабление на неделю и еще 10 дней низких температур. На обеих станциях за эти 32 дня (13 и 14 % от продолжительности отопительного периода в Ванжиль-Кынаке и в Томске соответственно) HDD составила 24,5 % от суммы градусо-дней за весь отопительный сезон 2005–2006 гг. Для оптимизации затрат, помимо средних показателей, необходимо учитывать вероятность периодов низких температур, их продолжительность и интенсивность.

Заключение

Оценка закономерностей изменений градусо-дней является удовлетворительным инструментом отслеживания и моделирования потребления энергии для регионов любого размера. Также знание потенциальных затрат на отопление может использоваться для косвенной оценки загрязнения воздуха.

Анализ характеристик отопительных сезонов на станциях Томской области в разные климатические периоды показал, что для региона пока нет предпосылок подготовки к существенной перестройке системы отопления. Основные показатели в пределах их климатической изменчивости. Для Томской области говорить о снижении степени суровости климатических условий холодного сезона и о существенном

сокращении энергозатрат на отопление преждевременно. В аномальные зимы продолжительность переходных периодов к отопительному и после него увеличивается.

Характеристики отопительного периода в Томской области изменяются циклически. Трендов, соответствующих отмечаемому в многочисленных публикациях глобальному потеплению, не выявлено. Учет закономерностей циклических изменений характеристик отопительного периода имеет высокую практическую значимость.

Определение того, какое климаторегулирующее воздействие и в какой степени оказывает влияние на потребность в энергии для отопления зданий в различных регионах, необходимо для построения стратегий смягчения или адаптации к меняющимся климатическим условиям. При этом необходимо принимать во внимание глобальные климаторегулирующие факторы с междекадным временным масштабом проявления. Такой временной масштаб как раз наиболее выражен в параметрах отопительного периода и характерен при планировании энергопотребления.

Список источников

- Барашкова Н.К., Волкова М.А., Кузевская И.В.** Оценка современной климатической составляющей хозяйственного комплекса Томской области в холодный период года // Вестник Томского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2011. № 351. С. 163–168.
- Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.** Проблема экономически выгодного использования метеорологических прогнозов // Метеорология и гидрология. 1998. № 10. С. 5–17.
- Вовк В.Я., Егорова Л.В.** Влияние геомагнитной и вулканической активности на явление Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 2. С. 278–288.
- Волкова М.А., Чердько Н.Н., Титовская А.А., Журавлев Г.Г.** Изменения параметров экстремальности температурного режима на юге Западной Сибири в холодный период // Труды ГГО. 2019. Вып. 594. С. 120–136.
- Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б.** Северо-Атлантическое колебание и явления Эль-Ниньо // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 4. С. 23–30.
- Всероссийский** научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <http://meteo.ru/date> (дата обращения: 15.05.2020).
- Второй оценочный доклад** Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).
- Гинзбург А.С., Демченко П.Ф.** Антропогенные мезо-метеорологические обратные связи: обзор современных исследований // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 6. С. 94–113. doi: 10.31857/S0002-35155694-113
- Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н.** Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27. doi: 10.1134/S0040363616080063
- ГОСТ 30494-2011.** Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 20.05.2020).
- Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И.** Изменчивость климата Азиатской территории России в 1975–2012 гг. // География и природные ресурсы. 2014. № 4. С. 13–21.
- Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М.** Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме // Океанология. 2013. Т. 53, № 4. С. 454–462. doi: 10.7868/S0030157413040047
- Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Безносова Д.С., Андрейченко Т.Н.** Изменение объема и структуры коммунального энергопотребления под влиянием экономических и климатических факторов // Теплоэнергетика. 2012. № 11. С. 3–10.
- Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В.** Изменение параметров отопительного периода на Европейской территории России в результате глобального потепления // Известия АН. Энергетика. 2002. № 2. С. 10–27.
- Некрасов А.С., Синяк Ю.В., Воронина С.А., Семикашев В.В.** Современное состояние и перспективы развития теплоснабжения в России // Открытый семинар «Экономические проблемы энергетического комплекса». Сто двадцать пятое заседание от 20 декабря 2011 г. М.: Изд-во ИНП, 2012. С. 4–57.
- Носырева О.В., Барашкова Н.К., Кижнер Л.И.** Определение продолжительности отопительного сезона // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 99–109.
- Осипов А.М., Гущина Д.Ю.** Эль-Ниньо 2015–2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 54–81. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81
- Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г.** Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74.
- Полонский А.Б.** Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 4. С. 69–79.
- Постановление** Правительства Российской Федерации от 06.05.2011 № 354 «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов». П. 5 / ред. с изм. от 10.07.2018 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.06.2020).
- СП 131.13330.2018** «СНиП 23-01-99 Строительная климатология» (Статистика климатических данных). М.: Минстрой России, 2019. URL: <http://sniprf.ru/sp131-13330-2018> (дата обращения: 10.06.2020).
- Серебrenников М.Г., Первозванский А.А.** Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
- Чердько Н.Н., Журавлев Г.Г., Кусков А.И.** Оценка современных климатических тенденций и синхронности их проявления в Алтайском регионе // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 379. С. 200–208.
- Шерстюков Б.Г.** Климатические условия отопительного периода в России в XX и XXI веках // Труды ГУ ВНИИГМИ-МЦД. 2007. Вып. 173. С. 163–170.

Alola A.A., Akadiri S.S., Akadiri A.C., Alola U.V., Fatigun A.S. Cooling and heating degree days in the US: The role of macroeconomic variables and its impact on environmental sustainability // *Science of The Total Environment*. 2019. V. 695. 133832. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133832>

Azevedo J.A., Chapman L., Muller C.L. Critique and suggested modifications of the degree days methodology to enable long-term electricity consumption assessments: A case study in Birmingham, UK // *Meteorological Applications*. 2015. V. 22. P. 789–796. doi: <https://doi.org/10.1002/met.1525>

Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom ; New York, NY : Cambridge University Press, 2013. 1535 p. doi: [10.1017/CBO9781107415324](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324)

Groth A., Feliks Y., Kondrashov D., Ghil M. Interannual Variability in the North Atlantic Ocean's Temperature Field and Its Association with the Wind Stress Forcing // *Journal of Climate*. 2017. V. 30. P. 2655–2678. doi: [h10.1175/JCLI-D-16-0370.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0370.1)

Isaac M., van Vuuren D.P. Modeling global residential sector energy demand for heating and airconditioning in the context of climate change // *Energy Policy*. 2009. V. 37. P. 507–521. doi: [10.1016/j.enpol.2008.09.051](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051)

Labriet M., Joshi S.R., Vielle M., Holden P.B., Edwards N.R., Kanudia A., Loulou R., Babonneau F. Worldwide impacts of climate change on energy for heating and cooling. // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2015. V. 20. P. 1111–1136. doi: [10.1007/s11027-013-9522-7](https://doi.org/10.1007/s11027-013-9522-7)

Larsen M.A.D., Petrovic S., Radoszynski A.M., McKenna R., Balyk O. Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe // *Energy & Buildings*. 2020. V. 226. 110397. doi: [10.1016/j.enbuild.2020.110397](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110397)

Matzarakis A., Balafoutis C. Heating degree-days over Greece as an index of energy consumption // *International Journal of Climatology*. 2004. V. 24, Is. 14. P. 1817–1828. doi: [10.1002/joc.1107](https://doi.org/10.1002/joc.1107)

Quayle R.G., Diaz H.F. Heating Degree Day Data Applied to Residential Heating Energy Consumption // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1980. V. 19, Is. 3. P. 241–246. doi: [10.1175/1520-0450\(1980\)019<0241:HDDDAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019<0241:HDDDAT>2.0.CO;2)

Yang S., Li Z., Yu J.-Y., Hu X., Dong W., He S. El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate // *National Science Review*. 2018. V. 5, Is. 6. P. 840–857. doi: [10.1093/nsr/nwy046](https://doi.org/10.1093/nsr/nwy046)

Spinoni J., Vogt J., Barbosa P. European dedree-day climatologies and trend for the period 1951–2011 // *International Journal of Climatology*. 2014. V. 35, Is. 1. P. 25–36. doi: [10.1002/joc.3959](https://doi.org/10.1002/joc.3959)

Wang C., Deser C., Yu J.Y., DiNezio P., Clement A. El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review // *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific. Coral Reefs of the World / eds by P. Glynn, D. Manzello, I. Enochs. Springer, Dordrecht*, 2017. V. 8. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4

References

Barashkova N.K., Volkova M.A., Kuzhevskaya I.V. *Otsenka sovremennoy klimaticheskoy sostavlyayushchey khozyaystvennogo kompleksa Tomskoy oblasti v kholodnyy period goda* [Evaluation of the contemporary climate component of Tomsk region economic complex during cold season] // *Tomsk State University Journal*. 2011. No. 351. pp. 163–168. In Russian

Bedritsky A.I., Korshunov A. A., Shaimardanov M. Z., Khandozhko L. A. *Problema ekonomicheskoi vygodnogo ispol'zovaniya meteorologicheskikh prognozov* [The issue of economic benefit in the use of weather forecasts] // *Russian Meteorology and Hydrology*. 1998. No. 10. pp. 5–17. In Russian

Vovk V.Ya., Egorova L.V. *Vliyaniye geomagnitnoy i vulkanicheskoy aktivnosti na yavleniye El'-Nin'o i La-Nin'a* [Effect of geomagnetic and volcanic activity on the El Nino and La Nina phenomenon] // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. T. 49. No. 2. pp. 278–288. In Russian

Volkova M.A., Cheredko N.N., Titovskaya A.A., Zhuravlev G.G. *Izmeneniya parametrov ekstremal'nosti temperaturnogo rezhima na yuge Zapadnoy Sibiri v kholodnyy period* [Extreme temperature regime of the cold period in the south of Western Siberia] // *Proceedings of the Main Geophysical Observatory*. 2019. V. 594. pp. 120–136. In Russian

Voskresenskaya E.N., Polonskii A.B. *Severo-Atlanticheskoye kolebaniye i yavleniya El'-Nin'o* [North Atlantic Oscillation and El Niño events] // *Soviet Journal of Physical Oceanography*. 1992. No. 4. pp. 23–30. In Russian

Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovoi zentr dannich. [All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. URL: <http://www.meteo.ru> (Date of accessed 15.05.2020). In Russian

Vtoroi ozenozhnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniakh klimata I ich posledstviakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation]. Moscow. 2014. 1008 p. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (Date of accessed 12.12.2019). In Russian

Ginzburg A.S., Demchenko P.F. *Antropogennyye mezo-meteorologicheskkiye obratnyye svyazi: obzor sovremennykh issledovaniy* [Anthropogenic meso-meteorological feedbacks: a review of a recent research] // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. No. 6. C. 94–113. In Russian

Ginzburg A.S., Reshetar O.A., Belova I.N. *Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na energopotrebleniye v otopitel'nyy sezon* [The impact of climatic factors on energy consumption during the heating season] // *Thermal Engineering*. 2016. No. 9. pp. 20–27.

GOST 30494-2011. Zdaniya zhilyye i obshchestvennyye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh [Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures] 2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (Date of accessed 20.05.2020). In Russian

Ippolitov I.I., Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Moraru E.I. *Izmenchivost' klimata Aziatskoy territorii Rossii v 1975–2012 gg.* [Climate variability over the Asian territory of Russia during 1975–2012] // *Geography and Natural Resources*. 2014. No. 4. pp. 13–21. In Russian

Karlin L.N., Malinin V.N., Gordeeva S.M. *Izmenchivost' gidrofizicheskikh kharakteristik v Gol'fstrime* [Variability of hydrophysical characteristics in the Gulf stream] // *Oceanology*. 2013. V. 53. No. 4. pp. 454–462. In Russian

Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Beznosova D.S., Andreychenko T.N. *Izmeneniye ob'yema i struktury kommunal'nogo energopotrebleniya pod vliyaniem ekonomicheskikh i klimaticheskikh faktorov* [Changing pattern and amount of the residen-

- tial and commercial energy consumption in response to economic and climatic factors] // Thermal Engineering. 2012. V. 59. No. 11. pp. 3–10. In Russian
- Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Mikushina O.V. *Izmeneniye parametrov otopitel'nogo perioda na Yevropeyskoy territorii Rossii v rezul'tate global'nogo potepleniya* [Changes in the parameters of the heating season in the European territory of Russia as a result of global warming] // *Izvestiya AN. Energetika* [Thermal engineering]. 2002. No. 2. pp. 10–27. In Russian
- Nekrasov A.S., Sinyak Yu.V., Voronina S.A., Semikashev V.V. *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya teplosnabzheniya v Rossii* [Current state and prospects for the development of heat supply in Russia] // Open seminar "Economic problems of the energy complex". One hundred twenty-fifth meeting of December 20, 2011 Moscow : Publishing house INP, 2012. pp. 4–57. In Russian
- Nosyreva O.V., Barashkova N.K., Kizhner L.I. *Opredeleniye prodolzhitel'nosti otopitel'nogo sezona* [Determination of heating season length] // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019. No. 9. pp. 99–109. In Russian
- Osipov A.M., Gushchina D.Yu. *El'-Nin'o 2015–2016 gg.: evolyutsiya, mekhanizmy, soputstvuyushchiye udalennyye anomalii* [El Niño 2015/2016: evolution, mechanisms, and concomitant remote anomalies] // *Fundamental and applied climatology*. 2018. No. 3. pp. 54–81. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81. In Russian
- Paromov V.V., Zemtsov V.A., Kopysov S.G. *Klimat Zapadnoy Sibiri v fazu zamedleniya potepleniya (1986–2015 gg.) i prognozirovaniye gidroklimaticheskikh resursov na 2021–2030 gg.* [Climate of Western Siberia in the phase of slowing warming (1986–2015) and forecasting of hydroclimatic resources for 2021–2030] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. V. 328. No. 1. pp. 62–74. In Russian
- Polonskii A.B. Atlantic multidecadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region // *Physical Oceanography*. 2008. V. 18. No. 4. pp. 227–236. doi: 10.1007/s11110-008-9020-8
- Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06.05.2011 № 354 «O predostavlenii kommunal'nykh uslug sobstvennikam i pol'zovatelyam pomeshcheniy v mnogokvartirnykh domakh i zhilykh domov. P. 5 / red. s izm. ot 10.07.2018 Spravochnaya pravovaya sistema «Konsul'tantPlyus»* [Decree of the Government of the Russian Federation dated 06.05.2011 No. 354 "On the provision of communal services to owners and users of premises in apartment buildings and residential buildings. P. 5 / ed. with rev. from 10.07.2018 – Reference legal system "ConsultantPlus"]. URL: <http://www.consultant.ru> (Date of accessed 10.06.2020). In Russian
- SP 131.13330.2018 «SNiP 23-01-99 Stroitel'naya klimatologiya» (Statistika klimaticheskikh dannykh)* [The set of rules SP 131.13330.2018 "SNiP 23-01-99 Building climatology" (Statistics of climatic data). Moscow: Ministry of Russia. 2019. URL: <http://sniprf.ru/sp131-13330-2018> (accessed 10.06.2020). In Russian
- Serebrennikov M.G., Pervozvansky A.A. *Vyyavleniye skrytykh periodichnostey* [Revealing hidden periodicities]. Moscow: Nauka, 1965. 244 p. In Russian
- Cheredko N.N., Zhuravlev G.G., Kuskov A.I. *Otsenka sovremennykh klimaticheskikh tendentsiy i sinkhronnosti ikh proyavleniya v Altayskom regione* [Estimation of modern climate trends and their synchronicity in the Altai region] // *Tomsk State University Journal*. 2014. No. 379. pp. 200–208. In Russian
- Sherstyukov B.G. *Klimaticheskiye usloviya otopitel'nogo perioda v Rossii v XX i XXI vekakh* [Climatic conditions of the heating season in Russia in the XX and XXI centuries] // *Trudy VNIIGMI-MTSD*. 2007. V. 173. pp. 163–170. In Russian
- Alola A.A., Akadiri S.S., Akadiri A.C., Alola U.V., Fatigun A.S. Cooling and heating degree days in the US: The role of macroeconomic variables and its impact on environmental sustainability // *Science of The Total Environment*. 2019. V. 695. 133832. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133832
- Azevedo, J.A.; Chapman, L.; Muller, C.L. Critique and suggested modifications of the degree days methodology to enable long-term electricity consumption assessments: A case study in Birmingham, UK. *Meteorol. Appl.* 2015. 22. pp. 789–796. doi: 10.1002/met.1525
- Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. doi: 10.1017/CBO9781107415324
- Groth A., Feliks Y., Kondrashov D., Ghil M. Interannual Variability in the North Atlantic Ocean's Temperature Field and Its Association with the Wind Stress Forcing // *J. Clim.* 2017. V. 30. pp. 2655–2678. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0370.1]
- Isaac M., van Vuuren D.P. Modeling global residential sector energy demand for heating and airconditioning in the context of climate change // *Energy Policy*. 2009. V. 37. pp. 507–521. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.051
- Labriet M., Joshi S.R., Vielle M., Holden P. B., Edwards N.R., Kanudia A., Loulou R., Babonneau F. Worldwide impacts of climate change on energy for heating and cooling. // *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 2015. 20. pp. 1111–1136. doi: 10.1007/s11027-013-9522-7
- Larsen M.A.D., Petrovic' S., Radoszynski A.M., McKenna R., Balyk O. Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe // *Energy & Buildings*. 2020. V. 226. 110397. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110397
- Matzarakis A., Balafoutis C. Heating degree-days over Greece as an index of energy consumption // *Int. J. Clim.* 2004. V. 24. Iss. 14. pp. 1817–1828. doi: 10.1002/joc.1107.
- Quayle R.G., Diaz H.F. Heating Degree Day Data Applied to Residential Heating Energy Consumption // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1980. V. 19. Iss. 3. pp. 241–246. doi: 10.1175/1520-0450(1980)019<0241:HDDDAT>2.0.CO;2
- Yang S., Li Z., Yu J.-Y., Hu X., Dong W., He S. El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate // *National Science Review*. 2018. V.5. Iss. 6. pp. 840–857. doi: 10.1093/nsr/nwy046]
- Spinoni J., Vogt J., Barbosa P. European dedree-day climatologies and trend for the period 1951–2011 // *Int. J. Clim.* 2014. V. 35. Iss. 1. pp. 25–36. doi: 10.1002/joc.3959
- Wang C., Deser C., Yu J.-Y., DiNezio P., Clement A. El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review. In: Glynn P., Manzello D., Enochs I. (eds) *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific. Coral Reefs of the World*, 2017. V. 8. Springer, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-017-7499-4_4

Информация об авторах:

Чередыко Н.Н., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоинформационных технологий, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: atnik3@rambler.ru

Волкова М.А., кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: mv2101@mail.ru

Scholtz O., руководитель центра, Региональное климатическое бюро, Ноу-хау центр технической климатологии (в области отопительной и климатической техники), Эссен, Германия.

E-mail: olesya.scholz@dwd.de

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Cheredko N.N., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: atnik3@rambler.ru

Volkova M.A., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: mv2101@mail.ru

Scholtz O., Team Leiter, Deutscher Wetterdienst, Branch Office Essen, Essen, Germany.

E-mail: olesya.scholz@dwd.de

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.08.2021; одобрена после рецензирования 31.03.2022; принята к публикации 13.03.2023

The article was submitted 18.08.2021; approved after reviewing 31.03.2022; accepted for publication 13.03.2023

Научный журнал

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

2023. № 1

Редактор Ю.П. Готфрид
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик С.И. Гертнер
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

*Для оформления обложки использована проекция Земного шара
из работы: Stampfli G.M., Borel G.D. / Earth and Planetary Science Letters 196 (2002) 17-33.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00588-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X)*

Подписано к печати 27.03.2023 г. Формат 60x84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 18,2; усл. печ. л. 16,9.
Тираж 50 экз. Заказ № 5383. Цена свободная.

Дата выхода в свет 04.04.2023 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru