

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2020

№ 4

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 базе данных Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index.

The Journal is indexed in the Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index.

Томский государственный университет
2020

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, доцент 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.-корр. РАН, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

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

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

Поляков Г.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-корр. РАН, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Реведратто 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

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

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

Худолей 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 Nolytoor Consultancy, Честерфилд, Университет 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, Ларамии, 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; **Катунин Д.А.,** канд. филол. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; **Краснова Т.С.,** канд. геол.-минерал. наук, начальник научного управления, 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; **Хромых О.В.,** канд. геогр. 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.), Associate 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

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

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

Polyakov G.V., Corresponding Member of RAS, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, 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, Holymoore 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;

Katunin D.A., Cand. Sci. (Philol.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; **Krasnova T.S.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), 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; **Khromykh O.V.**, Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

Пономарчук А.В., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Семенова Д.В., Кравченко А.А., Иванов А.И. Геохронология мезозойского щелочного магматизма для Тыркандинской и Амгинской тектонических зон (Алданский щит): новые U-Pb и Ag-Ag данные	6
Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е., Чудненко К.В. Физико-химическое моделирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Иркутская область, Россия)	25

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

Еникеев Ф.И. Особенности депрессии снеговой границы Сартанского оледенения Прибайкалья	33
Поздняков А.В., Пупышев Ю.С., Пучкин А.В., Фузелла Т.Ш. Генезис глядово-ложбинного рельефа Западно-Сибирской равнины	42

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Гребенщикова В.И., Грицко П.П. Источники урана, тория и серы в снеговой воде Иркутско-Ангарской промышленной зоны (Прибайкалье)	58
Мельник М.А., Волкова Е.С., Мельник С.А. Риски в сфере лесопользования, связанные с опасными природными процессами зимнего периода	68
Санин А.Ю., Кулаковская В.А. К вопросу об управлении природопользованием прибрежными приморскими рекреационными территориями Российской Федерации	84
Чечель Л.П. Распределение редких щелочных элементов в водах горнорудных объектов Восточного Забайкалья	98

ГИДРОЛОГИЯ

Копысов С.Г., Земцов В.А., Мацуяма Х., Елисеев А.О. Моделирование гидрографов стока арктических рек Западной Сибири в программе HBV-light для оценки экстремальных расходов половодья	108
Локтионова Т.А., Ерофеев А.А., Копысов С.Г. Пространственно-временная динамика элементов гидрологического цикла бассейна реки Седэяхи на основе модели гидролого-климатических расчетов	121

ПЕРСОНАЛИИ

Язиков Е.Г., Парначев В.П. Рихванов Леонид Петрович: маршрут от аспиранта до профессора	133
---	-----

CONTENTS

PETROLOGY, GEOCHEMISTRY

- Ponomarchuk A.V., Prokopyev I. R., Doroshkevich A.G., Semenova D.V., Kravchenko A.A., Ivanov A. I.** Geochronology of the Mesozoic alkaline magmatism of Tyrkanda and Amga tectonic zones (Aldan Shield): new U-Pb and Ar-Ar data 6
- Bryuhanova N.N., Bychinskij V.A., Budyak A.E., Chudnenko K.V.** Physical-chemical modeling of the ore-forming fluid of the Sukhoi Log deposit (Irkutsk region, Russia) 25

PALEOGEOGRAPHY

- Enikeev F.I.** Peculiar properties of the snow line depression in the Baikal region during the Sartan stage of the Late Pleistocene Glaciation 33
- Pozdnyakov A.V., Puchkin A.V., Pupyshev Yu.S., Fuzella T.Sh.** Genesis of the ridge-hollow relief of the West Siberian plain 42

GEOECOLOGY

- Grebenshchikova V.I., Gritsko P.P.** Sources of Uranium, Thorium and Sulfur in the snowy waters of the Irkutsk-Angarsk industrial zone (Baikal Region)..... 58
- Melnik M.A., Volkova E.S., Melnik S.A.** Risks in forest management depending on hazardous natural processes in winter period 68
- Chechel L.P.** Distribution of rare alkaline elements in water mining objects of the Eastern Transbaikalia 84
- Sanin A.Yu., Kulakovskaya V.A.** On the issue of environmental management of coastal recreation territories of the Russian Federation 98

HYDROLOGY

- Loktionova T.A., Erofeev A.A., Kopysov S.G.** Modeling of the spatio-temporal dynamics of hydrological cycle elements of the River Sedeyakha catchment on the basis of hydroclimatology calculation model 108
- Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Matsuyama H., Eliseev A.O.** River flow hydrograph simulation in the Western Siberia lowland north for the extreme flood flow prediction based on the HBV-Light model 121

GREAT PERSONS

- Yazikov E.G., Parnachev V.P.** Rikhvanov Leonid Petrovich: the route from graduate student to Professor 133

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

УДК 550.93:552.3

ГЕОХРОНОЛОГИЯ МЕЗОЗОЙСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАГМАТИЗМА ДЛЯ ТЫРКАНДИНСКОЙ И АМГИНСКОЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗОН (АЛДАНСКИЙ ЩИТ): НОВЫЕ U-Pb И Ar-Ar ДАННЫЕ



А.В. Пономарчук¹, И.Р. Прокопьев^{1,2}, А.Г. Дорошкевич¹, Д.В. Семенова¹,
А.А. Кравченко^{3,4}, А.И. Иванов³

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Институт геологии алмаза и благородных металлов, Якутск, Россия

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, Якутск, Россия

Исследуется Ar-Ar и U-Pb геохронология мезозойского щелочного магматизма Тыркандинской и Амгинской тектонических зон на примере Желтулинского и Верхнеамгинского массивов соответственно. Полученные результаты ограничивают диапазон мезозойского щелочного магматизма Амгинской зоны тектонического меланжа интервалом 139–117 млн лет, а Тыркандинской зоны тектонического меланжа – интервалом 121–111 млн лет. Обнаруженные в щелочных сиенитах Верхнеамгинского массива цирконы свидетельствуют о наличии трех кластеров возрастов: 1,9–2,1, 2,4–2,6 и 2,7–2,9 млрд лет соответственно. При этом примерно 70% точек соответствует второй группе возрастов.

Ключевые слова: Алданский щит, Ar-Ar датирование, датирование щелочных пород, мезозойский магматизм, датирование золоторудных месторождений.

Введение

Территория Алдано-Станового щита является крупным промышленным регионом скопления золоторудных объектов, связанных с проявлением поздне-мезозойского щелочного магматизма [Билибин, 1958; Бойцов, Пилипенко, 1998; Ветлужских и др., 2002; Максимов, 2003; Казанский, 2004; Кочетков, 2006; Дворник 2009; Максимов и др., 2010; Кравченко и др., 2014; Прокопьев и др., 2018; Khomich et al., 2014, 2016; Goryachev, Pirajno, 2014; Prokopyev et al., 2019]. Рудоносный щелочной магматизм на Алданском щите попадает в возрастной интервал 160–115 млн лет и представлен широким набором высококальциевых пород: щелочными сиенитами и сиенит-порфирами, монцонитами, лейцитовыми и нефелиновыми сиенитами, лампрофирами, биотитовыми пироксенитами и шонкинитами, а также щелочными и субщелочными базитами и гранитоидами [Богатиков и др., 1985; Владыкин, 1997; Панина, 1997; Максимов, 2003; Казанский, 2004; Кочетков, 2006; Дворник, 2009; Максимов и др., 2010; Прокопьев и др., 2018; Пономарчук и др., 2019; Borisenko et al., 2011; Mitchell et al., 1994; Prokopyev et al., 2019].

Золотое оруденение, ассоциирующее с калиевыми щелочными породами, проявлено в различных геодинамических обстановках – от магматических дуг до внутриплитного магматизма [Müller, Grouves, 2019]. Изучение радиогенных изотопов (Rb, Sr, Sm,

Nd) указывает на существование древнего, обогащенного в результате процессов субдукции 2,7–2,5 млрд лет назад мантийного источника [Bogatikov et al., 1994; Doroshkevich et al., 2018; Mitchell et al., 1994]. Реактивация Алданского щита, происходившая неоднократно в течение геологической истории, позволяет проследить эволюцию этого источника. Другие современные геодинамические данные показывают, что формирование мезозойского щелочного магматизма Алдано-Станового щита связано с влиянием подлитосферного «горячего поля мантии» в виде интенсивного рифтогенеза и внутриплитной вулканоплутонической деятельности, которая была сопряжена с формированием эпиконтинентальных прогибов, впадин и грабенов [Ярмолюк и др., 1995, 2000]. Причиной проявления мезозойской активности на Алдано-Становом щите рядом исследователей считается дегидратация субдуцирующей под Сибирский континент Тихоокеанской плиты и последующий апвеллинг астеносферного вещества, которые привели к деформациям в литосфере и проявлению многоэтапного плюмового магматизма, отвечающего за перенос полезных компонентов и формирование крупных золоторудных месторождений [Khomich et al., 2014, 2015].

В пределах Алдано-Станового щита выделяется несколько локальных рудных районов, в которых золоторудные объекты ассоциируют с проявлением мезозойского щелочного магматизма: Центральное

Алданский, Амгинский, Тыркандинский, Эльконский, Кет-Капский и др. [Дзевановский и др., 1972; Ветлужских, 1990; Максимов, 2003; Прокопьев и др., 2018; Prokoryev et al., 2019].

Исследуемый Желтулинский щелочной массив является основным рудным объектом Тыркандинского золоторудного района и представляет собой расслоенный сиенитовый вулканоплутон, сформированный в несколько фаз внедрения щелочного комплекса в интервале 138–115 млн лет, в пределах которого установлено два типа рудной минерализации: золоторудная и уран-торий-редкоземельная [Кравченко и др., 2014; Прокопьев и др., 2018]. Верхнеамгинский массив, расположенный в Амгинской зоне тектонического меланжа, имеет возраст формирования 117–135 млн лет [Prokoryev et al., 2019]. В публикации приводятся новые данные по геохронологии становления основных фаз массивов и возрасту рудоносных метасоматитов.

Геология

Сибирский кратон образует коллаж микроконтинентов (Тунгусский, Анабарский, Оленекский, Алданский и Становой), ограниченных раннепротерозойскими орогенными складчатыми поясами [Rosen et al., 2002]. Согласно геохронологическим данным, крупные корообразующие события в пределах Сибирского кратона происходили на рубежах 3,5; 3,3; 3,0 и 2,5 млрд лет [Frost et al., 1998; Rosen et al., 2002]. Алдано-Становой щит является южным выступом фундамента Сибирского кратона на поверхность и характеризуется сложным строением. Существует несколько точек зрения на тектоническое районирование Алданского щита. Ряд исследователей делит Алданский щит на Алданский геоблок, а также Чара-Олекминский и Батомгский геоблоки, примыкающие с запада и востока Алданского геоблока соответственно [Котов и др., 2005, 2006, 2017].

Алданский геоблок, в свою очередь, подразделяется на Западно- и Восточно-Алданский (Учурский) мегаблоки, которые представлены практически полностью метаморфизованными породами гранулитовой фации. Центральная часть Алданского щита сложена широко распространенными архейскими и раннепротерозойскими гранитоидами, которые являются преимущественно гранитогнейсами [Великославинский и др., 2011; Ларин и др., 2012]. Пять эпизодов проявления внутриплитного магматизма раннего докембрия, включая формирование гранитоидов А-типа, отчетливо различаются в истории формирования Алданского щита и его складчатого обрамления: 2,62; 2,40–2,52; 2,07; 1,87–1,88 и 1,74–

1,70 млрд лет соответственно. При этом установлено, что гранитоиды образовались в разных геодинамических обстановках – при постколлизиином расширении литосферы (2,64; 1,87–1,88 млрд лет), и анорогенные – вследствие активности мантийных плюмов (2,40–2,52; 2,07 и 1,74–1,70 млрд лет) [Великославинский и др., 2011; Ларин и др., 2012].

В данной работе используется модель тектонического строения Алдано-Станового щита согласно [Парфенов, Кузьмин, 2001], которая выделяет пять супертеррейнов (рис. 1): Западно-Алданский супертеррейн (WA), Центрально-Алданский составной террейн (включающий Нимнырский (ANM), Сутамский (AST)), Восточно-Алданский составной террейн (включающий Батомгинский (EBT) и Учурский (EUC)), а также Тындинский (TN) и Чогарский (CG) супертеррейны [Парфенов, Кузьмин, 2001]. Составные террейны Алдано-Станового щита, в свою очередь, разделены зонами тектонического меланжа: Амгинская (am), Каларская (kl) и Тыркандинская (tr). Исследуемый Желтулинский щелочной массив расположен в пределах докембрийского Учурского гранулит-парагнейс-ового террейна (EUC) и примыкает к Тыркандинской зоне тектонического меланжа, маркирующей зону раннепротерозойской аккреции молодого кратона – Учурского террейна (EUC) к более древнему Центрально-Алданскому супертеррейну [Парфенов, Кузьмин, 2001] (см. рис. 1).

Тыркандинская зона тектонического меланжа в плане имеет дугообразную форму и протягивается на 1650 км при ширине 50–200 км [Парфенов, Кузьмин, 2001]. В строении зоны участвуют тектонические пластины образованные различными ассоциациями докембрийских пород. Пластины ограничены узкими зонами бластомилонитов, которые в субдолготной ветви насыщены телами докембрийских гранитоидов. Внутри пластин установлено несколько этапов докембрийской складчатости: ранний (связанный с надвигообразованием) – изоклиальная складчатость с падением крыльев складок в северо-восточном направлении и поздний (связанный со сдвиговыми движениями) [Парфенов и Кузьмин, 2001; Мельников и др., 2015]. Для образованных на позднем этапе бластомилонитовых зон установлены левосдвиговые перемещения. В целом на поздних этапах эволюции, вплоть до современного времени, более существенную роль в развитии зоны играли сдвиговые смещения блоков, которые контролировали ее развитие [Мельников и др., 2015]. На востоке Тыркандинской зоны тектонического меланжа обнажаются породы Учурского террейна (EUC, см. рис. 1).

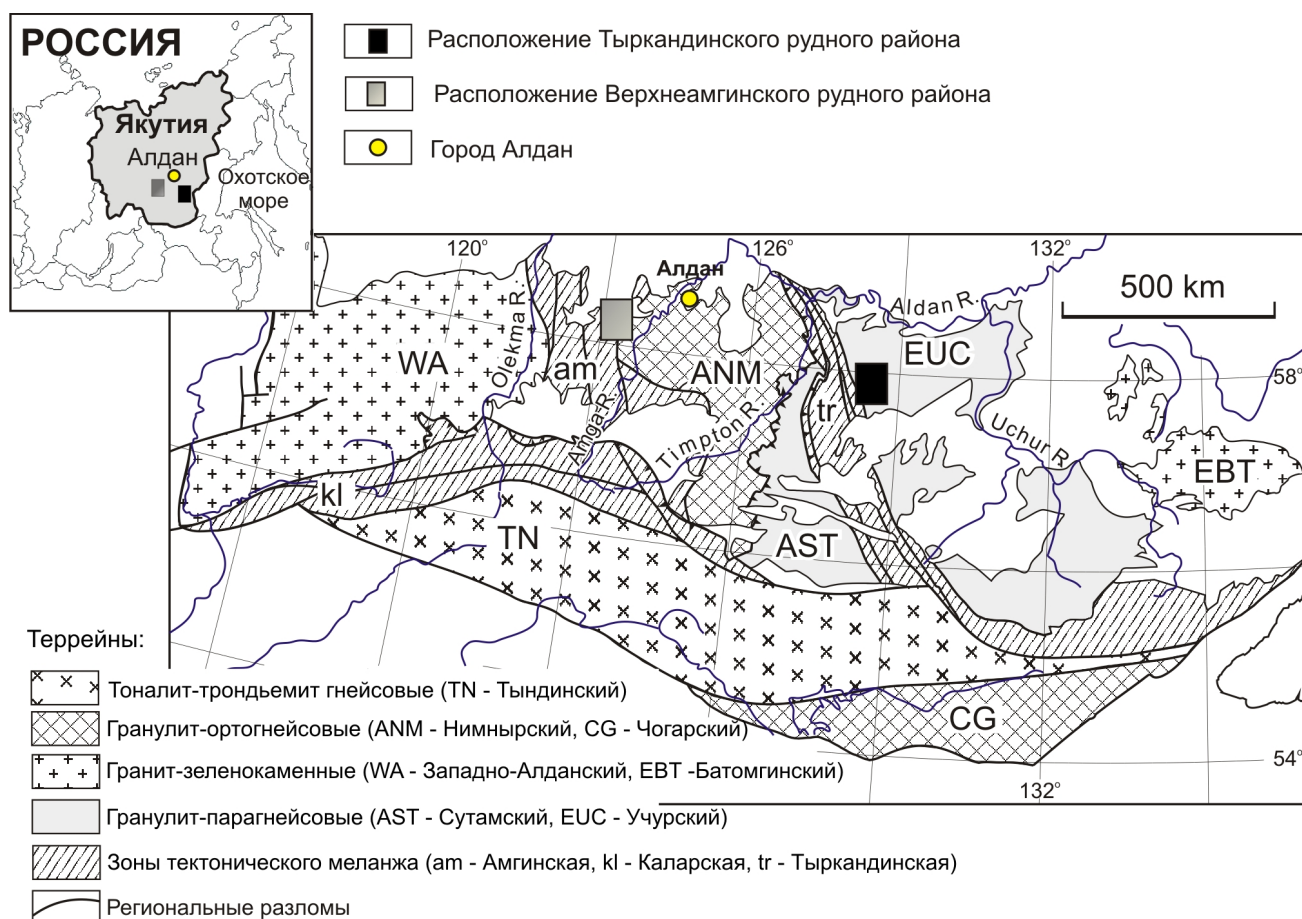


Рис. 1. Схема тектонического строения Алдано-Станового щита
(данные [Парфенов, Кузьмин, 2001; Prokopyev et al., 2019] с дополнениями авторов)

Fig. 1. Scheme of the tectonic structure of the Aldan-Stanovoi shield
(data [Parfenov, Kuzmin, 2001; Prokopyev et al., 2019] with additions of the authors)

Его структурный план определяется гранито-гнейсовыми куполами размером до 150 км в поперечнике [Парфенов и Кузьмин, 2001]. Ядра куполов образованы гранито-гнейсами, чарнокитогнейсами и энтербитогнейсами. Мезозойская тектоно-магматическая активизация в пределах Тыркандинской зоны меланжа унаследовала докембрийские зоны разломов и выразилась в формировании катаклазитов и псевдотахилитов [Парфенов, Кузьмин, 2001; Кравченко и др., 2014]. По форме будин в зонах разломов и смещениям геологических комплексов с псевдотахилитами установлены правосдвиговые перемещения. С формированием правых сдвигов связано возникновение дуплексов растяжения, хорошо проявленных в гравитационном поле и по наличию мезозойских щелочных магматических пород.

Мезозойские магматиты широко представлены полями даек, штоками и крупным Джелтулинским массивом центрального типа, сложенными породами монцонит-сиенитовой и щелочно-сиенитовой формаций разнообразного состава – от диорит-порфиров до нефелиновых сиенитов с преобладанием кварцевых сиенитов, монцонитов и граносиенитов

(рис. 2). Становление интрузивов сопровождалось контактово-метасоматическими и гидротермально-метасоматическими процессами в виде ороговикования, хлоритизации, эпидотизации, серицитизации вмещающих пород, наложенным окварцеванием [Прокопьев и др., 2018]. В щелочных сиенитах Джелтулинского массива проявлены процессы щелочного метасоматоза: альбитизации, серицитизации, эгиринизации, выщелачивания и цеолитизации. Именно к ареалам мезозойских магматических пород тяготеют все известные в пределах района россыпи золота и золоторудные проявления.

Верхнеамгинский щелочной массив находится в 120 км к западу от г. Алдана, в северо-западной части Алданского нагорья, в верхнем течении бассейна р. Амга (приток р. Алдан). Территория исследуемого района по современным тектоническим данным входит в состав Амгинской субмеридиональной структурной зоны тектонического меланжа, разделяющей два крупных мегаблока Алдано-Станового щита – Западно-Алданский гранит-зеленокаменный составной террейн (с запада) и Нимнырский гранулит-ортогнейсовый (с востока) [Парфенов, Кузьмин, 2001].

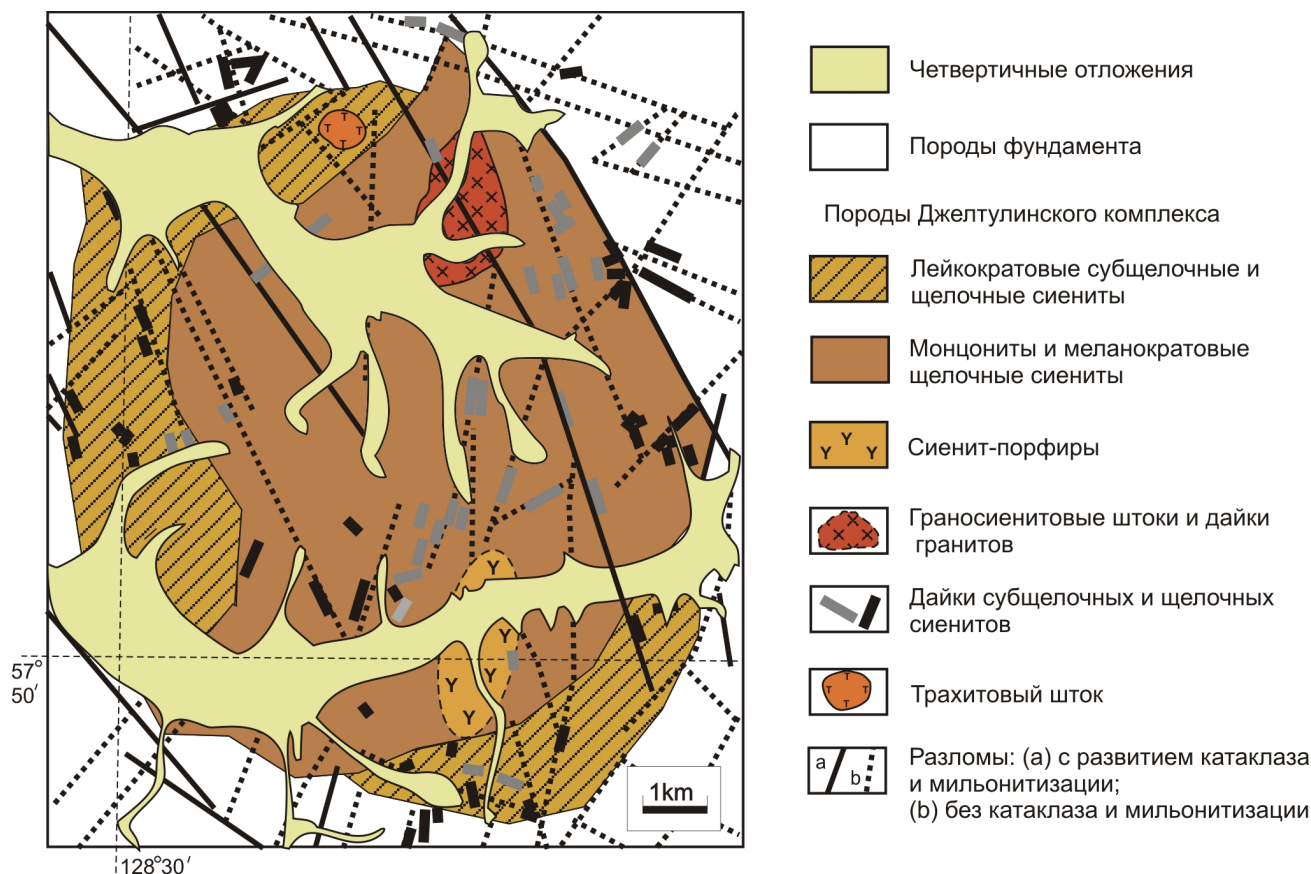


Рис. 2. Геологическое строение Джелтулинского массива
(по [Кравченко и др., 2014; Прокопьев и др., 2018])

Fig. 2. The geological structure of the Dzheltulinsky massif
(data [Kravchenko et al., 2014; Prokopyev et al., 2018])

В плане Амгинская сутурная зона имеет дугообразную форму и протягивается на 500 км с севера на юг при ширине порядка 150–200 км (см. рис. 1). Структурный план зоны определяется широким развитием надвиговых и сдвиговых структур, а также сопряженных с ними систем складок, ориентировка которых подчинена простиранию зоны [Парфенов, Кузьмин, 2001].

В строении Амгинской зоны участвуют архейские комплексы амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма, раннепротерозойские ортогнейсовые и парагнейсовые толщи субгранулитовой гранулитовой фации, а также фрагменты архейских и раннепротерозойских зеленокаменных поясов и дифференцированные плутоны ультраосновных и основных пород [Парфенов, Кузьмин, 2001].

Структурная позиция Верхнеамгинского золотосного района характеризуется многоярусным строением, определяющим три главных типа геоструктур региона: нижнедевонский фундамент, венд-нижнедевонский осадочный чехол и мезо-

зойские участки активизации (рис. 3). Архейские структуры фундамента с несогласием перекрыты венд-нижнедевонским платформенным чехлом морских глинисто-карбонатных осадков. На отдельных участках в северной части района, на вершинах водоразделов сохранились небольшие мощности мезозойских терригенных отложений юрской (юхтинская свита) и кайнозойской систем [Парфенов, Кузьмин, 2001].

Основной объем магматических образований связан с платформенным этапом мезозойской тектономагматической активности. Мезозойские изверженные породы на современном эрозионном срезе представлены крупным телом и множеством штоков сиенитов и сиенит-порфиров, а также примыкающими к нему с юга штоками монцонитов. Встречаются отдельные тела щелочных (эгириновых) гранитов (см. рис. 3). Дайковый комплекс представлен силлами, штоками и дайками лампрофиров (минетт). Дайки лампрофиров имеют преимущественно северо-западное и северо-восточное направление, соответствующее преобладающим направлениям тектонических разломов.

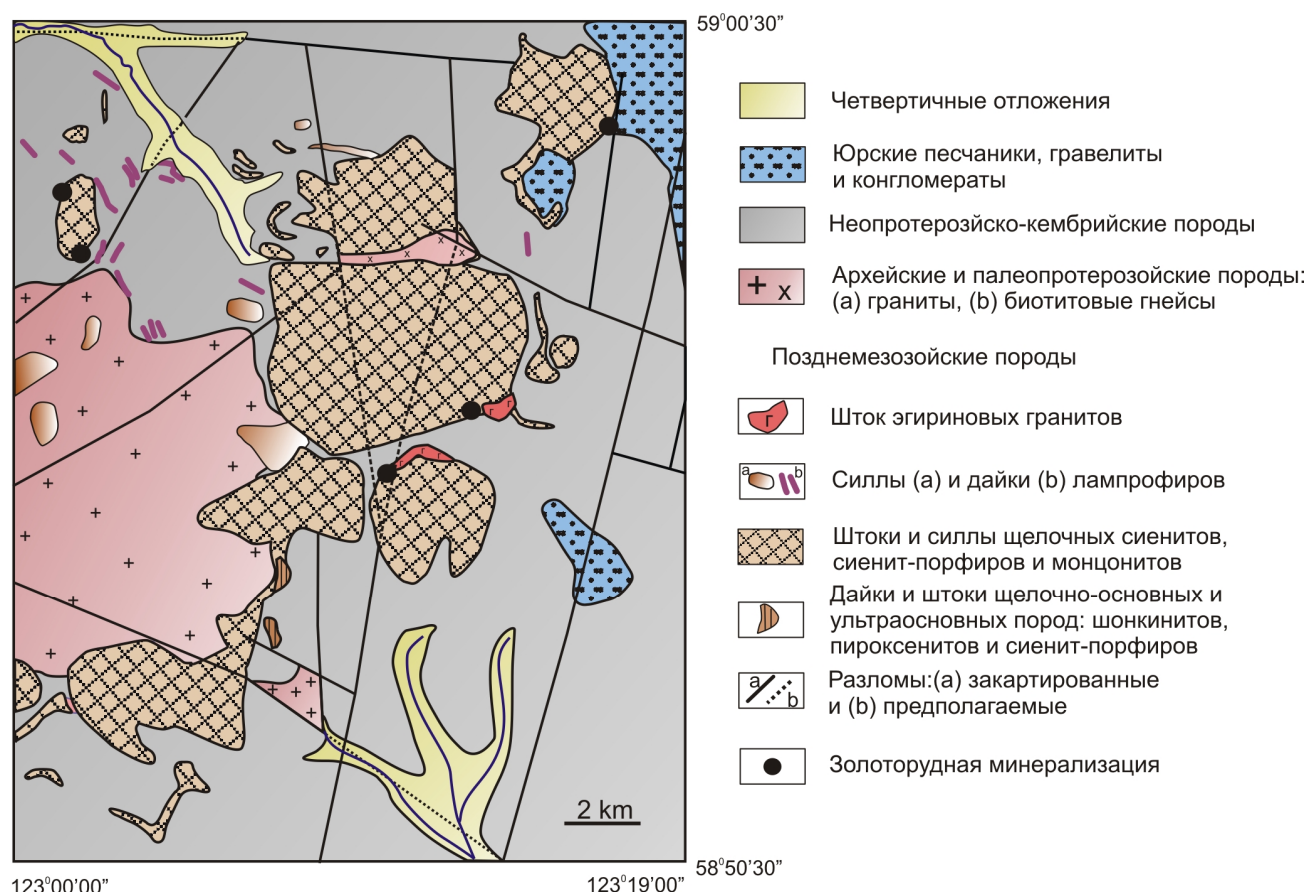


Рис. 3. Геологическая схема строения Верхнеамгинского массива
(данные [Prokopyev et al., 2019] с дополнениями авторов)

Fig. 3. Geological structure of the Verkhneamginsky massif
(data [Prokopyev et al., 2019] with additions of the authors)

Кроме того, в пределах Верхнеамгинской площади встречаются дайки и штоки щелочно-базитовых и ультраосновных пород: шонкиниты, пироксениты и сиенит-порфиры (см. рис. 3), отвечающие одним из ранних фаз становления мезозойского комплекса в пределах Верхнеамгинского массива (по геологическим данным).

Со щелочными интрузиями связаны зоны сульфидизации, окварцевания и скарнирования, сопровождаемые золоторудной минерализацией [Prokopyev et al., 2019]. Тектоническая характеристика района определяется разломами субмеридионально-северовосточного простирания, входящими в систему Амгинского глубинного разлома. Разломы северо-восточного и северо-западного простирания формируют диагональные разрывные структуры, наложенные на зону Амгинского глубинного разлома, или органически входят в его структуру, наследуя его тектонику. Заложенные в докембрийское время разломы этой системы неоднократно активизировались, особенно активно в мезозое, когда была сформирована блоковая структура района, интенсивно

проявлен магматизм и связанная с ним золоторудная гидротермальная деятельность [Парфенов, Кузьмин, 2001; Prokopyev et al., 2019].

Методика измерений

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование. Эксперименты по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датированию проводились по мономинеральным фракциям, отбор которых производился вручную под бинокулярной лупой из фракции 0,3–0,1 мм измельченного образца. Облучение проб было проведено в кадмированном канале научного реактора ВВР-К типа в Научно-исследовательском институте ядерной физики (Томск). Градиент нейтронного потока за период облучения не превышал 0,5 % в размере образца. В качестве монитора использовался стандартный K/Ag образец мусковит МСА-11 (ОСО No 129–88), подготовленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом минерального сырья Министерства геологии СССР (ВИМС) в 1988 г. Для его калибровки в качестве $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ монитора применялись международные стандартные

образцы мусковит Bern 4m и биотит LP-6 [Baksi et al., 1996]. По результатам калибровки в качестве возраста мусковита MCA-11 было принято среднее, которое составило $311,0 \pm 1,5$ млн лет [Травин, 2016]. Значение полной постоянной распада ^{40}K , в соответствии с [Steiger, Jager, 1977], принималось равным $5,543 \times 10^{-10}$ год $^{-1}$.

Холостой опыт по определению ^{40}Ar (10 мин при 1 200 °C) не превышал 5×10^{-10} нсм 3 . Очистку аргона производили с помощью Ti- и ZrAl-SAES-геттеров. Дополнительная очистка осуществлялась с помощью кварцевого аппендикса, погруженного в жидкий азот. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы «Микромасс» (Великобритания). Для коррекции на изотопы ^{36}Ar , ^{37}Ar , ^{40}Ar , полученные при облучении Ca, K, использованы следующие коэффициенты: $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0,000891 \pm 0,000005$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0,000446 \pm 0,000006$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0,089 \pm 0,001$. Особое внимание уделялось контролю фактора изотопной дискриминации с помощью измерения порции очищенного атмосферного аргона. Среднее значение отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ на период измерений составило $295,5 \pm 0,5$. Нагревание образца происходило в кварцевом реакторе, помещенном в резистивную печь. Датирование производилось методом ступенчатого прогрева. Контроль температуры осуществлялся посредством хромель-алюмелевой термопары. Точность регулировки температуры составляла ± 1 °C.

U/Pb датирование. Определение возраста зерен циркона U/Pb методом было проведено в Центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. Измерения проводились на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Thermo Scientific Element XR (Германия), соединенном с системой лазерной абляции New Wave Research UP 213, на основе ультрафиолетового Nd:YAG лазера с длиной волны 213 нм. Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигналов Pb и U при минимальном значении $^{254}\text{UO}/^{238}\text{U}$ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb} + \text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Съемка проводилась в режиме E-scan, детектирование сигналов – в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме ^{206}U , ^{238}U и ^{232}Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 30 мкм, частота повторения импульсов 5 Hz и плотность энергии лазерного излучения 3 Дж/см 2 . Данные масс-спектрометрических измерений обрабатывали с помощью программы Glitter [Griffin et al., 2008]. U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартного циркона Plesovice [Slama et al., 2008]. Для контроля качества использованы цирконовые стан-

дарты Temora [Black et al., 2004] и Harvard 91500 [Wiedenbeck et al., 1995], для которых получены конкордантные оценки возраста 414 ± 4 млн лет ($n = 14$) и 1062 ± 11 млн лет ($n = 10$) (2 σ) соответственно. Данные для стандартов циркона совпадают с оценками возраста, полученными методом ID-TIMS. Диаграммы с конкордией построены с использованием программы Isoplot [Ludwig, 2003].

Петрография исследуемых пород

Верхнеамгинский массив. Согласно геологическому, петрографическому и минералогическому исследованию щелочных пород Верхнеамгинского массива, установлено, что основные фазы представлены штокообразными телами сиенитов и сиенит-порфиоров, а также дайками и пластовыми интрузиями лампрофиоров (минетт). Детальная вещественная характеристика основных фаз массива дана в работе [Prokoryev et al., 2019]. Далее приведена краткая петрографическая характеристика исследуемых геохронологическими методами образцов пород: интрузий минетт (обр. 7062, 9079) и щелочных сиенитов (Ам-45-18 и Ам-46-18) (рис. 3, 4).

Щелочные сиениты сложены калиевым полевым шпатом с мезопертитовыми вростками альбита и содержат порфировые вкрапленники альбита, калиевого полевого шпата, амфибола и биотита (флогопита). Полевые шпаты являются главными породообразующими минералами, на них приходится 45–75 % содержания породы. Для данной породы характерна порфировидная структура и массивная текстура. Индекс темноты – лейкократовая порода. Размеры вкрапленников достигают первых миллиметров. Второстепенными и акцессорными минералами (5–15 %) являются апатит, титанит, циркон и рудные минералы. Вторичные минералы представлены карбонатом, эпидотом и хлоритом. Лампрофиры представляют собой равномернозернистую полевошпатовую породу с рассеянной вкрапленностью (1–3 %) чешуек флогопита, зерен магнетита, кристаллов апатита, иногда порфировых вкрапленников оливина и клинопироксена, которые замещаются хлоритом и серицитом. В интерстициях между зерен полевого шпата отмечаются редкие зерна кварца. Структура породы – порфировидная, структура основной массы – равномернозернистая, ксеноморфная. Порода – лейкократовая. Размеры вкрапленников могут достигать первых миллиметров. Из второстепенных и акцессорных минералов (менее 1 %) диагностированы апатит, карбонат, титанит, альбит, циркон и рудные минералы.

Джелтулинский массив. Для геохронологических исследований джелтулинского массива были отобраны образцы сиенитов ДЖ 13-08-012, ДЖ 13-08-034 и ДЖ 13-08-80 (рис. 5), а также рудного метасоматита ДЖ 13-08-116. Далее приведена краткая петрографическая характеристика этих образцов.

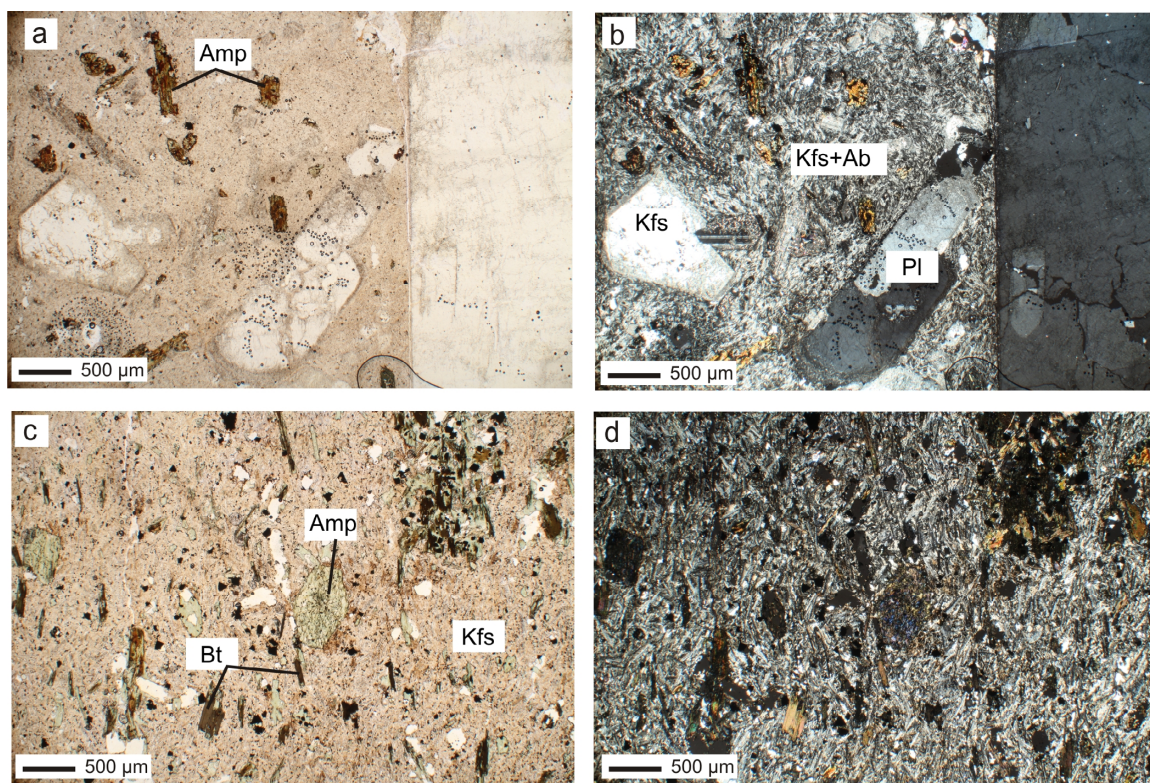


Рис. 4. Фотографии петрографических шлифов сиенит-порфира (a, b – николи скрещены) и лампрофиров (c, d – николи скрещены) Верхнеамгинского массива

Обозначения минералов: Amp – амфибол, Kfs – калишпат, Ab – альбит, Pl – плагиоклаз, Bt – биотит

Fig. 4. Photographs of petrographic sections of syenite-porphyr (a, b – nicols crossed) and lamprophyres (c, d – nicols crossed) of the Verkhneamginsky massif

Identification of minerals: Amp – amphibole, Kfs – potassium feldspar, Ab – albite, Pl – plagioclase, Bt – biotite

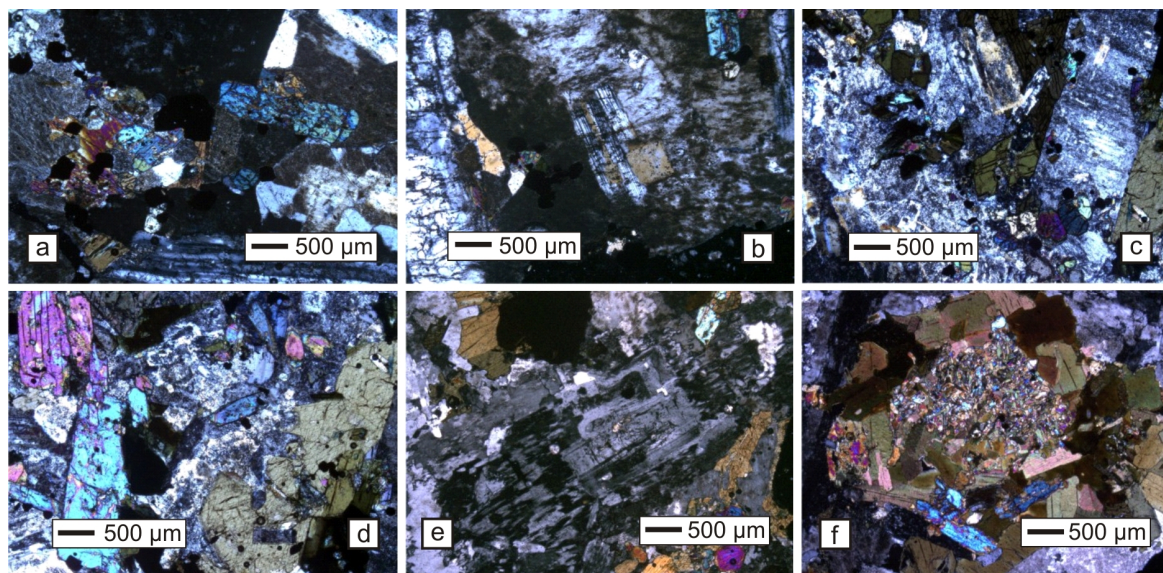


Рис. 5. Фотографии шлифов пород Джелтулинского массива

a – моноклинный пироксен в сиените ДЖ 13-08-012; b – включения плагиоклаза и цветных минералов в порфировых выделениях КПШ в сиените ДЖ 13-08-012; c – фрагмент порфировидной структуры сиенита ДЖ 13-08-034, порфировые выделения представлены крупными индивидами КПШ; d – удлиненно-призматические кристаллы пироксена и роговой обманки в сиените ДЖ 13-08-034; e – общая структура сиенита ДЖ 13-08-080; f – шлировые скопления цветных минералов в сиените ДЖ 13-08-080

Fig. 5. Photographs of thin sections of rocks of the Dzheltulinsky massif

a – Monoclinic pyroxene in syenite DZ 13-08-012; b – Inclusions of plagioclase and non-ferrous minerals in porphyry secretions of Kfs in syenite DZ 13-08-012; c – a fragment of the porphyry structure of syenite DZ 13-08-034, porphyry precipitates are represented by large individuals of the Cpy; d – elongated prismatic crystals of pyroxene and hornblende in syenite DZ 13-08-034; e – the general structure of syenite DZ 13-08-080; f – accumulations of colored minerals in syenite DZ 13-08-080

Сиенит ДЖ 13-08-012 полнокристаллический, меланократовый. Содержание калиевого полевого шпата (КПШ) – 75 %, плагиоклаза – 10 %, пироксена – 8 %, биотита – 2 %, роговой обманки – 5 %, рудных минералов – 3 %. КПШ пелитизирован, образует неправильные зерна, характерны простые двойники, наиболее крупные выделения калиевого полевого шпата несут включения плагиоклаза и цветных минералов (см. рис. 5, *b*). Плагиоклаз изменен вторичными процессами, сохранился лишь в качестве включений в КПШ. Моноклинный пироксен представлен в виде призматических, удлиненных, неправильной формы зерен с неровными очертаниями, плеохроизм от бледно-зеленого, бледно-желтого до зеленовато-синих, бледно-розоватых тонов. Пироксен частично изменен вторичными процессами и довольно часто замещен роговой обманкой (см. рис. 5, *a*). Роговая обманка представлена неправильными, реже короткопризматическими формами зерен с цветом плеохроизма от зеленого до бурого. Биотит присутствует в виде единичных зерен неправильной формы. Рудные минералы развиваются по темноцветным.

Состав сиенита ДЖ 13-08-034 представлен КПШ – 60 %, плагиоклазом – 15 %, биотитом – 10 %, пироксеном – 10 %, роговой обманкой – 3 %, рудным минералом – 2 %. Структура породы порфировидная, обусловленная крупными индивидами КПШ (см. рис. 5, *c*), основная масса состоит из гипидиоморфнозернистых кристаллов плагиоклаза и темноцветных минералов. Биотит преобладает среди темноцветных минералов, и равномерно распределен по всей породе в виде индивидуальных гипидиоморфных пластинок. Пироксен и роговая обманка образуют небольшие, неравномерно распределенные скопления, а также встречаются в виде индивидуальных зерен (см. рис. 4, *d*). Рудный минерал тяготеет к темноцветным минералам.

Сиенит ДЖ13-08-80 характеризуется гипидиоморфнозернистой структурой (см. рис. 5, *e*), полиминеральным составом. Минеральный состав представлен: КПШ – 70 %, плагиоклаз – 10 %, оливин – 4 %, пироксен – 5 %, биотит – 5 %, роговая обманка – 10 %, рудный минерал – 1 %. Порода сложена преимущественно удлиненными, призматическими с неправильными очертаниями, изометричными, зернами калиевого полевого шпата с пертитовым строением. Плагиоклаз представлен самостоятельными, прямоугольными, удлиненными формами кристаллов. Роговая обманка представлена короткими призмами с неправильной формы зернами. Моноклинные пироксены двух генераций. Первая представлена удлиненными, призматическими с неправильными очертаниями зернами, в сростках с роговой обманкой или замещающая последнюю. Вторая генерация образует шлировые скопления совместно с биотитом и

роговой обманкой (см. рис. 5, *f*). Оливин сохранился в виде зерен неправильной формы с характерной трещиноватостью. Биотит присутствует в двух генерациях. Первая генерация представлена более крупными самостоятельными пластинками биотита, образующими круговые скопления вместе с роговой обманкой вокруг шлировых скоплений более мелких цветных минералов. Вторая генерация биотита представлена тонкими чешуйками, которые образуют шлировые скопления, в ассоциации с очень мелкими пироксеном и роговой обманкой.

Результаты Ar-Ar датирования

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Джелтулинского массива. Возрастной спектр монофракции биотита из образца щелочного сиенита ДЖ 13-08-80 образует $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр, состоящий из шести ступеней (рис. 6, *b*; табл. 1). Четыре последние ступени соответствуют возрастному плато с возрастом $117,8 \pm 3,8$ млн лет (рис. 6, *b*). Общее количество газа среди ступеней, составляющих возрастное плато отвечает более 80 % от выделенного ^{39}Ar .

Амфибол из меланократовых сиенитов (обр. ДЖ 13-08-034, рис. 6, *a*; табл. 1) демонстрирует возрастной спектр, состоящий из девяти ступеней. Четыре последние ступени объединяются в возрастное плато, средневзвешенный возраст которого составляет $111 \pm 1,3$ млн лет (рис. 6, *a*). Плато включает 75 % ^{39}Ar выделенного в ходе измерений.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр полевого шпата образца щелочных сиенитов (ДЖ 13-08-012) состоит из десяти ступеней (рис. 6, *c*; табл. 1). Семь ступеней образуют возрастное плато – возрасты всех ступеней совпадают в пределах погрешности 1σ [Fleck et al., 1977]. Средневзвешенный возраст плато равен $120,2 \pm 1,7$ млн лет. Плато включает около 75 % выделенного ^{39}Ar .

Валовая проба рудного метасоматита ДЖ 13-08-116 имеет $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр из девяти ступеней (рис. 6, *d*; табл. 1). Все ступени кроме первой могут быть включены в возрастное плато со средневзвешенным возрастом $121,4 \pm 2,3$ млн лет с содержанием ^{39}Ar более 90 % от общего количества (рис. 6, *d*).

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Верхнеамгинского массива. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектр полевого шпата дайки минетты (обр. 7062, см. рис. 7, *a*; табл. 2), состоит из десяти ступеней (рис. 7, *a*). Восемь средне- и высокотемпературных ступеней образуют возрастное плато и определяют средневзвешенный возраст исследуемого образца величиной $138,5 \pm 1,5$ млн лет (табл. 2). Количество выделенного ^{39}Ar в рамках возрастного плато составляет более 95 % от общего объема ^{39}Ar , выделившегося из образца в ходе эксперимента.

По полевому шпату из дайки минетты (обр. 9079, рис. 7, *b*; табл. 2) получен $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной

спектр, состоящий из десяти ступеней (рис. 7, *b*). Восемь ступеней можно объединить в возрастное плато. Средневзвешенный возраст полученного возрастного плато составляет $133,4 \pm 2$ млн лет. Объем выделенного в рамках возрастного плато ^{39}Ar достигает 85 % (табл. 2). Полученный возраст соответствует возрасту закрытия $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопной системы в полевом шпате образца и отвечает времени становления дайки минетты.

Результаты U-Pb датирования

Для определения U-Pb возраста пород Верхнеамгинского массива были отобраны цирконы из трубок взрыва АМ 45-18 и АМ 46-18. В основном цирконы

представлены в виде обломков размером 200–400 мкм. В катодолюминесцентных изображениях наблюдается магматическая зональность. Встречаются предположительно реликтовые ядра цирконов (см. рис. 8). U-Pb изотопные результаты и характер распределения тория, урана и величины Th/U приведены в табл. 3.

Экспериментально полученные результаты свидетельствуют о наличии трех кластеров возрастов: 1,9–2,1; 2,4–2,6 и 2,7–2,9 млрд лет соответственно (рис. 8, табл. 3). При этом примерно 70 % точек соответствует второй группе возрастов. Средневзвешенный возраст по этим группам результатов составляет $2\,466 \pm 24$ млн лет и $2\,449 \pm 21$ млн лет для образцов АМ 45-18 (рис. 8, *a*) и АМ 46-18 (рис. 8, *b*) соответственно.

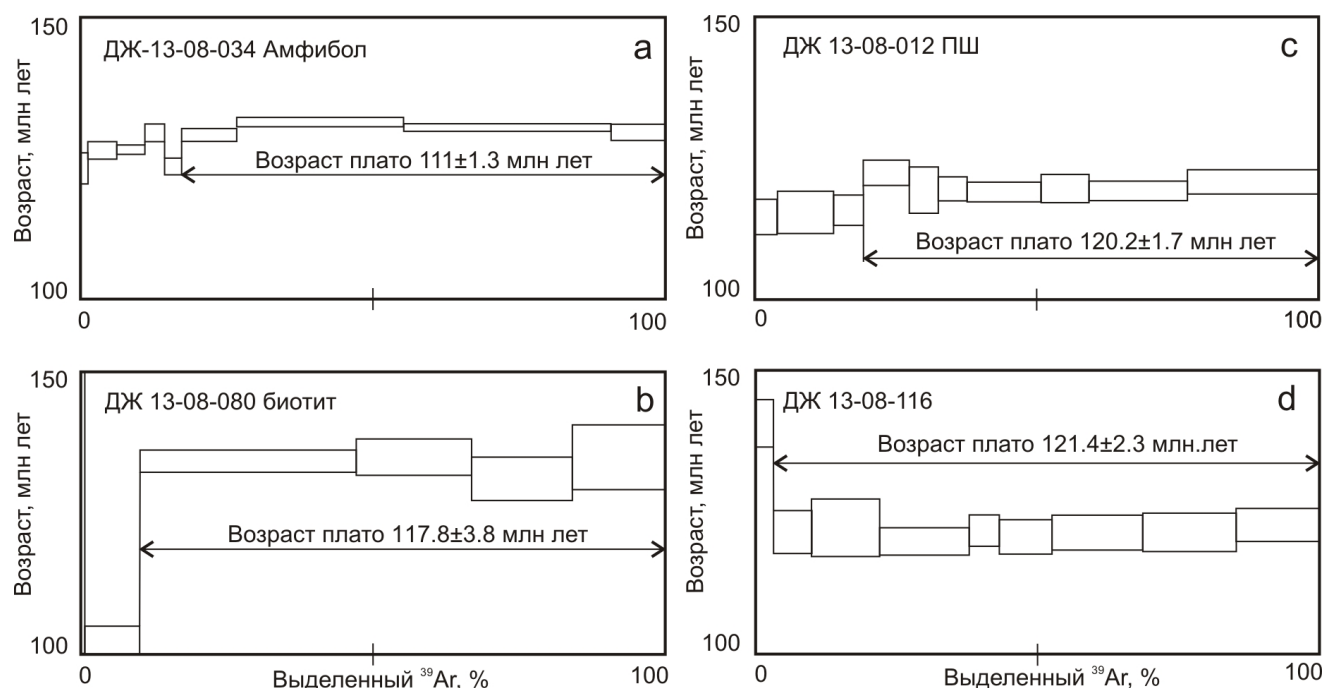


Рис. 6. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Джелтулинского массива

a – возрастные спектры амфибола из образца сиенита ДЖ 13-08-034; *b* – биотита из образца сиенита ДЖ 13-08-080; *c* – полевого шпата из образца сиенита ДЖ 13-08-012; *d* – метасоматита ДЖ 13-08-116

Fig. 6. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Dzheltulinsky massif.

a – Age spectra of amphibole from syenite sample DZ 13-08-034; *b* – biotite from syenite sample DZ 13-08-080; *c* – feldspar from syenite sample DZ 13-08-012; *d* – ore bearing metasomatic rock DZ 13-08-116

Таблица 1

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Джелтулинского массива

Table 1

Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Dzheltulinsky massif

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
ДЖ 13-08-80 биотит; J = 0,004976 ± 0,000065											
500	115,7	12,4	0,1	0,1	0,8	0,6	0,3	0,1	0,7	112,8	265,9
850	19,2	0,2	0,033	0,008	0,07	0,03	0,06	0,01	10,1	9,3	31,0
970	18,47	0,03	0,015	0,001	0,011	0,008	0,016	0,001	47,2	118,3	3,8
1 025	18,19	0,05	0,016	0,003	0,01	0,01	0,015	0,003	67,0	119,7	6,6
1 100	19,30	0,06	0,021	0,002	0,01	0,01	0,022	0,003	84,1	112,2	7,6
1 170	19,08	0,09	0,018	0,003	0,03	0,01	0,018	0,005	100,0	119,8	11,5

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
ДЖ 13-08-034 амфибол; J = 0,003948 ± 0,000041											
500	33,4	0,5	0,04	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,07	0,01	3,5
600	22,88	0,09	0,017	0,001	0,006	0,002	0,006	0,002	0,023	0,004	17,2
700	20,78	0,05	0,021	0,001	0,020	0,007	0,020	0,007	0,013	0,002	31,1
800	19,48	0,06	0,019	0,003	0,029	0,004	0,029	0,004	0,017	0,003	46,8
900	21,59	0,02	0,026	0,004	0,036	0,006	0,036	0,006	0,025	0,001	55,7
1 000	20,43	0,03	0,016	0,001	0,049	0,005	0,049	0,005	0,022	0,001	69,0
1 075	20,06	0,03	0,016	0,002	0,059	0,005	0,059	0,005	0,016	0,001	83,4
ДЖ 13-08-034 ПШ; J = 0,00511 ± 0,000068											
500	24,5	5,4	0,25	0,05	0,42	0,09	0,2	0,2	0,3	10	574,7
600	19,52	0,02	0,0167	0,0002	0,004	0,003	0,023	0,001	4,1	114,8	3,0
685	14,86	0,02	0,0177	0,0004	0,101	0,004	0,006	0,001	14,1	115,6	3,8
750	16,11	0,02	0,015	0,002	0,070	0,003	0,0105	0,0009	19,3	116,0	2,7
825	15,34	0,01	0,0169	0,0004	0,088	0,004	0,0053	0,0006	27,5	122,7	2,2
890	16,15	0,03	0,012	0,001	0,102	0,003	0,009	0,001	32,5	119,6	4,1
970	17,15	0,02	0,0138	0,0007	0,067	0,002	0,0125	0,0006	37,7	119,9	2,1
1 050	15,63	0,01	0,0150	0,0003	0,063	0,001	0,0076	0,0003	50,8	119,3	1,7
1 100	16,68	0,02	0,0172	0,0006	0,060	0,002	0,0109	0,0007	59,4	119,9	2,4
1 150	15,93	0,01	0,0162	0,0004	0,0486	0,0006	0,0086	0,0003	76,8	119,5	1,8
1 200	15,65	0,02	0,0161	0,0001	0,036	0,001	0,0070	0,0006	100,0	121,0	2,1
ДЖ 13-08-116; J = 0,005091 ± 0,000068											
500	87,4	2,3	0,04	0,03	0,3	0,1	0,18	0,03	0,2	285,5	61,7
600	22,80	0,04	0,0187	0,0009	0,012	0,007	0,023	0,002	3,2	140,9	4,2
680	16,16	0,03	0,0162	0,0007	0,007	0,004	0,008	0,001	10,0	121,7	3,8
750	14,88	0,03	0,0173	0,0005	0,003	0,003	0,004	0,002	22,2	122,4	5,1
800	14,27	0,01	0,0160	0,0004	0,001	0,001	0,0026	0,0007	38,0	120,0	2,4
850	15,19	0,03	0,0120	0,0009	0,0009	0,0009	0,0049	0,0009	43,3	122,0	2,8
925	14,65	0,02	0,0156	0,0002	0,0005	0,0005	0,004	0,001	52,7	120,9	3,1
1 000	14,22	0,02	0,0159	0,0002	0,0003	0,0003	0,002	0,001	68,8	121,6	3,1
1 075	14,34	0,02	0,0148	0,0002	0,0003	0,0003	0,002	0,001	85,4	121,7	3,4
1 175	14,48	0,02	0,0155	0,0001	0,002	0,002	0,002	0,001	100,0	123,0	2,9

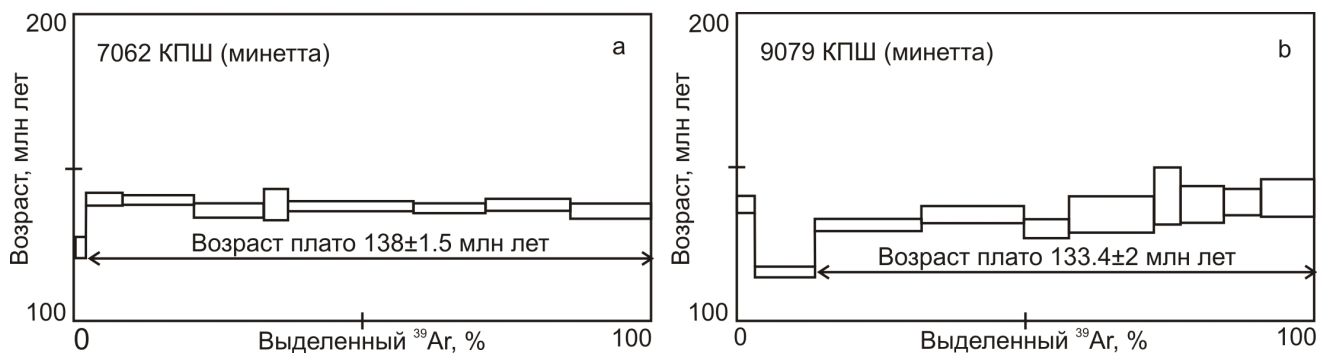


Рис. 7. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Верхнеамгинского массива
Возрастные спектры КФС из образцов минет 7062 (a) и 9079 (b)

Fig. 7. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Verkhneamginsky massif
Age spectra of Kfs from lamprophyre samples 7062 (a) and 9079 (b)

Таблица 2

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Верхнеамгинского массива

Table 2

Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Verkhneamginsky massif

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
7 062 КФС J = 0,003684 ± 0,000036											
500	86,0	1,4	0,04	0,02	17,6	7,9	0,26	0,01	0,3	67,8	24,6
600	36,4	0,1	0,025	0,002	2,0	1,2	0,058	0,002	2,1	124,2	3,5
700	26,82	0,03	0,016	0,002	1,0	0,2	0,0168	0,0009	8,5	139,8	2,1
775	24,42	0,02	0,0150	0,0004	0,7	0,2	0,0087	0,0005	20,7	139,7	1,6
825	23,23	0,03	0,0177	0,0006	0,4	0,1	0,007	0,001	32,9	136,2	2,4

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
875	25,02	0,07	0,0193	0,0003	0,1	0,1	0,012	0,003	37,1	138,1	5,1
950	22,83	0,02	0,0167	0,0001	0,11	0,08	0,0044	0,0004	58,8	137,7	1,5
1 000	23,25	0,01	0,0176	0,0008	0,3	0,2	0,0061	0,0005	71,3	137,1	1,6
1 065	23,89	0,02	0,0174	0,0004	0,2	0,1	0,0078	0,0008	86,0	138,0	2,0
1 130	24,35	0,03	0,0179	0,0006	0,2	0,2	0,010	0,001	100,0	136,2	2,5
9 079 КПШ J = 0,003515 ± 0,000032											
500	72,2	0,1	0,041	0,003	0,5	0,4	0,168	0,001	3,2	137,7	2,7
600	25,51	0,02	0,020	0,001	0,4	0,2	0,0223	0,0008	13,6	116,2	1,8
675	25,84	0,03	0,0162	0,0009	0,1	0,1	0,0147	0,0009	32,0	131,4	2,0
740	26,34	0,04	0,0176	0,0008	1,0	0,2	0,015	0,001	49,7	134,6	2,8
800	24,04	0,06	0,019	0,002	0,7	0,2	0,009	0,002	57,5	130,2	3,1
900	24,5	0,1	0,017	0,001	0,5	0,1	0,008	0,003	72,3	134,6	6,0
975	26,1	0,1	0,022	0,002	0,5	0,3	0,010	0,005	76,9	140,8	9,3
1 050	25,96	0,1	0,0158	0,0002	0,01	0,07	0,011	0,003	84,3	137,9	6,0
1 100	25,92	0,08	0,018	0,001	0,0	0,2	0,011	0,002	90,8	138,8	4,2
1 150	26,2	0,1	0,0184	0,0004	0,01	0,03	0,011	0,003	100,0	140,3	6,2

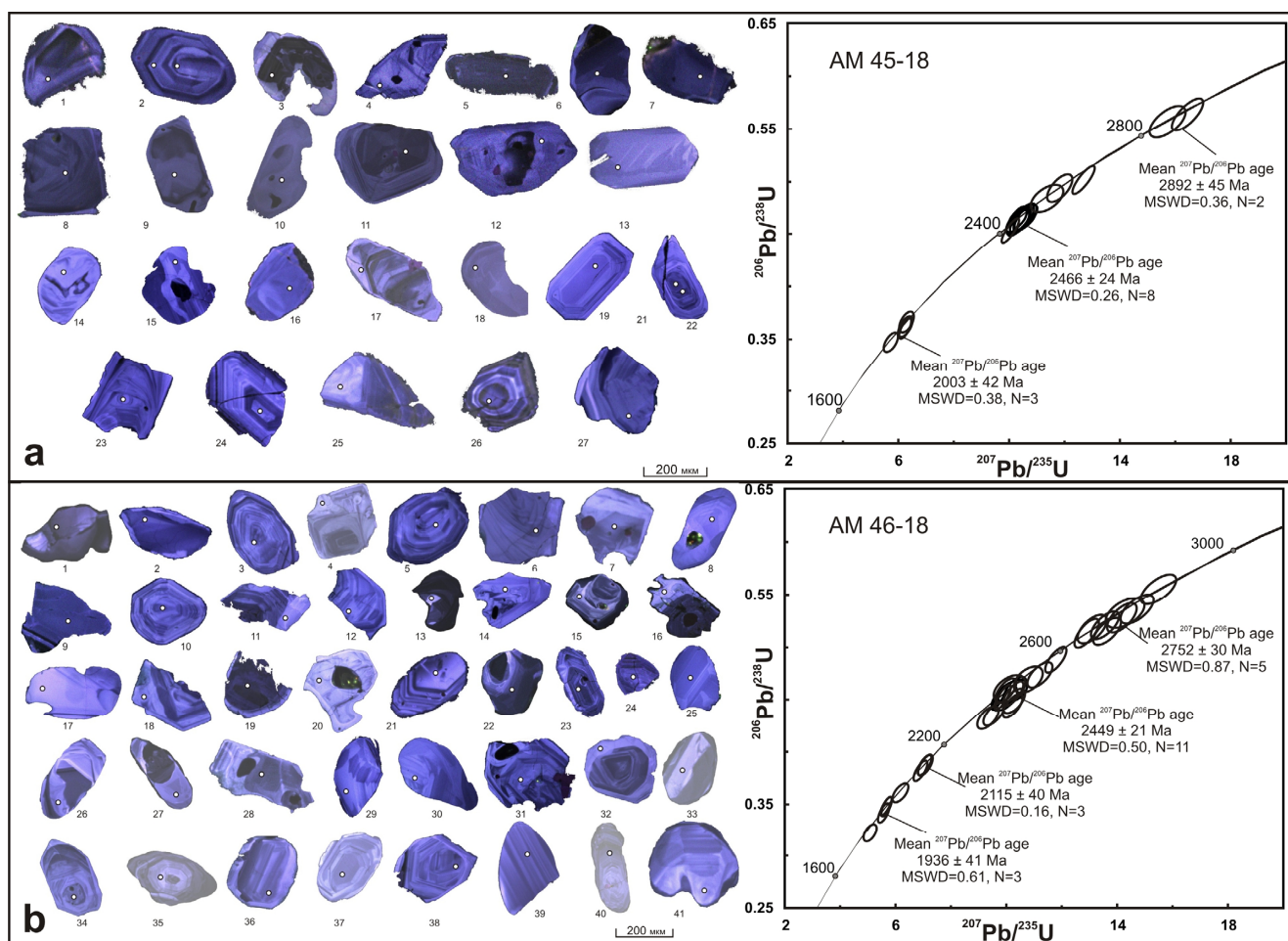


Рис. 8. Результаты U-Pb исследования цирконов из щелочных пород Верхнеамгинского массива AM 45-18 (a) и AM 46-18 (b)

Fig. 8. The results of the U-Pb investigations of zircons from alkaline rocks of the Verkhneamginsky massif AM 45-18 (a) and AM 46-18 (b)

Результаты U-Pb датирования пород Верхнеамгинского массива

Results of U-Pb dating of rocks of the Verkhneamginsky massif

№	Th/U	²⁰⁶ Pb, ppm	U, ppm	Изотопные отношения						Возраст, млн лет									
				Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	1σ	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	1σ
1	0,70	328	796	0,15665	0,00309	9,85322	0,2011	0,45297	0,00759	0,15081	0,00256	2 420	33	2 421	19	2 409	34	2 839	45
5	1,07	69	140	0,19488	0,00392	14,69975	0,39444	0,53688	0,00907	0,14855	0,00259	2 784	33	2 796	26	2 770	38	2 799	46
9	1,02	132	415	0,12068	0,00244	5,64852	0,12715	0,34821	0,00584	0,09369	0,00164	1 966	36	1 924	19	1 926	28	1 810	30
10	1,14	74	144	0,2072	0,00421	15,45234	0,43002	0,55577	0,0094	0,14886	0,00266	2 884	36	2 844	27	2 849	39	2 805	47
11	0,79	28	67	0,16216	0,0035	10,09813	0,37078	0,4611	0,00796	0,13236	0,00262	2 478	36	2 444	34	2 444	35	2 513	47
12	0,94	64	147	0,16156	0,00341	10,77276	0,34818	0,47007	0,00801	0,13281	0,00252	2 472	35	2 504	30	2 484	35	2 521	45
13	0,22	104	290	0,13135	0,0027	7,06219	0,17182	0,38831	0,00653	0,11347	0,00228	2 116	36	2 119	22	2 115	30	2 172	41
14	1,44	86	213	0,15823	0,00327	9,55176	0,24631	0,43655	0,00735	0,12073	0,0022	2 437	35	2 393	24	2 335	33	2 304	40
15	0,73	28	94	0,1124	0,00246	5,05317	0,15273	0,32338	0,00551	0,09502	0,00187	1 839	39	1 828	26	1 806	27	1 835	35
17	0,52	67	136	0,19116	0,00407	14,25565	0,46747	0,53307	0,00907	0,16644	0,00342	2 752	35	2 767	31	2 754	38	3 112	59
20	0,89	36	85	0,15782	0,00341	9,92605	0,30769	0,45245	0,00768	0,12837	0,00259	2 433	36	2 428	29	2 406	34	2 441	46
21	1,21	103	233	0,1838	0,00363	12,89758	0,29478	0,51373	0,00873	0,14859	0,00253	2 688	32	2 672	22	2 673	37	2 800	45
22	0,57	325	1 064	0,11823	0,00232	5,66053	0,10837	0,34897	0,00589	0,10364	0,00175	1 930	35	1 925	17	1 930	28	1 993	32
25	0,51	80	172	0,19445	0,00387	14,16719	0,35715	0,52844	0,00896	0,1474	0,00263	2 780	32	2 761	24	2 735	38	2 779	46
26	0,21	133	376	0,13019	0,00258	7,04295	0,14757	0,38736	0,0065	0,11012	0,00198	2 101	34	2 117	19	2 111	30	2 112	36
27	0,85	67	215	0,11704	0,00238	5,55987	0,13469	0,34212	0,00577	0,09899	0,00172	1 912	36	1 910	21	1 897	28	1 908	32
28	0,96	84	201	0,16013	0,00321	9,97226	0,24549	0,45884	0,00772	0,12598	0,00217	2 457	33	2 432	23	2 434	34	2 398	39
29	1,13	63	134	0,18791	0,00379	13,09341	0,3574	0,51749	0,00873	0,13984	0,00243	2 724	33	2 686	26	2 689	37	2 646	43
30	0,60	32	95	0,12257	0,00259	6,1709	0,18548	0,36098	0,00613	0,10233	0,00194	1 994	37	2 000	26	1 987	29	1 969	36
31	1,14	82	199	0,16162	0,0033	9,32856	0,25252	0,43313	0,00727	0,11792	0,00206	2 473	34	2 371	25	2 320	33	2 253	37
32	1,00	95	217	0,16142	0,00327	10,2971	0,26654	0,46115	0,0077	0,13026	0,00226	2 471	34	2 462	24	2 445	34	2 475	40
33	0,11	711	1 627	0,15574	0,00306	9,71782	0,18136	0,45289	0,00747	0,13052	0,00226	2 410	33	2 408	17	2 408	33	2 480	40
34	1,30	73	158	0,16367	0,00332	11,19789	0,29836	0,47455	0,00791	0,13873	0,0024	2 494	34	2 540	25	2 504	35	2 626	43
35	0,27	211	572	0,13224	0,00266	6,88253	0,15305	0,3828	0,00633	0,1445	0,00271	2 128	35	2 096	20	2 089	30	2 728	48
37	1,35	136	298	0,16041	0,00323	10,21105	0,23297	0,45668	0,00751	0,12872	0,00221	2 460	34	2 454	21	2 425	33	2 447	40
38	1,02	89	198	0,16088	0,00326	10,21284	0,24164	0,44501	0,00732	0,13476	0,00234	2 465	34	2 454	22	2 373	33	2 555	42
39	0,50	95	180	0,18724	0,0038	13,54506	0,34516	0,52146	0,00858	0,16198	0,00294	2 718	33	2 718	24	2 705	36	3 034	51
40	0,48	174	350	0,17383	0,0035	11,77483	0,25603	0,48837	0,00798	0,15422	0,00271	2 595	33	2 587	20	2 564	35	2 899	47
41	0,45	166	315	0,18208	0,00369	13,62277	0,32676	0,51554	0,00844	0,1589	0,00286	2672	33	2 724	23	2 680	36	2 981	50
42	0,68	43	91	0,15651	0,00335	10,21261	0,34676	0,45877	0,00766	0,15773	0,00302	2418	36	2 454	31	2 434	34	2 960	53
43	0,85	91	194	0,15979	0,00328	10,27655	0,25479	0,44943	0,00735	0,13293	0,00237	2 453	34	2 460	23	2 393	33	2 523	42

Обсуждение результатов

Мезозойский магматизм. Полученные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом возраста внедрения даек лампрофиров согласуются с ранее опубликованными датировками мезозойского магматизма Верхнеамгинского массива. Кристаллизация сиенитов и поздних даек лампрофиров происходила $131,4 \pm 1,5$ млн лет ($131,4 \pm 2,9$ млн лет, U-Pb метод [Prokoryev et al., 2019]) и $117,7 \pm 3,4$ млн лет назад соответственно [Пономарчук и др., 2019], а ранний этап внедрения даек лампрофиров имел место в интервале $134,9 \pm 1,6 - 132,3 \pm 1,5$ млн лет [Prokoryev et al., 2019]. Исследуемый в работе образец дайки минетты 7062 показывает чуть более древний возраст внедрения – $138,5 \pm 1,5$ млн лет, что расширяет диапазон щелочного магматизма до интервала $138,5 \pm 1,5 - 117,7 \pm 3,4$ млн лет.

В результате проведенных исследований получен возраст формирования меланократовых сиенитов (ДЖ 13-08-012 и ДЖ 13-08-80) – $120,2 \pm 1,7$ млн лет (по полевоому шпату) и $117,8 \pm 3,8$ млн лет (по биотиту), соответственно. Так же получен возраст внедрения дайки меланократовых сиенитов (ДЖ 13-08-034) – $111 \pm 1,3$ млн лет (по амфиболу). Возраст образования рудного метасоматита (ДЖ 13-08-116) составил $121,4 \pm 2,3$ млн лет.

Полученные возрасты кристаллизации щелочных сиенитов совпадают с ранее опубликованными датировками [Прокопьев и др., 2018] – возраст лейкократовых сиенит-порфиров (пуласкинов) составляет $121,1 \pm 1,3$ млн лет, а дайки лаурвикитов и пуласкинов внедрились в массив в интервале $120,1 \pm 2 - 118,3 \pm 2,1$ млн лет. При этом полученный возраст дайки меланократовых сиенитов (ДЖ 13-08-034) – $111 \pm 1,3$ млн лет, что несколько моложе возраста трахитов – $115,5 \pm 1,6$ млн лет [Прокопьев и др., 2018] и расширяет интервал мезозойского магматизма от 121 до 111 млн лет.

Установленные временные рамки магматизма Верхнеамгинского массива близки по времени с позднемезозойскими магматическими процессами, широко проявленными в других районах Алдано-Станового щита. Особое место среди щелочных областей Алдана отводится Центрально-Алданскому району, с одной стороны, в силу его особого экономического потенциала, а с другой – в силу его наибольшей изученности. Рябиновый щелочной массив считается эталонным объектом, на котором проявлены все фазы мезозойского щелочного магматизма [Кочетков и др., 1989; Максимов, 2003]. Данные Ar-Ar датирования ортоклаза из щелочного сиенита массива установили возраст формирования пород – $144,8 \pm 1,5$ млн лет [Borisenko et al., 2011]. Дайки лампрофиров Рябинового массива датируются интервалом 129–125 млн лет [Borisenko et al., 2011]. В пределах Лебединого рудного поля лампро-

фиры имеют близкий возраст – $132,4 \pm 1,6$ млн лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ по флогопиту [Borisenko et al., 2011]). U-Pb и Rb-Sr изотопные системы подтверждают (раннемеловой-позднеюрский) возраст кристаллизации сиенитов и лампрофиров Рябинового массива – 147–120 млн лет [Шатов и др., 2012; Шатова и др., 2017].

Щелочные породы массива Инагли (Центрально-Алданский район) сформировались в несколько этапов: кристаллизация оторочки дунитового ядра – клинопироксенитов, датируется возрастом $145,8 \pm 3,2$ млн лет; и образование дифференцированного щелочного кольца массива происходило в интервале 133–128 млн лет [Ибрагимова и др., 2015; Пономарчук и др., 2019]. Возраст образования флогопитовой вкрапленности в дунитах составляет $136,5 \pm 5,3$ млн лет (по флогопиту), а возраст формирования рудных жил (по амфиболу из полевошпат-хромдиопсид-слюданой жилы) равен $133,4 \pm 1$ млн лет [Пономарчук и др., 2019].

В результате исследований массива Ыллымах (Центрально-Алданский район) выделено три эпизода внедрения магм – 140, 130 и 125 млн лет, соответствующие трем группам пород – фельдшпатоидным и щелочные сиенитам, сиенитам от нефелина до кварцсодержащих и эгириновые щелочно-полевошпатовым гранитам [Васюкова и др., 2020].

Полученный возраст оруденения Желтулинского массива – $121,4 \pm 2,3$ млн лет – совпадает со становлением ранних фаз – лейкократовыми сиенитами и сиенит-порфирами. Мезозойский магматизм Желтулинского массива, как и связанное с ним золотое оруденение, моложе по сравнению с магматизмом Центрально-Алданского рудного узла. Эволюция рудообразующих систем Центрально-Алданского района охватывает интервал 138–130 млн лет. Основные рудопродуктивные стадии на месторождениях Рябиновое, Куранах и Лебединое, по данным Ar-Ag датирования, попадают в достаточно узкий диапазон времени ~ 137 млн лет, что предполагает их синхронное проявление в различных участках Центрально-Алданского щелочного комплекса. U-Pb возраст цирконов околорудных гумбеитов Рябинового массива составляет 125–133 млн лет [Шатова и др., 2017]. По данным U-Pb датирования, магматическая и гидротермально-метасоматическая деятельность в пределах Эльконского золото-уранового рудного узла отвечает диапазону 143–125 млн лет. Золото-урановые руды эльконского горста имеют возраст 130–125 млн лет [Казанский, 2004].

Докембрийская магматическая активность. U-Pb (SIMS/LA-ICP MS) анализ цирконов из образцов трубок взрыва (Ам 45-18 и Ам 46-18) показал наличие в каждом двух кластеров возрастов – 2,6–2,4 и 2,0–1,8 млрд лет. Подобные возрастные рубежи неоднократно встречались в цирконах мезозойских щелочных пород Алданского щита и являются отра-

жением длительной и многоэтапной эволюции. Например, в щелочных сиенитах Верхнеамгинского массива, вместе с цирконами, соответствующим возрасту кристаллизации пород – 131 млн лет, обнаружены цирконы возрастом 2,5–2,2 и 1,9–1,87 млрд лет [Prokoryev et al., 2019]. Возрасты цирконов 2,6 и 1,9 млрд лет отмечены для сиенитов и лампрофиров Рябинового массива Центрально-Алданского района [Шатов и др., 2012]. Цирконы в кварцевом монцодиорит-порфире щелочного обрамления массива Инагли Центрально-Алданского района, также, помимо мезозойского возраста кристаллизации, обнаруживают группы докембрийских возрастов – 1888 ± 31 и 2380 ± 33 млн лет [Ибрагимова и др., 2015]. Возраст же ядер цирконов кварцевого сиенит-порфира того же массива имеет конкордатные значения 1 924 и 1 920, $2\,566 \pm 48$ млн лет.

В строении центральной части Алдано-Станового щита архейские и раннепротерозойские гранитоиды имеют исключительно широкое время кристаллизации: становление интрузий гранитоидов нелюкского комплекса произошло в интервале $2\,398 \pm 4$ – $2\,522 \pm 2$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Котов и др., 2004]). Ортогнейсы тимптонского комплекса имеют возраст $2\,011 \pm 2$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Котов и др., 1995]). Для метаандезитов Балаганского зеленокаменного пояса и федоровской толщи U-Pb методом по циркону получена оценка возраста $2\,006 \pm 3$ млн лет [Великославинский и др., 2003, 2006]). Порфиробластические биотит-амфиболовые гнейсограниты Амгинской зоны тектонического меланжа имеют возраст $2\,423 \pm 43$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Сальникова и др., 1993]), а возраст лейкосом мигматитов составляет 1895 ± 14 млн лет (U-Pb метод по циркону [Nutman et al., 1992]). Внедрение магнезиокарбонатитов Селигдарского месторождения датируется возрастом $1\,880 \pm 13$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Prokoryev et al., 2017]). Изучение геохимии магнезиокарбонатитов Селигдара (Центральный Алдан) показало, что породы образовались из обогащенного мантийный источника, отделенного от деплетированной мантии на рубеже

2,5–2,7 млрд л. н. [Doroskevich et al., 2018]. Подобный тренд эволюции (ϵNd) отмечается для протерозойского Чинейского расслоенного массива и позднеархейских лампроитов Хани [Doroskevich et al., 2018; Vladykin et al., 2005]. На основании исследований геохимических характеристик массивов Центрального Алдана (Рябиновый, Томмотский, Якокутский и Инаглинский) предложена модель двухстадийной эволюции калиевых пород – докембрийская стадия формирования источников калиевых расплавов, с возможным участием субдуцированного компонента, и поднемозойская стадия, в ходе которой был широко проявлен щелочной магматизм, обусловленный благоприятным геодинамическим режимом, при этом влияние на состав пород источника было незначительным [Кононова и др., 1995].

Заключение

Таким образом, диапазон мезозойского щелочного магматизма Амгинской зоны тектонического меланжа 139–117 млн лет близок ко времени становления основных фаз Центрально-Алданского щелочного комплекса 145–125 млн лет.

Становление Желтулинского массива Тыркандинской зоны тектонического меланжа происходило в интервале 121–111 млн лет, что моложе времени образования центрально-алданских и верхнеамгинских щелочных пород.

Обнаруженные в щелочных сиенитах Верхнеамгинского массива цирконы демонстрируют значения возрастов, совпадающих с региональными эпизодами внутримитного магматизма Алдано-Станового щита, и вкпе с изотопными данными могут свидетельствовать о возможном существовании древнего мантийного источника и его эволюции.

Петрографические и геохронологические исследования выполнены за счет гранта РНФ № 19-17-00019. Геология района изучена в рамках государственного задания по проектам № 0330–2016–0013, 0330–2016–0002.

ЛИТЕРАТУРА

- Билибин Ю.А. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. 432 с.
- Богатиков О.А., Махоткин И.Л., Кононова В.А. Лампроиты и их место в систематике высокомагнезиальных калиевых пород // Известия АН СССР. Сер. геол. 1985. № 12. С. 3–10.
- Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40, № 4. С. 354–369.
- Васюкова Е.А., Пономарчук А.В., Дорошкевич А.Г. Петролого-геохимическая характеристика пород Ыллымахского массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Геология и геофизика. 2020. № 4. С. 489–507.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Загорная Н.Ю., Беляевский Н.А., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. U-Pb возраст федоровской толщи алданского гранулит-гнейсового мегакомплекса (Алданский щит) // Доклады Академии наук. 2003. Т. 393, № 1. С. 91–96.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Глебовицкий В.А., Загорная Н.Ю., Яковлева С.З., Толмачева Е.В., Анисимова И.В., Федосеенко А.М. Первичная природа, возраст и геодинамическая обстановка формирования протолитов метаморфических пород федоровской толщи, Алданский щит // Петрология. 2006. Т. 14, № 1. С. 25–43.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Толмачева Е.В., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Ларин А.М. Раннедокембрийские гранитоидногнейсовые комплексы центральной части Алданского щита // Петрология. 2011. Т. 19, № 4. С. 399–416.

- Ветлужских В.Г.** Золотое оруденение эпохи мезозойской тектоно-магматической активизации Алдано-Становой провинции : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск, 1990. 325 с.
- Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я., Яновский В.М.** Золоторудные месторождения Центрального Алдана // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 6. С. 467–499.
- Владыкин Н.В.** Геохимия и генезис лампроитов Алданского щита // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 1. С. 123–135.
- Дворник Г.П.** Серицит-микроклиновые метасоматиты и золотое оруденение Рябиновского рудного поля (Алданский щит) // Литосфера. 2009. № 2. С. 56–66.
- Дзевановский Ю.К., Ворона И.Д., Лагздина Г.Ю.** Геологическая карта южной части Якутской АССР. Л., 1972.
- Ибрагимова Э.К., Радьков А.В., Молчанов А.В., Шатова Н.В., Шатов В.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Толмачева Е.В., Соловьев О.Л., Терехов А.В., Хорохорина Е.И.** Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования цирконов из дунитов массива Инагли (Алданский щит) и проблема генезиса концентрически-зональных комплексов // Региональная геология и металлогения. 2015. № 62. С. 64–78.
- Казанский В.И.** Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия) // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 3. С. 195–211.
- Кононова В.А., Первов В.А., Богатиков О.А., Мюс-Шумахер У., Келлер Й.** Мезозойский калиевый магматизм Центрального Алдана: геодинамика и генезис // Геотектоника. 1995. № 3. С. 35–46.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Богомолова Л.М., Смелов А.П.** О возрастных границах формирования ранних надвиговых структур Восточной части Олекминской гранит-зеленокаменной области Алданского щита // Доклады РАН. 1995. Т. 342, № 2. С. 209–212.
- Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Казанский В.И., Сальникова Е.Б., Перцев Н.Н., Ковач В.П., Яковлева С.З.** Возрастные границы формирования главных картируемых структурных элементов центральной части Алданского щита // Доклады Академии Наук. 2005. Т. 405, № 8. С. 1155–1158.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Ларин А.М., Великославинский С.Д., Загорная Н.Ю.** Sm-Nd изотопные провинции Алданского щита // Доклады Академии наук. 2006. Т. 410, № 1. С. 91–94.
- Котов А.Б., Сквитина Т.М., Ковач В.П., Великославинский С.Д., Лопатин Д.В., Скляров Е.В., Толмачева Е.В., Бобровская О.В.** Новые данные о возрасте континентальной коры западной части Алданского щита: результаты изотопно-геохимических Sm-Nd исследований кайнозойских песчаных отложений Чарской и Токкинской впадин // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 475, № 3. С. 291–294.
- Кочетков А.Я., Пахомов В.Н., Попов А.Б.** Магматизм и метасоматизм Рябиновского рудоносного щелочного массива (Центральный Алдан). Магматизм медно-молибденовых рудных узлов. Новосибирск : Наука, 1989. С. 79–110.
- Кочетков А.Я.** Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 7. С. 850–864.
- Кравченко А.А., Иванов А.И., Прокопьев И.Р., Зайцев А.И., Бикбаева Е.Е.** Особенности состава и возраст формирования мезозойских интрузий Тыркандинского рудного района Алдано-Станового щита // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 43–52.
- Ларин А.М., Котов А.Б., Великославинский С.Д., Сальникова Е.Б., Ковач В.П.** Раннедокембрийские гранитоиды А-типа Алданского щита и его складчатого обрамления: источники и геодинамические обстановки формирования // Петрология. 2012. Т. 20, № 3. С. 242–265.
- Максимов Е.П.** Мезозойские рудоносные магматогенные системы Алдано-Станового щита : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск, 2003.
- Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М.** Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия) // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 2. С. 3–26.
- Мельников А.И., Смелов А.П., Имаев В.С., Тимофеев В.Ф., Кравченко А.А.** Внутреннее строение Тыркандинской shear зоны (Якутия) // Материалы международной конференции «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности». Нерюнгри : Изд-во Техн. ин-та (ф) СВФУ, 2015. С. 48–55.
- Панина Л.И.** Низкотитанистые лампроиты Алдана (Сибирь): результаты изучения расплавных включений в минералах // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 1. С. 112–122.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И.** Тектоника, геодинамика и металлогения Республики Саха (Якутия). М. : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
- Пономарчук А.В., Прокопьев И.Р., Светлицкая Т.В., Дорошкевич А.Г.** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология щелочных пород массива Инагли (Алданский щит, Южная Якутия) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 1. С. 41–54.
- Пономарчук А.В., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Егитова И.В., Кравченко А.А., Иванов А.И.** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст щелочных пород Верхнеамгинского массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 3. С. 28–39.
- Прокопьев И.Р., Кравченко А.А., Иванов А.И., Борисенко А.С., Пономарчук А.В., Зайцев А.И., Кардаш Е.А., Рожков А.А.** Геохронология и рудоносность Джелтулинского щелочного массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 1. С. 38–51.
- Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Неичин А.А., Яковлева С.З., Морозова Й.М., Богомолова Л.М., Смелов А.П.** О возрасте Тунгурчаканского массива (Олекминская гранит-зеленокаменная область, Алданский щит) // Доклады РАН. 1993. Т. 331, № 3. С. 356–358.
- Травин А.В.** Термохронология субдукционно-коллизийных, коллизийных событий Центральной Азии : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2016.
- Шатов В.В., Молчанов А.В., Шатова Н.В., Сергеев С.А., Белова В.Н., Терехов А.В., Радьков А.В., Соловьев О.Л.** Петрография, геохимия и изотопное датирование (U-Pb и Rb-Sr) щелочных магматических пород Рябинового массива (Южная Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2012. № 51. С. 62–78.
- Шатова Н.В., Скублов С.Г., Мельник А.Е., Шатов В.В., Молчанов А.В., Терехов А.В., Сергеев С.А.** Геохронология щелочных магматических пород и метасоматитов Рябинового массива (Южная Якутия) на основе изотопно-геохимического (U-Pb, REE) исследования циркона // Региональная геология и металлогения. 2017. № 69. С. 33–48.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойско-кайнозойская вулканическая провинция Центрально-Восточной Азии — проекция горячего поля мантии // *Геотектоника*. 1995. № 5. С. 41–67.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплум в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // *Геотектоника*. 2000. № 5. С. 3–29.

Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standards // *Chem. Geol.* 1996. V. 129. P. 307–324.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved Pb-206/U-218 microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards // *Chemical Geology*. 2004. V. 205. P. 115–140.

Bogatikov O.A., Kononova V.A., Pervov V.A., Zhuravlev D.Z. Petrogenesis of Mesozoic Potassic Magmatism of the Central Aldan: a Sr-Nd isotopic and geodynamic model // *Int. Geol. Rev.* 1994. V. 36, № 7. P. 629–644.

Borisenko A.S., Gas'kov I.N., Dashkevich E.G., Okrugin A.M., Ponomarchuk A.V., Travin A.V. Geochronology of magmatic processes and ore-formation in the Central Aldan gold-ore region // *Intern. Symp. Large Igneous Provinces of Asia*. Irkutsk, 2011. P. 38–39.

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izokh A.E., Klemm R., Ponomarchuk A.V., Nikolaeva I.V., Vladyskin N.V. Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield // *J. Asian Earth Sci.* 2018. V. 154. P. 354–368.

Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of discordant $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica // *Geoch. Cosm. Acta*. 1977. V. 41. P. 15–32.

Frost B.R., Avchenko O.V., Chamberlain K.R., Frost C.D. Evidence for extensive Proterozoic remobilization of the Aldan shield and implications for Proterozoic plate tectonic reconstructions of Siberia and Laurentia // *Precambrian research*. 1998. V. 89. P. 1–23.

Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geol. Rev.* 2014. V. 59. P. 123–151.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS, in Sylvester, P. (ed.), *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues*: Mineralogical Association of Canada. 2008. Short Course Series. V. 40. P. 307–311.

Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of worldclass gold deposits in East Asia. *Gondwana Res.* 2014. V. 26, № 3–4. P. 816–833.

Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of Late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan Shield, North Asian Craton // *Ore Geol. Rev.* 2015 V. 68. P. 30–42.

Ludwig K. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley : Berkeley Geochronology Center. 2003. V. 4. P. 1–70.

Mitchell R.H., Smith C.B., Vladyskin N.V. Isotopic composition of strontium and neodymium in potassic rocks of the Little Murun complex, Aldan Shield, Siberia // *Lithos*. 1994. V. 32. P. 243–248.

Müller D., Groves D.I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization, fifth edition. Mineral resource reviews. Springer, 2019. 398 p.

Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan shield of Siberia, USSR: The age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the Mid-Proterozoic // *Precamb. Res.* 1992. V. 54, № 4. P. 195–209.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev, S.A. Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 81. P. 296–308.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Yegitova I.V., Ponomareva J.D., Sergeev S.A., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Sokolov E.P., Kardash E.A., Minakov A.V. U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2019. V. 109. P. 520–534.

Rosen O.M., Serenko V.P., Spetsius Z.V., Manakov A.V., Zinchuk N.N. Yakutian Kimberlite Province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. V. 43. P. 1–24.

Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis // *Chemical Geology*. 2008. V. 249, № 1–2. P. 1–35.

Steiger R.H., Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth Planet. Sci. Letters*. 1977. V. 36. P. 359–361.

Vladyskin N.V., Morikyo T., Miuzaki T. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in the carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic implications. In: Vladyskin, N.V. (Ed.), *Deep-seated Magmatism, Its Sources and Their Relation to Plume Processes*. Glazkovskaya printing House, Irkutsk, 2005. P. 89–107.

Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newslett.* 1995. V. 19. P. 1–23.

Авторы:

Пономарчук Антон Викторович, младший научный сотрудник, лаборатория изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: antponomar@gmail.com

Прокопьев Илья Романович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра геологии рудных месторождений, Геолого-геофизический факультет, Новосибирский государственный университет; научный сотрудник, лаборатория щелочного магматизма и оруденения, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Дорошкевич Анна Геннадьевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией щелочного магматизма и оруденения, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: anna-dor@yandex.ru

Семенова Дина Валерьевна, научный сотрудник, лаборатория изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: sediva@igm.nsc.ru

Кравченко Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры региональной геологии и геоинформатики, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, исполняющий обязанности заведующего лабораторией металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: freshrock@yandex.ru

Иванов Алексей Иванович кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геодинамики и региональной геологии, Институт Геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: Leps_2002@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 6–24. DOI: 10.17223/25421379/17/1

A.V. Ponomarchuk¹, I.R. Prokopyev^{1,2}, A.G. Doroshkevich¹, D.V. Semenova¹, A.A. Kravchenko^{3,4}, A.I. Ivanov³

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

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

³*Diamond and Precious Metal Geology Institute of the SB RAS, Yakutsk, Russia*

⁴*North-Eastern Federal University of M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia*

GEOCHRONOLOGY OF THE MESOZOIC ALKALINE MAGMATISM OF TYRKANDA AND AMGA TECTONIC ZONES (ALDAN SHIELD): NEW U-Pb AND Ar-Ar DATA

The territory of the Aldan-Stanovoi Shield is a large industrial region in which gold mining objects have been associated with the manifestation of late Mesozoic alkaline magmatism. Ore-bearing alkaline magmatism on the Aldan shield occurs in the age range of 160–115 Ma and is represented by a wide range of high-potassium rocks: alkaline syenites and syenite-porphyrries, monzonites, leucitic and nepheline syenites, lamprophyres, biotite pyroxenites and shononites, as well as alkaline and and granitoids. Five superterrains are distinguished in the structure of the Aldan-Stanovoi shield: the West Aldan superterrane, the Central Aldan composite terrane, the East Aldan composite terrane and Uchursky, as well as the Tyndinsky and Chogarsky superterrains. The composite terranes of the Aldan-Stanovoi shield, in turn, are divided by zones of tectonic melange: Amga, Kalarskaya and Tyrkanda.

In this work, we studied petrography, Ar-Ar, and U-Pb geochronology of Mesozoic alkaline magmatism of the Tyrkanda and Amga tectonic zones using the example of the Dzheltulinsky and Verkhneamginsky massifs, respectively. The formation of the Dzheltulinsky massif of the Tyrkanda zone of tectonic melange occurred in the range of 121–111 Ma. The obtained mineralization age of the Dzheltulinsky massif – 121.4 ± 2.3 Ma – coincides with the formation of the early phases – leucocratic syenites and syenite-porphyry.

The range of Mesozoic alkaline magmatism of the Amga zone of tectonic melange of 139–117 Ma is specified. The experimentally obtained age-specific U-Pb zircons from the alkaline rocks of the Verkhneamginsky massif indicate the presence of three age clusters: 1.9–2.1 billion years, 2.4–2.6 billion years, and 2.7–2.9 billion years. Moreover, approximately 70% of the points correspond to the second group of ages. These age intervals coincide with regional episodes of intraplate magmatism of the Aldan-Stanovoi shield, and may indicate the possible evolution of an ancient mantle source.

Keywords: Aldan shield, Ar-Ar dating, dating of alkaline rocks, Mesozoic magmatism, dating of gold deposits.

References

- Bilibin Y.A. *Izbrannyye trudy* [Selected Works]. V. 1. Moscow: AN SSSR publ., 1958. 432 p. In Russian.
- Bogatikov O.A., Mahotkin I.L., Kononova V.A. *Lamproity i ikh mesto v sistematike vysokomagnez'nykh kaliyevykh porod* [Lamproites and their place in the systematics of highly magnesian potassium rocks] // *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1985. No 12. pp. 3–10. In Russian.
- Boytsov V.Y., Pilipenko G.N. *Zoloto i uran v mezozoyskikh gidrotermal'nykh mestorozhdeniyakh Tsentral'nogo Aldana (Rossiya)* [Gold and uranium in the Mesozoic hydrothermal deposits of Central Aldan (Russia)] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy.* 1998. V. 40. No 4. pp. 354–369. In Russian.
- Vasyukova E.A., Ponomarchuk A.V., Doroshkevich A.G. Petrological and geochemical characteristics of the rocks of the Yllymakh massif (Aldan shield, South Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics.* 2020. No 4. pp. 489–507.
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Glebovitsky V.A., Kovach V.P., Zagornaya N.Yu., Belyaevsky N.A., Yakovleva S.Z., Fedoseenko A. M. U-Pb age of the Fedorov sequence of the Aldan granulite-gneiss megacomplex (Aldan shield) // *Doklady Earth Sciences.* 2003. V. 393. No 8. pp. 1151–1155.
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Glebovitsky V.A., Zagornaya N.Yu., Yakovleva S.Z., Tolmacheva E.V., Anisimova I.V., Fedoseenko A.M. Protoliths of the metamorphic rocks of Fedorov complex, Aldan shield: character, age, and geodynamic environments of origin // *Petrology.* 2006. V. 14. No 1. pp. 21–38.
- Velikoslavinskii S.D., Kotov A.B., Tolmacheva E.V., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Larin A.M. Early Precambrian granite-gneiss complexes in the Central Aldan Shield // *Petrology.* 2011. V. 19. No 4. 382–398.
- Vetluzhskikh V.G. *Zolotoye orudneniye epokhi mezozoyskoy tektono-magmaticheskoy aktivizatsii Aldano-Stanovoy provintsii* [Gold ores of Mesozoic tectono-magmatic activation of Aldan-Stanovoy region]. PhD thesis. Yakutsk, 1990, 325p. In Russian.
- Vetluzhskikh V.G., Kazanskii V.I., Kochetkov A.Y., Yanovskii V.M. Central Aldan gold deposits // *Geol. Ore Deposits.* 2002. V. 44. No 6. pp. 405–434.
- Vladykin N.V. Geochemistry and genesis of lamproites of the Aldan shield // *Russian Geology and Geophysics.* 1997. V. 38. No 1. pp. 123–135.
- Dvornik, G.P. *Seritsit-mikroklinovyye metasomatity i zolotoye orudneniye Ryabinovskogo rudnogo polya (Aldanskiy shchit)* [Sericite-microcline metasomatites and gold mineralization of the Ryabinovsky ore field (Aldan Shield)] // *Litosfera.* 2009. No 2. pp. 56–66. In Russian.

- Dzevanovskiy Y.K., Vorona I.D., Lagzdina G.Y. *Geologicheskaya karta yuzhnoy chasti Yakutskoy ASSR* [Geological map of South part of Yakutskaya ASSR]. Leningradskaya kartfabrika, 1972. In Russian.
- Ibragimova E.K., Radkov A.V., Molchanov A.V., Shatova N.V., Shatov V.V., Lepekhina Y.N., Antonov A.V., Tolmacheva Y.V., Solov'yev O.L., Terekhov A.V., Khorokhorina Y.I. *Rezultaty U-Pb (SHRIMP II) datirovaniya tsirkonov iz dunitov massiva Inagli (Aldanskiy shchit) i problema genezisa kontsentrisheski-zonal'nykh kompleksov* [Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of zircons from dunites of the Inagli massif (Aldan shield) and the problem of the genesis of concentric-zonal complexes] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2015. No 62. pp. 64–78. In Russian.
- Kazansky V.I. The unique Central Aldan gold-uranium ore district (Russia) // *Geol. Ore Deposits*. 2004. V. 46. No 3. pp. 167–181.
- Kononova V.A., Pervov V.A., Bogatkov O.A., Myus-Shumakher U., Keller Y. *Mezozoyevskiy kaliyevyy magmatizm Tsentral'nogo Aldana: geodinamika i genezis* [Mesozoic potassium magmatism of Central Aldan: geodynamics and genesis] // *Geotektonika*. 1995. No 3. pp. 35–46. In Russian.
- Kotov A.B., Salnikova E.B., Bogomolova L.M., Smelov A.P. On the age limits of early thrust structures in the Olekma greenstone terrain, Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 1995. V. 342. No 2. pp. 209–212.
- Kotov A.B., Glebovitsky V.A., Kazansky V.I., Sal'nikova E.B., Pertsev N.N., Kovach V.P., Yakovleva S.Z. Age boundaries of the formation of major structures in the Central Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 405. No 8. pp. 1155–1158.
- Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Glebovitsky V.A., Kovach V.P., Larin A.M., Velikoslavinsky S.D., Zagornaya N.Y. Sm-Nd isotopic provinces of the Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 410. No 7. pp. 1066–1069.
- Kotov A.B., Skovitina T.M., Kovach V.P., Velikoslavinsky S.D., Lopatin D.V., Sklyarov E.V., Tolmacheva E.V., Bobrovskaya O.V. New data on continental crust age in the Western part of Aldan shield: results of Sm-Nd Isotopic study of cenozoic sand deposits in the Charskaya and Tokkinskaya basins // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475. No 3. pp. 291–294.
- Kochetkov A.Y., Pakhomov V.N., Popov A.B. *Magmatizm i metasomatizm Ryabinovskogo rudonosnogo shchelochnogo massiva (Tsentral'nyy Aldan). Magmatizm medno-molibdenovykh rudnykh uzlov*. [Magmatism and metasomatism of the Ryabinovsky ore-bearing alkaline massif (Central Aldan). Magmatism of copper-molybdenum ore nodes]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoye otdeleniye, 1989. pp. 79–110. In Russian.
- Kochetkov A.Y. Mesozoic gold-bearing ore-magmatic systems of Central Aldan // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. No 7. pp. 850–867.
- Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Prokopyev I.R., Zaitsev A.I., Bikbaeva E.E. *Osobennosti sostava i vozrast formirovaniya mezozoyevskikh intruziy Tyrkandinskogo rudnogo rayona Aldano-Stanovogo shchita* [Features of composition and age of formation of Mesozoic intrusions of the Tyrkandinsky ore district of the Aldan-Stanovoi shield] // *Otechestvennaya Geol.* 2014. No 5. pp. 43–52. In Russian.
- Larin A.M., Kotov A.B., Velikoslavinsky S.D., Salnikova E.B., Kovach V.P. Early Precambrian A-type granitoids of the Aldan shield and its folded frame: sources and geodynamic conditions of formation // *Petrology*. 2012. V. 20. No 3. pp. 242–265.
- Maximov E.P. *Mezozoyevskie rudonosnye magmatogennyye sistemy Aldano-Stanovogo shchita* [Mesozoic ore-bearing igneous systems of the Aldan-Stanovoy shield]. PhD thesis. Yakutsk, 2003. 385p. In Russian.
- Maximov E.P., Uytov V.I., Nikitin V.M. The Central Aldan Gold-uranium ore magmatogenic system, Aldan-Stanovoy Shield. Russia // *Russ. J. Pac. Geol.* 2010. V. 4. No 2. pp. 95–115.
- Melnikov A.I., Smelov A.P., Imaev V.S., Timofeev V.F., Kravchenko A.A. *Vnutrenneye stroeniye Tyrkandinskoy shear zony (Yakutiya)* [Internal structure of the Tyrkandinsky shear zone (Yakutia)] // *Materials of the Intern. conf. "Geological and geophysical environment and various manifestations of seismicity."* Neryungri: publishing house of Tech. institute, 2015. pp. 48–55. In Russian.
- Panina L.I. Low-titanium lamproites of Aldan (Siberia): results of a melt inclusions study // *Russian Geology and Geophysics*. 1997. V. 38. No 1. pp. 112–122.
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tektonika, geodinamika i metallogeniya Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Moscow. Nauka / Interperiodika, 2001. 571p. In Russian.
- Ponomarchuk A.V., Prokopyev I.R., Svetlitskaya T.V., Doroshkevich A.G. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of alkaline rock of Inagli massif (Aldan shield, South Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2019. V. 60. No 1. pp. 41–54.
- Ponomarchuk A.V., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Yegitova I.V., Kravchenko A.A., Ivanov A.I. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of alkaline rocks of the Upper Amga massif (Aldan shield, South Yakutia) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. V. 330. No 3. pp. 28–39.
- Prokopyev I.R., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Borisenko A.S., Ponomarchuk A.V., Zaitsev A.I., Kardash E.A., Rozhkov A.A. Geochronology and ore mineralization of the Dzhetula alkaline massif (Aldan Shield, South Yakutia) // *Russ. J. Pac. Geol.* 2018. V. 12. No 1. pp. 34–45.
- Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Neichin A.A., Yakovleva S.Z., Morozova J.M., Bogomolova L.M., Smelov A.P. *O vozraste Tungurchakanskogo massiva (Olekminskaya granit-zelenokamennaya oblast', Aldanskiy shchit)* [About the age of the Tungurchakan massif (Olekminskaya granite-greenstone region, Aldan shield)] // *Dokl. RAN*. 1993. V. 331. No 3. pp. 356–358. In Russian.
- Travin A.V. *Termhronologiya subduksionno-kollizionnykh, kollizionnykh sobitii Centralnoi Azii* [Thermochronology of subduction-collision, collision events of Central Asia]. Diss. Abstract. Novosibirsk, 2016. In Russian.
- Shatov V.V., Molchanov A.V., Shatova N.V., Sergeev S.A., Belova V.N., Terekhov A.V., Radkov A.V. *Petrografiya, geokhimiya i izotopnoye datirovaniye (U-Pb i Rb-Sr) shchelochnykh magmaticheskikh porod Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya)* [Petrography, geochemistry and isotopic dating (U-Pb and Rb-Sr) alkaline magmatic rocks of Ryabinoviy massif (South Yakutia)] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2012. No 51. pp. 62–78. In Russian.
- Shatova N.V., Skublov S.G., Mel'nik A.Ye., Shatov V.V., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Sergeyev S.A. *Geokhronologiya shchelochnykh magmaticheskikh porod i metasomatitov Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya) na osnove izotopno-geokhimitskogo (U-Pb, REE) issledovaniya tsirokna* [Geochronology of alkaline igneous rocks and metasomatites of the Mountain ash massif (South Yakutia) based on isotope-geochemical (U-Pb, REE) studies of zircon] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2017. No 69. pp. 33–48. In Russian.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Ivanov V.G. *Vnutriplitnaya pozdnemezozoyevskaya-volkanicheskaya provintsiya Tsentral'no-Vostochnoy Azii – proyektziya goryachego polya manti* [Intraplate Late Mesozoic-Cenozoic volcanic province of Central-East Asia – projection of a hot mantle field] // *Geotektonika*. 1995. No 5. pp. 41–67. In Russian.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuz'min M.I. *Severo-Aziatskiy superplyum v fanerozoeye: magmatizm i glubinnaya geodinamika* [North-Asian superplume in Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics] // *Geotektonika*. 2000. No 5. pp. 3–29. In Russian.
- Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standards // *Chem. Geol.* 1996. V. 129. pp. 307–324.

- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved Pb-206/U-218 microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards // *Chemical Geology*. 2004. V. 205. pp. 115–140.
- Bogatikov O.A., Kononova V.A., Pervov V.A., Zhuravlev D.Z. Petrogenesis of Mesozoic Potassic Magmatism of the Central Aldan: a Sr-Nd isotopic and geodynamic model // *Int. Geol. Rev.* 1994. V. 36. No 7. pp. 629–644.
- Borisenko A. S., Gas'kov I. N., Dashkevich E. G., Okrugin A.M., Ponomarchuk A.V., Travin A.V. Geochronology of magmatic processes and ore-formation in the Central Aldan gold-ore region // *Intern. Symp. Large Igneous Provinces of Asia*. Irkutsk, 2011. pp. 38–39.
- Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izokh A.E., Klemm R., Ponomarchuk A.V., Nikolaeva I.V., Vladykin N.V. Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield // *J. Asian Earth Sci.* 2018. V. 154. pp. 354–368.
- Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of discordant $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica // *Geoch. Cosm. Acta*. 1977. V. 41. pp. 15–32.
- Frost B.R., Avchenko O.V., Chamberlain K.R., Frost C.D. Evidence for extensive Proterozoic remobilization of the Aldan shield and implications for Proterozoic plate tectonic reconstructions of Siberia and Laurentia // *Precambrian research*. 1998. V. 89. pp. 1–23.
- Goryachev N.A., Pirajno F., Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geol. Rev.* 2014. V. 59. pp. 123–151.
- Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS, in Sylvester, P. (ed.), *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues*: Mineralogical Association of Canada. 2008. Short Course Series. V. 40. pp. 307–311.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of worldclass gold deposits in East Asia. *Gondwana Res.* 2014. V. 26. No 3–4. pp. 816–833.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of Late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan Shield, North Asian Craton // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 68. pp. 30–42.
- Ludwig K. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. V. 4, Berkeley Geochronology Center. Berkeley, 2003. pp. 1–70.
- Mitchell R.H., Smith C.B., Vladykin N.V. Isotopic composition of strontium and neodymium in potassic rocks of the Little Murun complex, Aldan Shield, Siberia // *Lithos*. 1994. V. 32. pp. 243–248.
- Müller D., Groves D.I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization, fifth edition. Mineral resource reviews. Springer, 2019. 398 p.
- Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan shield of Siberia, USSR: The age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the Mid-Proterozoic // *Precamb. Res.* 1992. V. 54. No 4. pp. 195–209.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev, S.A. Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 81. pp. 296–308.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Yegitova I.V., Ponomareva J.D., Sergeev S.A., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Sokolov E.P., Kardash E.A., Minakov A.V. U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia) // *Ore Geology Reviews* V. 109. 2019. pp. 520–534.
- Rosen O.M., Serenko V.P., Spetsius Z.V., Manakov A.V., Zinchuk N.N. Yakutian Kimberlite Province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. V. 43. pp. 1–24.
- Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hancher J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon - a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis // *Chemical Geology*. 2008. V. 249. No 1–2. pp. 1–35.
- Steiger R.H., Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry // *Earth Planet. Sci. Letters*. 1977. V. 36. pp. 359–361.
- Vladykin N.V., Morikyo T., Miuazaki T. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in the carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic implications. In: Vladykin, N.V. (Ed.), *Deep-seated Magmatism, Its Sources and Their Relation to Plume Processes*. Glazkovskaya printing House, Irkutsk, 2005. pp. 89–107.
- Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses // *Geostandards Newslett.* 1995. V. 19. pp. 1–23.

Author's:

Ponomarchuk Anton V., Junior Researcher, Laboratory of isotope-analytical geochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: antponomar@gmail.com

Prokopyev Ilya R., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Geology of Ore Deposits, Geology and Geophysics department, Novosibirsk State University, Researcher, Laboratory of alkaline magmatism and ore-forming processes, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Doroshkevich Anna G., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of alkaline magmatism and ore-forming processes, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: anna-dor@yandex.ru

Semenova Dina V., graduate student, Researcher, Laboratory of isotope-analytical geochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: sediva@igm.nsc.ru

Kravchenko Alexander A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Regional Geology and Geoinformatics, North-Eastern Federal University of M.K. Ammosov, Senior Researcher, Acting Head of the Metallogeny, Laboratory of the Diamond and Precious Metal Geology, Institute of the SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: freshrock@yandex.ru

Ivanov Alexey I., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Research Associate, Laboratory of geodynamics and regional geology, Diamond and Precious Metal Geology, Institute of the SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: Leps_2002@mail.ru

УДК 550.41

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДООБРАЗУЮЩЕГО ФЛЮИДА МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ)

Н.Н. Брюханова, В.А. Бычинский, А.Е. Будяк, К.В. Чудненко

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия



Методами физико-химического моделирования рассмотрены постмагматически-гидротермальная и метаморфогенно-гидротермальная гипотезы образования золоторудных месторождений сухоложского типа. В результате расчетов установлено, что содержание Au в модельном рудоносном флюиде, сопоставимое с составом включений, достигалось при –237 бар и 350 °С, а оруденение сформировалось из минерализованных сланцев в объеме рудного тела и окаймляющих его минерализованных сланцев.

Ключевые слова: Сухой Лог, рудообразование, флюид, фаза, золото, физико-химическое моделирование.

Введение

В настоящее время физико-химическое моделирование (ФХМ) широко используется для исследования как глобальных геохимических процессов (образования зональности в коре выветривания [Кашик, Карпов, 1978], явления тепломассопереноса в верхней мантии Земли [Владимиров и др., 2019] и пр.), так и локальных (образование минеральных ассоциаций в условиях метаморфизма [Авченко и др., 2019], построение физико-химической модели для гидротерм озера Кипящего [Малышева, 2017] и др.). Также ФХМ применяется для моделирования процессов формирования месторождений золота [Zhuravkova et al., 2017; Гаськова и др., 2018], молибдено-вольфрамовых руд [Боровиков и др., 2020], ртути [Оболенский и др., 2006] и пр.

В данном исследовании с помощью ФХМ рассчитан вероятный состав рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Ленский золоторудный район Байкало-Патомского нагорья) и определен источник золота. Основными гипотезами происхождения месторождений сухоложского типа являются постмагматически-гидротермальная и метаморфогенно-гидротермальная. Согласно первой, привнос золота связан со становлением постметаморфических интрузий, в качестве которых выступают гранитоиды (Константиновский штук), и гипотетические базитовые комплексы (Угаханский плутон), залегающие на глубине [Рунквист и др., 1992; Дистлер и др., 1995; Laverov et al., 2001]. Вторая гипотеза основана на предположении, что рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме металлоносных углеродистых толщ, а интрузии имели второстепенное значение, влияя только на температурный режим [Немеров и др., 2005; Tarasova et al., 2020].

Сценарий, на основе которого проводилось моделирование, включает три этапа. Этап I – конседиментационный (седиментация и диагенез, 610–580 млн лет), во время которого происходит накопление и диагенетическое преобразование осадков с высоким содержанием сидеро-халькофильных элементов [Будяк и др., 2016]. На этом этапе золото связано с рассеянной пиритовой минерализацией, частично с глинистыми минералами и органическим веществом. Этап II – раннеколлизионный (катагенез, 570–540 млн лет), связан с прохождением катагенного преобразования осадков, которому способствовало формирование пологих складчатых структур, возникших в результате тектонического напряжения из-за аккреции Байкало-Муйского композитного террейна и более молодых островодужных систем. Миграция катагенного флюида в сводовые части пологих антиклиналей, обеспечила аномальный фон золота и формирование сульфидной минерализации. На III коллизионном этапе метаморфизма (450–420 млн лет) формируются рудные тела. На первой стадии в Т-, Р-условиях, соответствующих зелено-сланцевой фации метаморфизма: 300–390 °С, 5–6 кбар [Петров, Макрыгина, 1975], органическое вещество, сосредоточенное в апикальных частях антиклиналей, карбонизируется до состояния неструктурированного графита. Распад металлоносных флюидов сопровождается образованием воды, углекислоты, метана, сероводорода и азота. Золото и сопутствующие элементы частично переходят в метаморфогенные растворы, а оставшаяся часть восстанавливается до свободного металла и образует рассеянную минерализацию в самородной форме и в виде интерметаллических соединений [Дистлер и др., 1995]. Формируется высокотемпературная минеральная ассоциация «кальцит, кварц, пирит, пирротин, арсенопирит». Следующая стадия характеризу-

ется более низкими температурами (270–320 °С) и давлениями (0,5 кбар), что обусловлено метаморфическими преобразованиями и появлением зон трещиноватости вдоль осей складок в обезвоженных толщах. Как следствие, флюид, поступающий в зоны разуплотнения, формирует прожилково-вкрап-ленную минеральную ассоциацию, где высокотемпературный пирротин переходит в пирит и образуется полиметаллическая минеральная ассоциация с золотом. Рудоотложение становится более низкотемпературным, формируется сидерит – анкерит – кварцевой минеральная ассоциация с низким содержанием дисперсного золота.

Цель данной работы – методом физико-химического моделирования подтвердить или опровергнуть предположение о возможности образования рудообразующего флюида из вмещающих пород.

Экспериментальная часть

В расчетах использовался состав вмещающих пород: метапелитов хомолхинской свиты Байкало-Патомского нагорья, минерализованных сланцев надрудной зоны [Немеров и др., 2010; Tarasova et al., 2020]; за состав руды принят стандартный образец СЛг-1 (табл. 1) [Yudovskaya et al., 2016].

Таблица 1

Химический состав пород месторождения Сухой Лог

Table 1

The chemical composition of the Suhoi Log deposit

	Вмещающие породы ¹	Минерализованные сланцы ²	Руда ³
	Вес. %		
SiO ₂	59,95	58,8	57,6
TiO ₂	0,98	1,09	0,88
Al ₂ O ₃	17,64	18,07	15,53
Fe ₂ O ₃	6,7	2,55	7,47
MnO	0,08	0,08	0,11
MgO	2,98	2,85	3,06
CaO	0,53	0,69	1,06
Na ₂ O	1,67	1,72	1,28
K ₂ O	3,1	3,24	2,85
п.п.п. ⁵	н.д. ⁴	6,14	9,5
P ₂ O ₅	0,2	0,19	0,12
S	0,15	0,53	1,02
C _{org}	2,77	3,49	0,93
n проб	40	23	н.д.
Σ	96,75	94,95	100
	г/т		
Au	0,002	0,13	2,5
Ag	0,20	0,2	0,47
Mo	3,00	0,1	0,95
Ni	45,00	54,2	50
Zn	150	135	97
Pb	20	25	14,9
Cu	50	44,2	39
As	50	47,9	46

Примечание. 1 – углеродистые сланцы хомолхинской свиты Байкало-Патомского нагорья [Немеров, 1988], 2 – минерализованные сланцы из надрудной зоны [Немеров и др., 2005], 3 – СЛг-1: черные сланцы в контуре промышленного золоторудного тела [SLg-1, 2020]; 4 – н.д. – нет данных; 5 – п.п.п. – потери при прокаливании.

Note. 1 – carbonaceous shales of the Khomolkhin Formation of the Baikal-Patom Upland [Nemerov, 1988]; 2 – mineralized shales from the supra-ore zone [Nemerov et al., 2005]; 3 – SLg-1: black shales in the contour of an industrial gold-ore body [SLg-1, 2020]; 4 – н.д. – no data; 5 – п.п.п. – loss on ignition.

Поскольку более 80 % золота связано с сульфидами и приурочено к мелким кварц-сульфидным прожилкам, в качестве состава рудообразующего флюида использовался состав газовой-жидких включений из минералов сульфидно-кварцевых прожилков [Yudovskaya et al., 2016]. Термодинамические свойства фаз взяты из [Reid et al., 1977; Yokokawa, 1988; Helgeson et al., 1978].

Модель включала 25 независимых компонентов: Ag, Al, As, Au, C, Cl, Cu, Ca, F, Fe, H, K, Mg, Mo, N, Na, Ni, O, P, Pb, S, Si, Ti, Zn, $\bar{e}$, 167 минеральных фаз, 27 газов и 504 компонента водного раствора. Расчеты выполнены с помощью ПК «Селектор» [Чудненко, 2010].

Химический состав пород месторождения Сухой Лог приведен в табл. 1.

Обсуждение результатов

На первом этапе моделировалось образование рудоносного флюида в результате взаимодействия гидротермального ($H_2O + CO_2 + CH_4$) содержащего раствора с рудой (СЛг-1) в условиях гомогенизации водно-солевых растворов [Yudovskaya et al., 2016]. Расчеты проводились при Р-, Т-условиях, характерных для прогрессивного метаморфизма – 385 °С, 2 430 бар; регрессивного метаморфизма – 350 °С, 237 бар; стадии максимального рудоотложения – 210 °С, 237 бар и пострудной стадии – 210 °С, 190 бар при соотношениях флюид/порода (фл/п) = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 10. Максимальное перераспределение содержаний рудных компонентов между флюидом и породой происходили при отношении фл/п (1 кг/5 кг) = 0,2. Новообразованная газовая фаза представлена H_2O , CO_2 , N_2 , H_2S , H_2 , HF , CH_4 . Рассчитанный состав рудоносного флюида сопоставим с составом газожидких включений кварцевых прожилков рудной зоны (табл. 2).

В результате определены оптимальное соотношение фл/п 0,2 и Р-, Т-условия процесса формирования рудообразующего флюида 350 °С, 237 бар.

На втором этапе моделировался процесс взаимодействия флюида ($H_2O + CO_2 + CH_4$) с вмещающими породами при 350 °С и 237 бар, соотношение флюид / порода изменялось от 100 до 5 гр/100 гр породы. Установлено, что образование Au-содержащей твер-

дой фазы и равновесного с ней флюида не происходит. Минеральный состав представлен Chl, Mag, Mnt, Pl, Ap, Mgs, sluda, Apy, Qz, Ccp, Gn, Py, Rt, Fl (рис. 1). pH флюида изменяется 5,6–5,9. Основная форма нахождения золота в растворе – $Au(HS)_2^-$, $AuHS^0$.

На третьем этапе моделировался процесс формирования рудообразующего раствора. Со сланцами надрудной зоны (см. табл. 1) взаимодействует флюид содержащий CO_2 , CH_4 . Приняты Р-, Т-условия, соответствующие формированию рудного флюида, – 237 бар и 350 °С. В реальных условиях такой процесс возможен, когда раствор, взаимодействующий с породами (см. табл. 1), находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию. Расчеты проводились при соотношениях фл/п от 0,0781 (7,81 г/100 г) до 1 (100 г/100 г). Установлено, что соотношение фл/п 0,08 является наиболее вероятным для формирования флюида, близким по составу к составу газожидких включений в прожилках кварца [Yudovskaya et al., 2016] (табл. 3).

С уменьшением соотношения флюид / порода содержание золота во флюиде снижается, количество кварца, пирротина и пирита возрастает (рис. 2). Высокие содержания золота на месторождениях привязаны к кварцевым прожилкам с высоким содержанием, сульфидов, поскольку химический механизм осаждения золота связан с переходом серы из флюида в новообразованные твердые фазы – пирит, пирротин, аргентит и газовую фазу H_2S .

Таблица 2

Содержание химических элементов в рудообразующем флюиде, моль/кг H_2O

Table 2

Content of chemical elements in the ore-forming fluid, mol/kg H_2O

Элемент	СЛг-1 (рассчитанные) фл/п 0,2				[Yudovskaya et al., 2016]
	1-я стадия 385 °С, 2430 бар	2-я стадия 350 °С, 237 бар	3-я стадия 210 °С, 237 бар	4-я стадия 210 °С, 190 бар	
K	0,8	0,26	0,21	0,18	$1,59 \cdot 10^{-2}$
Mg	0,39	$7,83 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$3,27 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-6}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
As	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-5}$	$6,19 \cdot 10^{-5}$	$4,71 \cdot 10^{-5}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$7,93 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$2,93 \cdot 10^{-8}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$3,88 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-7}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$4,82 \cdot 10^{-3}$	$4,84 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
pH	4,84	5,57	5,96	6,08	
Eh, B	–0,15	–0,27	–0,24	–0,26	
Состав твердой фазы	Chl, Ap, Mgs, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp	Ap, Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp	Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, F-Ap, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Sd, Arg, Py, Sp	Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, F-Ap, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Py, Sp	

Примечание. Mgs – магнезит, Mnt – монтмориллонит, Dol – доломит, Ccp – халькопирит, Fl – флюорит, Hem – гематит, Qz – кварц, Au – самородное золото, Ilm – ильменит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Ap – апатит, Mag – магматит, Chl – хлорит, Pl – плагиоклаз, Gn – галенит, Apy – арсенопирит, Ms – мусковит, Pg – парагонит, Sd – сидерит, F-Ap – фторапатит, Arg – аргентит [Whitney, Evans, 2010].

Note. Mgs – magnesite, Mnt – montmorillonite, Dol – dolomite, Ccp – chalcopyrite, Fl – fluorite, Hem – hematite, Qz – quartz, Au – native gold, Ilm – ilmenite, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Ap – apatite, Mag – magmatite, Chl – chlorite, Pl – plagioclase, Gn – galena, Apy – arsenopyrite, Ms – muscovite, Pg – paragonite, Sd – siderite, F-Ap – fluorapatite, Arg – argentite [Whitney, Evans, 2010].

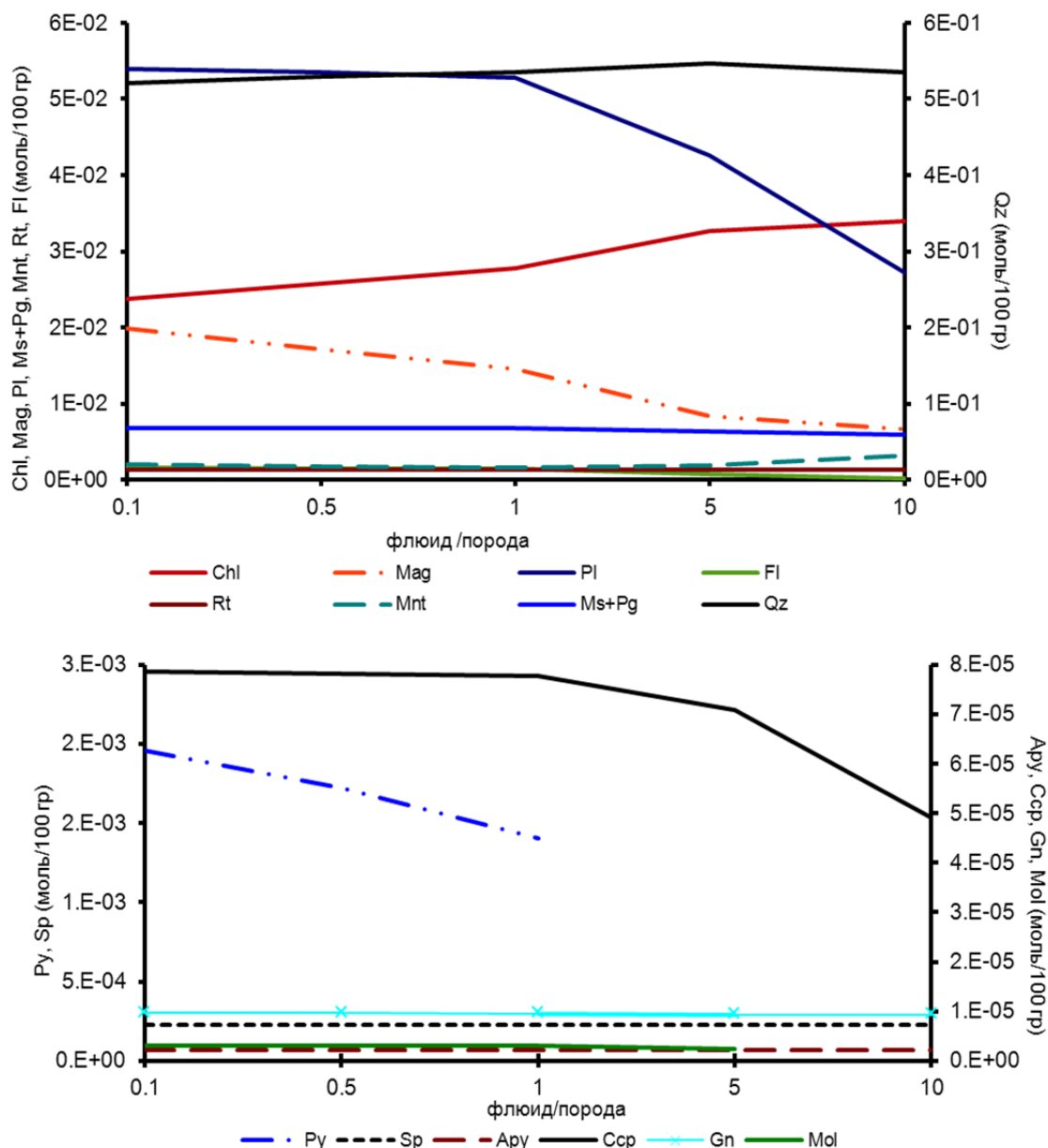


Рис. 1. Минеральный состав твердой фазы (моль/100 г породы), образующейся при взаимодействии флюида с вмещающими породами

Chl – хлорит, Mag – магнетит, Pl – плагиоклаз, Fl – флюорит, Rt – рутил, Mnt – монтмориллонит, Ms – мусковит, Pg – парогонит, Qz – кварц, Py – пирит, Sp – сфалерит, Apy – арсенопирит, Csp – халькопирит, Gn – галенит, Mol – молибденит [Whitney, Evans, 2010]

Fig. 1. Mineral composition of the solid phase (mol/100 g of rock) formed as a result of fluid interaction with the host rocks

Chl – chlorite, Mag – magnetite, Pl – plagioclase, Fl – fluorite, Rt – rutile, Mnt – montmorillonite, Ms – muscovite, Pg – paragonite, Qz – quartz, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Apy – arsenopyrite, Csp – chalcopyrite, Gn – galena, Mol – molybdenite [Whitney, Evans, 2010]

Таблица 3

Изменение состава флюида в зависимости от соотношения флюид / порода, моль/кг H₂O

Table 3

Change in the fluid composition depending on the fluid / rock ratio, mol/kg H₂O

Элемент	Флюид – порода					[Yudovskaya et al., 2016]
	0,078	0,08	0,1	0,5	1	
Mg	$2,92 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,25 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$9,86 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
K	$3,69 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
As	$2,75 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$	$5,34 \cdot 10^{-11}$	$4,69 \cdot 10^{-11}$	$4,15 \cdot 10^{-11}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$

Элемент	Флюид – порода					[Yudovskaya et al., 2016]
	0,078	0,08	0,1	0,5	1	
Ag	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$4,39 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$9,93 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$5,98 \cdot 10^{-7}$	$6,32 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$9,53 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$9,91 \cdot 10^{-9}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$2,82 \cdot 10^{-6}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
Mo	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$4,12 \cdot 10^{-7}$	$6,10 \cdot 10^{-7}$	$5,81 \cdot 10^{-7}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
pH	5,63	5,93	6,41	6,71	6,73	
Eh, B	-0,42	-0,49	-0,55	-0,59	-0,59	

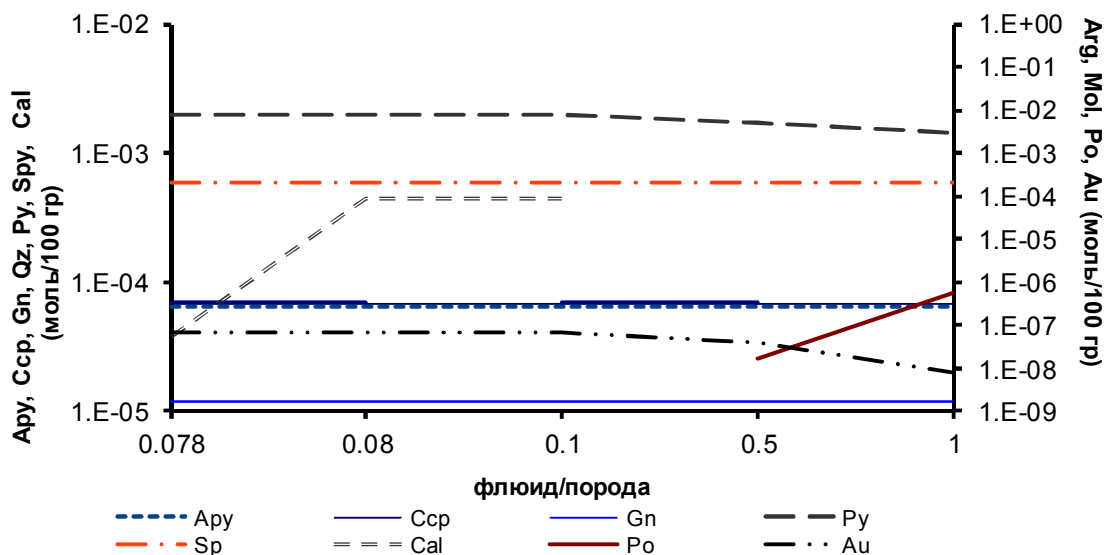


Рис. 2. Минеральный состав твердой фазы (моль/100 г породы) равновесной с флюидом в зависимости от соотношения флюид / порода

Apy – арсенопирит, Ccp – халькопирит, Gn – галенит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Cal – кальцит, Po – пирротин, Au – самородное золото [Whitney, Evans, 2010]

Fig. 2. Mineral composition of the solid phase (mol/100 g of rocks) with the fluid, depending on the fluid / rock ratio

Apy – arsenopyrite, Ccp – chalcopyrite, Gn – galena, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Cal – calcite, Po – pyrrhotite, Au – native gold [Whitney, Evans, 2010]

Таблица 4

Химический состав рудоносных флюидов, моль/кг H₂O

Table 4

Chemical composition of the ore-bearing fluids, mol/kg H₂O

Элемент	Флюид / сланцы (0,08)	Флюид / СЛГ-1 (0,2)	[Юдовская и др., 2015]
Mg	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,31 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
K	$1,45 \cdot 10^{-1}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
As	$4,32 \cdot 10^{-11}$	$3,14 \cdot 10^{-5}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-7}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$1,92 \cdot 10^{-7}$	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$7,24 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$8,58 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
Mo	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$9,97 \cdot 10^{-7}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
pH	5,3	5,4	
Состав твердой фазы	Chl, Mag, Mnt, Pl, sluda, Apy, Ccp, Gn, Ap, Po, Qz, Rt, Au-Ag, Mol, Fl, Py, Sp	Ap, Mgs, Mag, Mnt, sluda, Apy, Ccp, Dol, Hem, Qz, Au-Ag, Ilm, Py, Sp	

Примечание. Chl – хлорит, Mag – магнетит, Mnt – монтмориллонит, Pl – плагиоклаз, Fl – флюорит, Rt – рутил, Ms – мусковит, Pg – парагонит, Qz – кварц, Py – пирит, Sp – сфалерит, Apy – арсенопирит, Ccp – халькопирит, Gn – галенит, Mol – молибденит; Au-Ag – самородное золото / серебро, sluda – слюда, Hem – гематит, Dol – доломит, Ilm – ильменит.

Note. Chl – chlorite, Mag – magnetite, Mnt – montmorillonite, Pl – plagioclase, Fl – fluorite, Rt – rutile, Ms – muscovite, Pg – paragonite, Qz – quartz, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Apy – arsenopyrite, Ccp – chalcopyrite, Gn – galena, Mol – molybdenite; Au-Ag – native gold / silver, sluda – mica, Hem – hematite, Dol – dolomite, Ilm – ilmenite.

Выводы

1. Содержание Au в модельном рудоносном флюиде, сопоставимое с составом включений [Yudovskaya et al., 2016], достигалось при –237 бар и 350 °С. На основе результатов моделирования можно предположить, что для основной стадии рудообразования характерны эти Т-, Р-условия. Оптимальным соотношением флюид / порода для Слг-1 является 0,2, а для минерализованных сланцев – 0,08 (см. табл. 3, 4).

2. Образование флюида, равновесного с твердой фазой Au, сопоставимой по составу с рудным золотом из минерализованных сланцев, позволяет считать, что источником золота являются вмещающие

месторождение черносланцевые породы, без дополнительного эндогенного источника.

3. Рудный процесс происходил при локальном перераспределении вещества. Оруденение сформировалось из минерализованных сланцев в объеме рудного тела и окаймляющих его минерализованных сланцев.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проектам IX.130.3.1 (0350–2016–0032) и IX.130.3.1 (0350–2016–0010). Аналитические исследования проведены в ЦКП изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Авченко О.В., Чудненко К.В., Александров И.А. Физико-химическое моделирование минеральных систем. М. : Юрайт, 2019. 232 с.
- Боровиков А.А., Гущина Л.В., Говердовский В.А., Гимон В.О. Физико-химическая модель формирования руд Мо-W Колгунинского месторождения: термодинамическое моделирование // Геохимия 2020. Т. 65, № 1. С. 31–45. DOI: 10.31857/S0016752520021.
- Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 5. С. 562–565. DOI: 10/7868/S0869565216290181.
- Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Полянский О.П., Травин А.В. Тепломассоперенос в верхней мантии и земной коре: петрологические индикаторы и математическое моделирование // Геодинамика и тектонофизика 2019. Т. 10, № 2. С. 189–196. DOI:10.5800/GT-2019-10-2-0411
- Гаськова О.Л., Редин Ю.О., Неволько П.А., Колпакова М.Н., Наймушина О.С. Физико-химическое моделирование высокотемпературных стадий отложений золота Лугоканского месторождения (Восточное Забайкалье) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 10. С. 57–66.
- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золото-рудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 38, № 6. С. 467–484.
- Кашик С.П., Карпов И.К. Физико-химическая теория образования зональности в коре выветривания. Новосибирск : Наука, 1978. 152 с.
- Малышева К.С. Определение минерального состава твердой фазы в системе «вода-порода» с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор», термальные источники влк. Головинина, о. Кунашир) // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 6–2 (60). С. 116–120. DOI: 10.18454/IRJ. 2227-6017.
- Немеров В.К. Геохимические черты эволюции условий накопления позднедокембрийских толщ Байкало-Патомского нагорья // Доклады Академии наук СССР. 1988. Т. 298, № 6. С. 1446.
- Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матель Н.Л., Будяк А.Е., Станевич А.М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов суходожского типа // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 17–24.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах байкало-патомского региона. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 5. С. 729–747.
- Оболенский А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. Физико-химические модели процессов рудообразования на ртутных месторождениях // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 12. С. 1344–1360.
- Петров Б.В., Макрыгина В.А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск : Наука, 1975. 342 с.
- Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н., Смирнов М.Ю., Данилова М.Ю., Ащеуков А.А. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // Геология рудных месторождений. 1992. Т. 34, № 6. С. 3–15.
- Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложение. Новосибирск : Гео, 2010. 283 с.
- Helgeson H.C., Delany J.M., Nesbitt H.W., Bird D.K. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals // Amer. J. Sci. 1978. V. 278A. P. 1–229.
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, east Siberia: Results of isotope-geochemical study // Doklady Earth Sciences. 2001. V. 415, No 1. P. 810–814.
- Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The properties of gases and liquids. N.Y. : McGraw-Hill Book Company, 1977. 592 p.
- Slg-1 (black shale powder). URL: http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query.asp?lackshale (дата обращения: 29.01.2020).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. V. 119. P. 103365. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103365.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. V. 95. P. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.

Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // J. Nat. Chem. Lab. Indast. 1988. V. 60. P. 27–121.

Yudovskaya, M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Y., Akiniev N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena Province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits, Geoscience Frontiers // Geoscience Frontiers. 2016. V. 7, No 7. P. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.

Zhuravkova T.V., Palanova G.A., Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Makshakov A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) // Ore Geology Reviews. 2017. V. 91. P. 1–20. DOI: 10.1016/j.oregeorev. 2017.10.017

Авторы:

Брюханова Наталья Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: nmb@igc.irk.ru

Бычинский Валерий Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: val@igc.irk.ru

Будяк Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: budyakl@igc.irk.ru

Чудненко Константин Вадимович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: chud@igc.irk.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 25–32. DOI: 10.17223/25421379/17/2

N.N. Bryuhanova, V.A. Bychinskij, A.E. Budyak, K.V. Chudnenko

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

PHYSICAL-CHEMICAL MODELING OF THE ORE-FORMING FLUID OF THE SUKHOI LOG DEPOSIT

The main hypotheses on the origin of Sukhoi Log deposits are referred to as (a) postmagmatic–hydrothermal and metamorphic–hydrothermal. The former states that the inflow of gold is caused by the emplacement of post-metamorphic intrusions being the granitoids of the Konstantinovskiy stock and hypothetic basic rock complexes of the Ugakhan pluton occurring at depth. The latter is based on the supposition that the ore-forming solutions generated at regional metamorphism of metalliferous carbonaceous sequences, and intrusions were of minor importance depending on the temperature regime only.

The physical-chemical modeling (PCM) is currently used for investigating both global geochemical processes, i.e. formation of zonation in the weathering crust, phenomenon of mass transfer in the upper mantle of the Earth, and local ones, i.e. formation of mineral associations under metamorphism conditions, construction of physical-chemical model for the hydrothermae of Kipyaschii Lake. Besides, PCM is applied for constructing models disclosing formation of the deposits of gold, molybdenum–tungsten and barite–pyrite ores. Authors Shapkin (1998), Karpov (2001), Kashik (1978) and Chudnenko (2019) reported the results acquired by these studies. In addition, PCM was employed to check the metamorphic–hydrothermal hypothesis on the Sukhoi Log gold ore deposits. Modeling proceeded through three stages. (1) sedimentation, when sediments with siderite–chalcopyrite elements accumulate; (2) early collision linked with catagenic alteration of sediments and (3) collision, when the ore bodies were derived. The goal of modeling was to verify or to reject the assumption on possible formation of ore-forming fluid from host rocks. In the computations, we used the composition of host rocks, e.g. metapelites of the Khomolkho formation within the Baikal–Patom upland and mineralized shales of supra-ore zone. The reference sample SLG-1 was referred to as the composition of ore. The composition of gaseous–liquid inclusions in the minerals of sulfide–quartz veinlets was taken as the standard for ore-forming fluid. The model involved 25 independent components: Ag, Al, As, Au, C, Cl, Cu, Ca, F, Fe, H, K, Mg, Mo, N, Na, Ni, O, P, Pb, S, Si, Ti and Zn, 1894 mineral phases, 27 gases and 504 components of aqueous solution. The computations performed with the “Selector” program identified, that in the simulated ore-bearing fluid the Au content comparable with the composition of inclusions was reached at 237 bar and 350 °C. This fluid is in equilibrium with the solid phase of Au fitting the ore gold from mineralized shales. Consequently, the host black shale rocks represent the main source for gold. The mineralization originated from the mineralized shales within the ore body and surrounding mineralized shales.

Keywords: *Sukhoi Log, ore-formation, fluid, phase, gold, physical-chemical modeling.*

Reference

Avchenko O.V., Chudnenko K.V., Aleksandrov I.A. *Fiziko-himicheskoe modelirovanie mineral'nyh sistem* [Physico-chemical modeling of mineral systems]. Moscow: Yurajt Publ.; 2019. 232 p. In Russian

Borovikov A.A., Gushchina L.V., Gimon V.O., Goverdovskii V.A. Physicochemical conditions of ore formation at the Kalguty Mo–W deposit: thermodynamic modeling // *Geochemistry International*. 2020. V. 58. No 1. pp. 27–39.

Budyak A.E., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. Geodynamic background for large-scale mineralization in the southern environs of Siberian Craton in the Proterozoic // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 470. No 2. pp. 1063–1066.

Vladimirov A.G., Kruk N.N., Polyansky O.P., Travin A.V. Heat and mass transfer in the upper mantle and the deep crust: petrological indicators and mathematical modeling // *Geodynamics & Tectonophysics*. 201, No. 10(2). pp. 189–196. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0411>. In Russian.

Gaskova O.L., Redin Y.O., Navolko P.A., Kolpakova M.N., Naymushina O.S. Physico-chemical modeling of high-temperature stage of gold at the Lugokanskoe deposit (Eastern Transbaikalia) // *Izv-tiya TPU. Inzhiniring georesursov=Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. V. 329. No 10. pp. 57–66. In Russian

- Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. Forms of the presence of platinum group metals and their genesis in the Sukhoi Log gold ore deposit (Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenij – Geology of ore deposits*. 1995. V. 38. No 6. pp. 467–484. In Russian
- Kashik S.P., Karpov I.K. *Fiziko-himicheskaya teoriya obrazovaniya zonal'nosti v kore vyvetrivaniya* [Physicochemical theory of the formation of zoning in the weathering crust]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 152 p. In Russian
- Malysheva K.S. Determination of mineral composition of solid phase in the water-breed system by means of physico-chemical modeling (PC Selektor, thermal sources of Golovin volcano, Kunashir Island) = *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skij zhurnal International research journal*. 2017. V. 6–2. No. 60. pp. 116–120. DOI:10.18454/IRJ.2227-6017. In Russian
- Nemerov V.K. Geochemical features of the evolution of the conditions of accumulation of the Late Prekembrian strata of the Baikal-Patom highlands // *DAN SSSR = DAN of the USSR*. 1988. V. 298. No 6. pp. 1446–1449. In Russian
- Nemerov V.K., Spiridonov A.M., Razvozhayava E.A., Matel N.L., Budyak A.E., Stanevich A.M. Major factors of ontogenesis of Sukhoi Log – type precious deposits // *Otechestvennaya geologiya*. 2005. V. 3. pp. 17–24. In Russian
- Nemerov V.K., Razvozhayava E.A., Budyak A.E., Stanevich A.M., Kornilova T.A. Biogenic sedimentation factors of mineralization in the neoproterozoic strata of the Baikal-Patom reguon // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. No 5. pp. 572–586. (In Russian)
- Obolensky A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S. Physicochemical models for ore formation processes at mercury deposits // *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. No 12. pp. 1344–1360. In Russian
- Petrov B.V., Makrygina V.A. *Geokhimiya regional'nogo metamorfizma i ul'trametamorfizma* [Geochemistry of regional metamorphism and ultrametamorphism] Novosibirsk. Nauka Publ.; 1975. 342 p. In Russian
- Rundqvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N. Stages of formation of Bodaibisky gold-ore area // *Geologiya rudnykh mestorozhdenij = Geology of Ore Deposits*. 1992. V. 34. No 6. pp. 3–18. In Russian
- Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovaniye v geokhimii: teoriya, algoritmy, programmnnoye obespechenie, prilozhenie* [Thermodynamic modeling in geochemistry: the theory, algorithms, the software, applications]. Novosibirsk. GEO Publ.; 2010. 287 p. In Russian
- Helgeson H.C., Delany J.M., Nesbitt H.W., Bird D.K. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals // *Amer. J. Sci.* 1978. V. 278A. pp. 1–229.
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, east Siberia: Results of isotope-geochemical study // *Doklady Earth Sciences*. 2001. V. 415. No 1. pp. 810–814. In Russian
- Reid R.C., Pausnitz J.M., Sherwood T.K. *The properties of gases and liquides*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1977. 592 p.
- Slg-1 (black shale powder) http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query.asp (accessed 29.01.2020).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // *Ore Geology Reviews*. V. 119, April 2020, 103365 DOI 10.1016/j.oregeorev.2020.103365.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. pp. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.
- Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // *J. Nat. Chem. Lab. Indust.* 1988. V. 60. pp. 27–121.
- Yudovskaya, M.A., Distler, V.V., Prokofiev, V.Y., Akinfeev, N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena Province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // *Geoscience Frontiers*. 2016. V. 7. No 3. pp. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
- Zhuravkova T.V., Palanova G.A., Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Makshakov A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 91. pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.017.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. pp. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.

Author's:

Bryuhanova Natal'ya N., Cand. Sci. (Geol-Miner.), Researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: nnb@igc.irk.ru

Bychinskij Valerij A., Cand. Sci. (Geol-Miner.), Senior Researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: val@igc.irk.ru

Budyak Aleksandr E., Cand. Sci. (Geol-Miner.), Head of Department, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: budyakl@igc.irk.ru

Chudnenko Konstantin V., Dr. Sci. (Geol-Miner.), Head of Department, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: chud@igc.irk.ru

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

УДК 551.435.4(-925.16)

ОСОБЕННОСТИ ДЕПРЕССИИ СНЕГОВОЙ ГРАНИЦЫ САРТАНСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Ф.И. Еникеев

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия



На основе метода Партча и Брюкнера, применяя материалы геологической съемки масштаба 1:200 000 и результаты исследований, полученные научными организациями, на территории Прибайкалья восстановлен характер снеговой границы в максимальную фазу сартанского оледенения.

Ключевые слова: поздний плейстоцен, кары, снеговая линия, экзарация, морена, реконструкция, палеогляциология, Прибайкалье.

Введение

На юге Восточной Сибири помимо протяженных и кулисообразных горных сооружений Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), также простираются изолированные хребты, горные узлы, массивы и возвышающиеся над нагорьями и плоскогорьями монады. На многих из них сохранились следы гляциальной деятельности. Последовательная цепь конечных и краевых образований повсеместно оконтуривает высокие горные сооружения с альпинотипным рельефом. В пределах большинства хребтов отмечаются ледниковые кары высокой степени совершенства с кресловидным днищем и остатками береговых и конечных морен. По мере удаления от центров оледенения и снижения высот ундулирующих водоразделов наблюдаются слабо развитые следы ледниковой экзарации или снежной эрозии в виде несовершенных каров с наклонным днищем, лавиносборных чаш, воронко- и блюдцеобразных расширений в вершинах распадков, контролирующих положение бывшей орографической снеговой границы.

Область исследования включает Прибайкалье, кроме самой юго-западной части (Тункинская депрессия с горным обрамлением), а также западную и северо-западную части Восточного Забайкалья (рис. 1). Целью настоящего исследования являлось определение величины депрессии и характера деформаций нижней границы хионосферы для последующего построения палеогеографической карты, отвечающей максимальной фазе сартанского оледенения данной территории, что в дальнейшем позволит объединить в единое поле палеогеографические реконструкции последнего оледенения Прибайкалья и Восточного Забайкалья [Еникеев, 2006; Еникеев, Старышко, 2009].

Современное состояние вопроса

Особенности ледникового морфогенеза. Для латеральных построений палеогеографической обстановки сартанского оледенения позднего неоплейстоцена (MIS 2) необходимо восстановить нижнюю границу хионосферы в максимальную фазу похолодания. Она является верхним пределом высотных поясов географических зон и четко очерчивает границы области питания ледников. Возникшие разобщенные центры оледенений в зависимости от площади и высоты местности определяют тип оледенения, активность ледников, их размеры, положение в рельефе и способствуют пространственной увязке разновозрастных гляциогенных форм рельефа.

Палеогляциальная обстановка конкретного горного сооружения определяется комплексом натуральных наблюдений, лабораторных анализов, с абсолютной и относительной датировкой ледниковых и приледниковых отложений. Экстраполяция ее на соседние положительные морфоструктуры осуществляется достаточно надежно путем использования выявленных орографических снеговых границ сартанского оледенения. Дополнительным фактором высотной поясности, способствующим выяснению площади оледенения, служит зона современных каменных глетчеров. Нижний предел их распространения совпадает, за редким исключением, с палеоснеговой границей [Еникеев, Старышко, 2009]. Выпадают из этого правила каменные глетчеры, приуроченные не к карам, а располагающиеся в днищах долин у подножий высоких скал. Как правило, в зоне жестких мерзлотных условий обвалившиеся массы со временем приобретают облик «натечных» образований, обусловленных мерзлотным крипом.

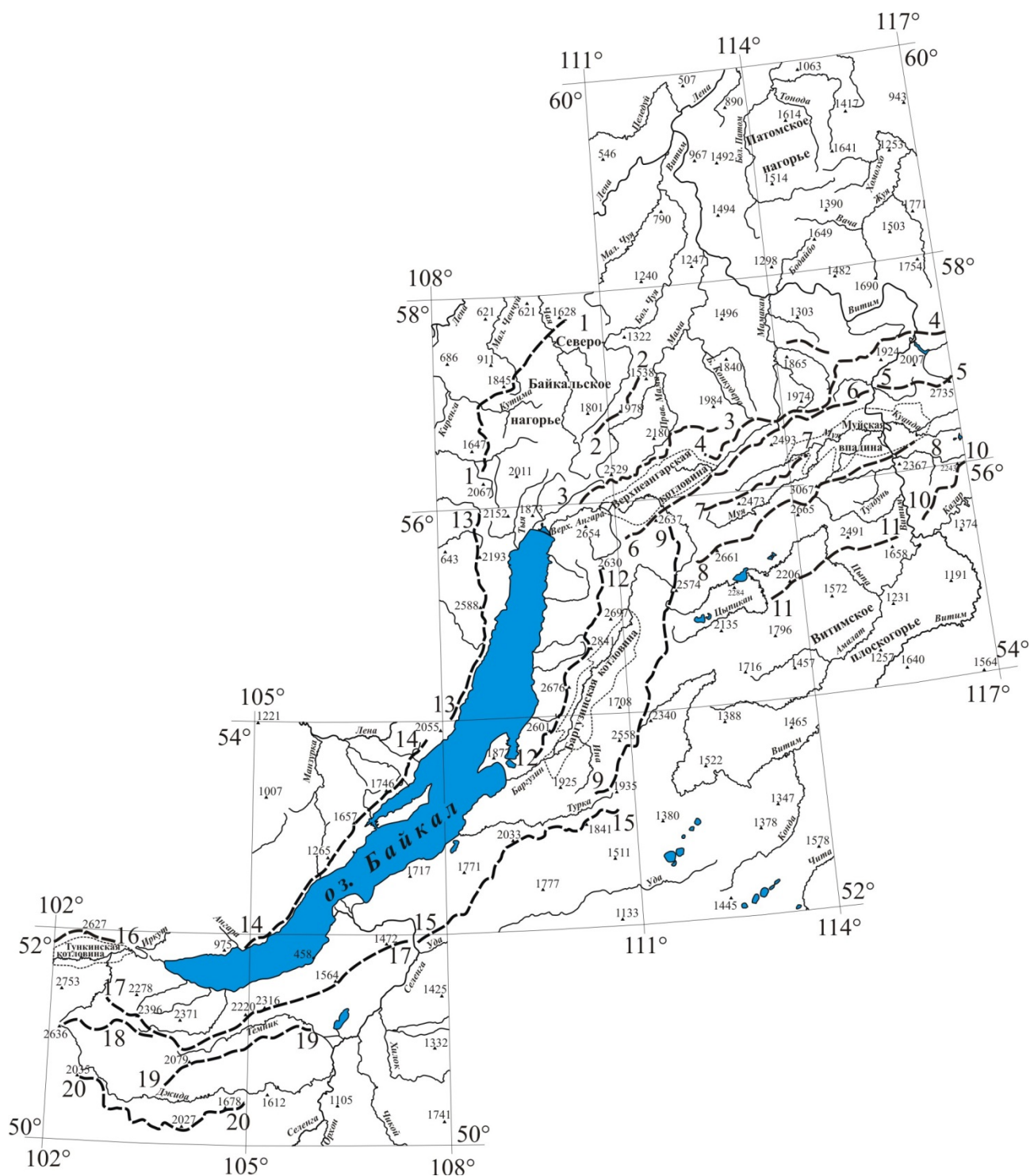


Рис. 1. Орогидрографическая схема Прибайкалья

Хребты: 1 – Аkitкан, 2 – Сынныр, 3 – Верхнеангарский, 4 – Делон-Уранский, 5 – Кодар, 6 – Северо-Муйский, 7 – Муяканский, 8 – Южно-Муйский, 9 – Икатский, 10 – Каларский, 11 – горы Бабанты, 12 – Баргузинский, 13 – Байкальский, 14 – Приморский, 15 – Улан Бургасы, 16 – Тункинские Гольцы, 17 – Хамар-Дабан, 18 – Хангарульский, 19 – Малый Хамар-Дабан, 20 – Джидинский. Цифры: абсолютная отметка высоты местности, м; угловые координаты разграфки топооснов масштаба 1:500 000, градусы

Fig. 1. Orographical and hydrographic scheme of the Baikal region

Ridges: 1 – Akitkan, 2 – Synnyr, 3 – Verkhneangarsky, 4 – Delyun-Uransky, 5 – Kodar, 6 – North Muysky, 7 – Muyakansky, 8 – South Muysky, 9 – Ikatsky, 10 – Kalarsky, 11 – Babanty mountains, 12 – Barguzinsky, 13 – Baikalsky, 14 – Primorsky, 15 – Ulan-Burgasy, 16 – Tunkinskie Gol'tsy, 17 – Khamar-Daban, 18 – Kharangulsky, 19 – Maly Khamar-Daban, 20 – Dzhidinsky. Number: absolute mark of the terrain height, in meters; angular coordinates of the layout of topographic bases of scale 1: 500,000, in degrees

Характерной особенностью каменных глетчеров является своеобразный микрорельеф поверхности. В верхней части наблюдаются параллельные продольные гряды, повторяющие изгибы каменного глетчера, которые ниже сменяются поперечными валами в виде концентрических дуг, обращенных выпуклостью вниз по уклону. По этому «флюидалному» рисунку каменные глетчеры прекрасно дешифрируются на аэро-, фото- и космоснимках (АФС и КС). С поверхности они сложены крупными остроугольным обломками. Вниз по разрезу увеличивается количество дресвы и щебня. В основании залегает обломочный материал, сцементированный льдом, с ледяными горизонтами мощностью 5–10 м или мощное ядро из чистого льда [Еникеев, Старышко, 2014]. Фронтальный уступ каменных глетчеров имеет высоту в несколько десятков метров. В редких случаях она превышает 100 м. Протяженность каменно-глыбовых «натечных» образований не более 1,5–2,0 км (хр. Верхнеангарский, долина руч. Подкаменный, 56°11'15"с.ш. 111°02'10"в.д.).

Формальное использование отметок днищ ледниковых каров и цирков для оценки уровня древней снеговой границы лишено оснований. При анализе особенностей вертикального распространения каров выяснилось, что в рассматриваемых горных сооружениях их положение обусловлено высотой горного массива и не связано со снеговой границей [Еникеев, 2017]. Кроме того, в глубоких карах вследствие «теневого» эффекта кресловидные днища часто располагаются на сотни метров ниже снеговой границы. В то же время кары с наименьшими отметками проявляют тенденцию к снижению в направлениях северных румбов согласно понижению как рельефа, так и орографической снеговой границы былой эпохи. Эта закономерность свидетельствует об их тесной связи с глобальным, региональными и локальными депрессиями нижней границы хионосферы. Она проявляется как от южных широт Прибайкалья и Забайкалья в северном направлении, так и в пределах конкретного горного массива.

В Прибайкалье, как и в Восточном Забайкалье, не существует проблемы ярусности каров. В частности, в пределах центральной части Баргузинского хребта, на междуречье Светлая – Фролиха – Томпуда – Улюгна, вершинная поверхность находится в интервале высот 2 400–2 630 м. Базисная поверхность, построенная по тальвегам долин 3–4 порядков, достигает высоты 1 200–1 400 м над уровнем моря (у. м.). Таким образом, разница в их положении составит в среднем 1 000–1 400 м. Учитывая, что мощность льда в трогах достигала 500–600 м, высота склонов выше поверхности ледника не превысит 400–900 м. При глубине каров 400–500 м разместить в этом интервале высот даже второй ярус каров не представляется возможным. Статистический анализ, прове-

денный в хребтах восточной части БРЗ, показывает, что высотное расположение каров по азимутальным секторам находится в тесной связи с морфоструктурными особенностями горных сооружений и во многом отвечает нормальному закону распределения, поэтому здесь не выделяются каровые ярусы разных оледенений неоплейстоцена [Еникеев, 2017].

Специфичный характер оледенения, близкий по типу горно-покровному, отмечается на реликтовых поверхностях выравнивания, приуроченных к водораздельным частям хр. Хамар-Дабан, северной оконечности Байкальского хребта (междуречье Тья – Кунерма – Окунайка), район схождения хребтов Аkitкан – Верхнеангарский – Сынныр и др. с высотными отметками от 1 500–1 700 до 2 000–2 400 м (рис. 1). Слабая доледниковая расчлененность рельефа обусловила формирование на них ледниковых покровов, «шапок», ледоемов. Выработка и развитие каров осуществлялись по периферии уплощенных поверхностей, также на нунатаках и гребнях, возвышающихся над льдом. В относительно низких горах, высотой менее 1 400–1 200 м, с округлыми водоразделами и пологими склонами ледниковые кары редки. Чаще развиты несовершенные кары с покатым днищем, ниши, воронко- и чашеобразные расширения нивальной природы. Возникновение их обусловлено особенностями климата и влиянием отрицательных экстремумов в динамике нижней границы хионосферы.

Методы и способы восстановления палеоснеговой границы

Одним из основных способов восстановления высоты орографической снеговой границы явилось последовательное приближение к ней сверху с выявлением минимальных высот гор, на вершинах которых только наметились деструктивные следы былых ледников, так называемый метод вершин, или метод Партча и Брюкнера [Щукин, 1960]. Очевидно, что чем меньше размер карово-долинного ледника с выраженными в рельефе экзарационными и аккумулятивными формами, тем точнее определяется положение орографической снеговой границы. В этих случаях отмечается наибольшее совпадение высоты снеговой границы, проконтролированной методами Брюкнера, Куровского и Гефера [Калесник, 1963]. Особенно высокой оказалась сходимости натурных и расчетных данных для простых, небольших, прямолинейных, с неглубоким трогом и сравнительно выдержанной шириной горно-долинных миниледников с однообразным уклоном ложа. Как правило, они были приурочены к относительно пологим, слабо ступенчатым или ровным мегасклонам хребтов. Внутренняя динамика их жизнедеятельности зависела только от глобальных климатических факторов, а

слабая расчлененность макросклона хребта снижала эффект затененности [Еникеев, 2006; Еникеев, Старышко, 2009].

Дополнительно для выявления конфигурации границы области питания ледников используются гляциальные миникары, нивальные блюдце- и воронкообразные расширения в вершинах распадков, приуроченных к периферийным частям хребтов и их отрогов. Они подчеркивают и дополняют плановый рисунок снеговой границы.

К прямым признакам, позволяющим восстановить высоту орографической снеговой границы, относится положение нагорного конца гряды береговой морены на склоне ледниковой долины с наклоном меньше угла естественного откоса. Согласно условиям формирования аккумулятивной гряды, ее проксимальный конец напрямую связан с линией, разделяющей области питания и абляции ледника, и отвечает высотному положению фирно-ледяной границы. На этом уровне меняется морфология поверхности ледника – от вогнутой в области питания к выпуклой в области абляции. В отрогах с крутыми бортами фрагменты береговой морены, сохранившиеся на неровностях склона, используются, как правило, по формуле «не ниже».

Количественные показатели высотного положения снеговой границы в абсолютных отметках устанавливаются по долинам и распадкам, где наблюдаются наиболее сохранившиеся и яркие следы деструктивной деятельности ледников. Опорными являются наиболее низко расположенные, но хорошо выработанные кары. К ним относятся совершенные кары с высокой скальной нагорной стенкой, кресловидным днищем с отчетливым коренным или моренным ригелем, с каровым озером и каменным глетчером. Принадлежность кара к последнему оледенению определяется в основном по трем морфологическим признакам. Это «свежесть» нивальных и экзарационных форм, наличие карового озера и (или) современного каменного глетчера. В условиях максимального склонового транзита продуктов выветривания в крутосклонном, глубоком и крайне ограниченном пространстве сохранность карового, как правило, небольшого озера свидетельствует об его возникновении в недалеком прошлом. Наличие каменного глетчера, который даже в современных условиях при незначительном понижении климатической снеговой границы может преобразоваться в каровый ледник, также свидетельствует о происхождении или модификации кара в период последнего криохрона. Аналогичную динамику криогенно-гляциальных процессов можно наблюдать в районах современного оледенения на хребте Кодар при анализе разновысотных ледниковых цирков [Еникеев, Старышко, 2014].

Таким образом, количественные показатели высотного положения снеговой границы в абсолютных отметках устанавливаются по долинам и распадкам, где наблюдаются наиболее сохранившиеся следы деструктивной и аккумулятивной деятельности ледников. При этом выделение высотного каменно-глетчерового пояса в вертикальной поясности горных систем позволяет определить не только положение снеговой границы, но и принадлежность кара ко времени последнего глобального похолодания в конце неоплейстоцена (морфохронология).

Процесс восстановления нижней границы хиосферы по абсолютным отметкам деструктивных и аккумулятивных следов ледниковой деятельности требует использования топографических карт, АФС и КС крупных и средних масштабов в зависимости от размера объекта гляциальной морфологии и степени его детализации. Палеогеографические построения существенно облегчаются при использовании компьютерных программ Google Earth Pro и SAS.Planet. Release, позволяющих работать в системе 3D с различной разрешающей способностью КС и с любой детальностью горизонтального сечения рельефа.

В связи с большой площадью рассматриваемых территорий окончательная генерализация первичного материала проведена на топооснове масштаба 1:500 000.

Результаты исследования

Принципиальным является определение величины глобальной, региональной и локальной депрессий снеговой границы, обусловленной как климатическими факторами, так и орографией горных сооружений, высотами их водоразделов и фронтальных уступов, а также ориентацией в пространстве и экспозицией склона (рис. 2).

Отмечается глубокая депрессия снеговой границы у южного побережья Байкала. Климатическая снеговая граница на юге Прибайкалья и Забайкалья по traversу Хамар-Дабан – Быстринский Голец – Голец Сохондо (Южное Забайкалье) проходила на высоте 1 900–2 000 м над у. м. [Еникеев, Старышко, 2009; Shi Yafeng, 1991]. Таким образом, величина понижения на этом участке достигала 800–900 м на расстоянии 40–45 км в меридиональном направлении. Это обусловлено комплексом причин:

- а) глобального характера – влияние западного влагопереноса;
- б) регионального, когда высота и ориентация хребтов обеспечивают перехват влажных воздушных масс;
- в) локального, обусловленного северной экспозицией мегасклона хр. Хамар-Дабан.

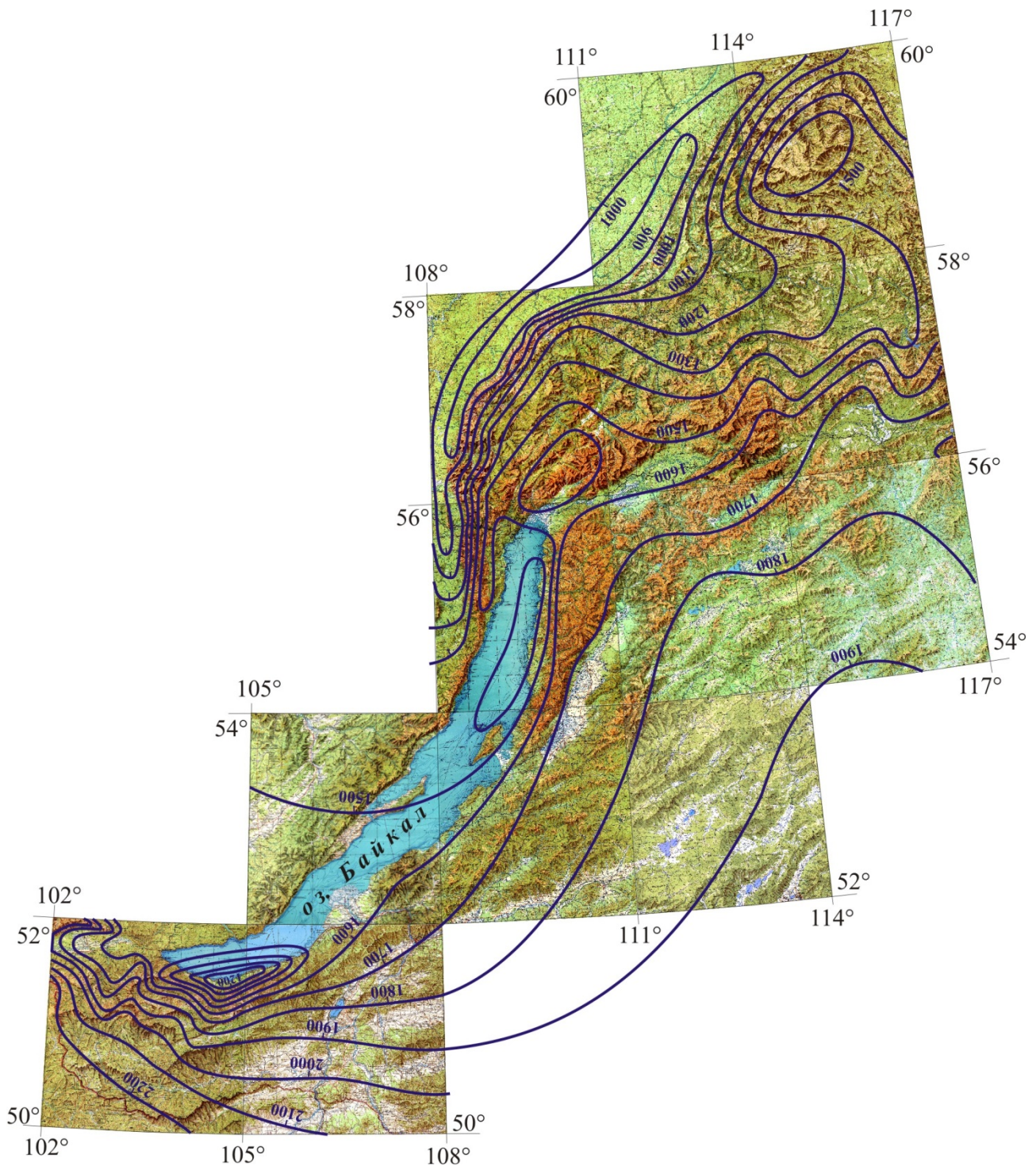


Рис. 2. Изохионы снеговой границы сартанского оледенения

Изохионы, цифры – абсолютные отметки, м

Fig. 2. Isochions snow line of the Sartan Glaciation

Isochions, numeral – absolute point, m

Существенное влияние на распределение осадков, питающих ледники, оказывало оз. Байкал. Огромный водоем с колоссальной теплоемкостью воздействовал на многие климатические факторы: влажность, температуру воздуха, годовое распре-

ление атмосферных осадков и др. Обширная акватория, непосредственно ограниченная высокими горами, приводила к формированию фронтогенеза вдоль южного побережья, который обеспечивал дополнительное питание ледников твердыми осадками. Эта

аномалия в распределении температуры воздуха и осадков по высоте и латерали в какой-то мере прослеживается и в настоящее время [Ермакова, 2010]. О том, что такое явление не является уникальным, можно судить по Кузнецкому Алатау, где современные ледники лежат примерно на 1 000–1 200 м ниже климатической снеговой линии [Долгушин, Осипова, 1989; Адаменко, 2014].

Отсутствие явных следов ледниковой деятельности на хр. Малый Хамар-Дабан свидетельствует о прохождении климатической снеговой границы выше максимальных отметок водораздельных вершин (гора Армак, 2 097 м). На расположенном еще южнее, вдоль государственной границы, Джидинском хребте абсолютная отметка горы Сарьдиг-Ула составляет 2 027 м (см. рис. 1). На склоне северной экспозиции нет явных следов ледниковой деятельности. Воронкообразная ложбина в верховье долины р. Цэджэ сформировалась, вероятно, в результате нивальных процессов. Однако явных следов обработки склона снежно-каменными лавинами и накоплений обломочного материала также не наблюдается. Не исключено, что это характерное образование может являться реликтом более древнего оледенения, когда депрессия снеговой границы была ниже, чем в сартанское время.

Полное отсутствие даже незначительных следов ледниковой деятельности в вершинном ярусе горных сооружений, расположенных южнее хр. Хамар-Дабан вплоть до низкогорно-равнинных областей Северной Монголии, свидетельствует о прохождении на этой территории нижней границы хионосферы существенно выше 2 000-метровой отметки. Климатическая снеговая граница, установленная исследованиями зарубежных специалистов на сопредельных северных территориях Китая и Монголии, также располагается в интервале высот 2 100–2 200 м [Shi Yafeng, 1991]. Она полностью совпадает с нижней границей хионосферы рассматриваемой территории.

Еще более глубокий отрицательный экстремум отмечается вдоль западной границы Станового нагорья (см. рис. 2). Он узкой полосой прослеживается от подножья Байкальского хребта на север, далее вдоль основания западного склона хр. Аkitкан и северо-западного клифа Северо-Байкальского и Патомского нагорий (см. рис. 1, 2). Здесь депрессия снеговой границы достигает абсолютных отметок 900–1 000 м над у. м.

Природа столь значительного отрицательного экстремума обусловлена как глобальными причинами, связанными с перехватом западного переноса атмосферной влаги, так и региональными – орографическими. Этому способствовала северная ориентация нешироких, но высоких хребтов Байкальского (до 2 588 м над у. м.) и Аkitкана (2 067 м), отделяющих западные и северо-западные границы Стано-

вого нагорья от мелкопочечного рельефа Предбайкальской впадины. Узкая депрессионная ложбина постепенно повышается в южном направлении, выклиниваясь на высоте 1 300–1 400 м в верховье бассейна р. Улькан (см. рис. 2). Непосредственно от депрессионного минимума на восток нижняя граница хионосферы круто поднимается к оси Байкальского хребта, в вершинном поясе которого, ближе к восточному склону, достигает высоты 1 500 и более метров. В том же направлении отмечается дальнейшее, но плавное, увеличение высоты снеговой границы как с запада на восток, от 1 700 м над у. м. вдоль северо-восточного борта Баргузинской впадины до 1 800 и более метров в районе озер Орон и Баунт, так и с севера на юг – от 1 600 м над у. м. в юго-западной части Верхнеангарской котловины до 1 800 м над у. м. и выше на Витимском плоскогорье. В этих направлениях возрастает аридизация атмосферы, обусловленная сухим климатом северного Китая и Монголии (северная периферия Гобийского антициклона). Уменьшение атмосферной влаги приводило к крайне незначительным накоплениям снега. Даже на юго-восточном склоне хребта Мал. Каптон с высотами до 2 135 м, ограничивающего с юго-востока Ципиканскую впадину, наблюдаются только нивальные ниши в виде слабо оформленных блюдцеобразных расширений в верховьях рек Чинакан и Алакар.

Активные криогенные процессы, наблюдающиеся и в настоящее время, способствовали возникновению 5–8 уровней нагорных террас. Интенсивное курмуобразование, как правило, обусловлено отсутствием устойчивого и достаточно мощного снежного покрова. В вершинах коротких ложбин, пересекающих противоположный крутой северо-западный склон этого хребта, отмечается серия небольших воронкообразных каров без выработанного днища с небольшими накоплениями моренного материала вниз по ложбине до отметки 1 550 м. Положение этих слабо развитых экзарационных форм рельефа контролируется высотой водораздельных отметок 1 950–2 000 и более метров. Если абсолютная высота водораздела менее этих значений, то гляциогенные микро- и мезоформы рельефа не наблюдаются. Разница в характере и положении деструктивных элементов рельефа на противоположных склонах хр. Мал. Каптон отражает локальную депрессию снеговой границы до 100–200 м, обусловленную «теневым» эффектом и экспозицией склона.

Далее на юг отдельные вершины водораздельных пространств Витимского плоскогорья высотой 1 630–1 846 м над у. м. не имеют следов ни ледниковой, ни нивальной деятельности. Здесь климатическая снеговая линия располагалась в интервале 1 800–1 900 м. Ее положение согласуется с высотой орографической палеоснеговой границы, равной

1 900–2 000 м, на горном массиве Сохондо (2 500,5 м) и Быстринском Гольце (2 519 м), находящихся южнее – ближе к северной границе Монголии [Еникеев, 2006; Еникеев, Старышко, 2009].

Перед северо-западным клифом Патомского нагорья глубокий минимум депрессии снеговой границы продолжается на юго-запад вдоль западного подножья хр. Аkitкан. Особенности климата, орографии и разнообразная экспозиция склонов водоразделов определили своеобразное поведение нижней границы хионосферы (рис. 2). В региональном плане отмечается ее повышение от 900 м над у. м. на северо-западном фланге нагорья до 1 500–1 600 м – в центральной части. В том же направлении, практически совпадая с нижней границей хионосферы, увеличиваются высоты водораздельных пространств от 1 000–1 100 м на западном клифе до вершины горы 1 641 м, расположенной на междуречье Мал. Чипикет – Тонодо – Бол. Чипикет. Это увеличение достигает максимума в центральной части Патомского нагорья. Здесь оформился частично изолированный положительный экстремум высотой до 1 500–1 600 м над у. м. На этой площади большинство водораздельных сопков высотой 1 500 м и выше не имеют следов ледниковой деятельности и отсутствуют эрратические валуны максимального оледенения (MIS 8), россыпь которых установлена даже на левобережье р. Лена [Нагорья, 1974; Еникеев, Старышко, 2009]. А на юго-восточном склоне центрального массива (гора 1 641 м) отмечаются весьма незначительные следы воздействия бывшего ледника на коренной субстрат (см. рис. 1). Ледниковая долина не имеет даже кара, вместо которого отмечается воронкообразное расширение в вершине распада, свидетельствующее о крайне ограниченной площади снежного питания бывшего ледничка. Аналогичная ситуация отмечается во всех вершинах долин, центробежно ориентированных к этой высоте. Вместе с тем выработанные кары на северных и западных окраинах нагорья, расположенные на высоте, соответственно, 880 и 850 м над у. м., обладают классическими экзарационными формами и содержат каровое озеро или каменный глетчер.

В пределах Северо-Байкальского нагорья самый северный кар находится на северном склоне высоты с отметкой 1 496 м, расположенной на междуречье Витим – Мама – Конкудера. В пределах этого горного массива кары приурочены только к его северному макросклону и отражают влияние «теневого» эффекта. В остальных направлениях в вершинах радиально ориентированных распадков отмечаются нивальные кары со снежниками (восточный склон) или полностью отсутствуют следы ледниковой деятельности (склоны южной экспозиции). Все эти признаки совместно с 4–5 уровнями нагорных террас свидетельствуют о малой мощности снегового покрова,

незначительной площади снежного питания ледников и практическом совпадении высоты снеговой границы с отметками водораздельных пространств.

В южном и юго-восточном направлении нижняя граница хионосферы достаточно быстро повышается до высоты 1 200–1 300 м над у. м. В те же стороны увеличивается высота водоразделов Северо-Байкальского нагорья (см. рис. 2). Далее на юг до северных отрогов Верхнеангарского хребта высота снеговой границы повышается до 1 300–1 400 м над у. м. Однако опережающее увеличение абсолютных отметок хребтов приводит к существенному расширению площади питания ледников. Еще южнее нижняя граница хионосферы поднимается до отметок свыше 1 600 м над у. м. Здесь высота хребтов Делюн-Уранский, Северо-Муйский и Муяканский достигает отметок 2 200–2 500 м. Столь существенное повышение рельефа над нижней границей хионосферы привело к широкому распространению области круглогодичного снежного покрова, охватывавшего все элементы хребтов практически до нижних частей макросклонов.

Повсеместно локальное влияние на депрессию снеговой границы оказывает экспозиция склона. Такое явление наиболее характерно для высоких горных сооружений и хребтов, ориентированных субширотно. Величина понижения, по сравнению с таковыми на склонах южной экспозиции, чаще всего составляет 150–200 м. Показать ее изолиниями на картах масштаба 1:500 000 не представляется возможным.

Заключение

Использование методов палеогляциологии, родившейся во второй половине прошлого столетия на стыке гляциологии, гляциальной геоморфологии и четвертичной геологии, решает многие проблемы в восстановлении древнего оледенения. Геоморфологический анализ гляциогенных образований, установленных преимущественно дистанционными методами, с использованием материалов геологической съемки масштаба 1:200 000 и результатов исследований, проведенных научными организациями, позволил определить депрессию снеговой границы в максимум последнего похолодания в среднем на 1 300–1 400 м по отношению к современной климатической. Выявлено изменение кривизны нижней границы хионосферы в зависимости от климатических особенностей и физико-географических условий территории. Реконструирована нижняя граница хионосферы эпохи сартанского криохрона (MIS 2). Ее пересечение с рельефом местности очерчивает площади питания ледников, оказывающие влияние на их размеры, активность, и способствует возрастной и латеральной увязке деструктивных и аккумулятивных ледниковых образований как в Прибайкалье, так и в горных районах юга Восточной Сибири.

Реставрированная орографическая снеговая граница максимальной фазы сартанской эпохи позднеплейстоценового оледенения оконтуривала площади, имеющие положительный баланс твердых атмосферных осадков. Устойчивый снежный покров определял области питания ледников. Из них наиболее крупные охватывали водораздельные пространства и склоны хребтов Байкальского, Баргузинского, Верхнеангарского, Делюн-Уранского, Северо-Муйского, Южно-Муйского, Каларского и Кодара.

Выявленные закономерности деформации снеговой границы, обусловленные глобальными, региональными и локальными причинами, позволяют проводить достоверные и (или) предварительные корреляции аккумулятивных и экзарационных форм рельефа разобщенных горных сооружений обширных пространств Азиатского континента.

Работа выполнена по проекту IX.137.1.1 (№ госрегистрации АААА-А17-117011210078-9).

ЛИТЕРАТУРА

- Адаменко М.М. Динамика оледенения и климата Тигертышского горного узла (юг Кузнецкого Алатау) в позднеплейстоцено-голоценовое время : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2014. 25 с.
- Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Ледники. М. : Мысль, 1989. 447 с.
- Еникеев Ф.И. Депрессия снеговых границ плейстоценовых оледенений Восточного Забайкалья // Геоморфология. 2006. № 3. С. 56–65.
- Еникеев Ф.И. Каровые озера Восточного Забайкалья // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 124–134.
- Еникеев Ф.И., Старышко В.Е. Гляциальный морфогенез и россыпеобразование Восточного Забайкалья. Чита : ЧитГУ, 2009. 370 с.
- Еникеев Ф.И., Старышко В.Е. Ледники хребта Кодар (Северное Забайкалье) // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 107–117.
- Ермакова О.Д. Региональные особенности атмосферных осадков зимнего периода на северном макросклоне хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // Известия Самарского научного центра. 2010. Т. 2, № 1 (5). С. 1379–1382.
- Калесник С.В. Очерки гляциологии. М. : Географиз, 1963. 551 с.
- Нагорья Прибайкалья и Забайкалья (история развития рельефа Сибири и Дальнего Востока). М. : Наука, 1974. 359 с.
- Щукин И.С. Общая геоморфология. М. : МГУ, 1960. Т. 1. 615 с.
- Shi Yafeng. Glaciers and glacial geomorphology in China // Quaternary Geology and Environment in China. Science Press, Beijing, China, 1991. P. 16–27.

Авторы:

Еникеев Фарид Исакович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

Geosphere Research, 2020, 4, 33–41. DOI: 10.17223/25421379/17/3

F.I. Enikeev

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

PECULIAR PROPERTIES OF THE SNOW LINE DEPRESSION IN THE BAIKAL REGION DURING THE SARTAN STAGE OF THE LATE PLEISTOCENE GLACIATION

On the basis of remote sensing methods by the Partch and Brueckner method, using materials from geological surveys with a scale of 1: 200,000 and research results obtained by scientific organizations, the nature of the snow boundary in the maximum phase of the Sartan glaciation in the territory of the Baikal region was restored. The principal moment of the reconstructions was the determination of the magnitude of the global, regional and local depressions of the snow boundary, due to both climatic factors and the orography of mountain structures, the heights of their watersheds and frontal scarps, as well as the orientation in space and the exposure of slopes. By the absolute marks of destructive and accumulative traces of glacial activity using topographic maps, aerial and satellite images of large and medium scales, depending on the size of the glacial morphology object and the degree of its detailing, the lower boundary of the chionosphere has been established. Its intersection with the terrain outlines the areas of glacier feeding, influencing their size, activity, and contributes to the age and lateral linking of destructive and accumulative glacial formations both in the Baikal region and in the mountainous regions of southern Eastern Siberia. The depression of the orographic snow boundary was established on average by 1300–1400 m in relation to the modern climatic one. On the southern coast of Lake Baikal (up to 1200 m above sea level) and at the base of the western cliff of the Stanovoy Upland (up to 900 m), its negative extremes are revealed, and on the Patom Upland, Vitim plateau and in the western part of the ridge. Khamar-Daban - positive. As a result of the restoration of the orographic snow boundary of the maximum phase of the Sartan glaciation, areas with a positive balance of solid atmospheric precipitation within the studied area were outlined. Stable snow cover in this area determined the areas of glacier feeding. The largest of them covered watershed areas and slopes of ridges: Baikalsky, Barguzinsky, Verkhneangarsky, Delyun-Urinsky, Severo-Muisky, Yuzhno-Muisky, Kalarsky and Kodar ridge. The revealed patterns of deformation of the lower boundary of the chionosphere were determined by global, regional and local climatic features of the Baikal region. All paleogeographic constructions were carried out using the computer programs Google Earth Pro and SAS. Planet. Release. Due to the large area of the considered territories, the final generalization of the primary material was carried out on a topographic basis on a scale of 1: 500,000.

Keywords: Late Pleistocene, cirque, snow line, exaration, moraine, reconstruction, Paleoglaciology, Baikal Region.

References

- Adamenko M.M. *Dinamika oledeneniya i klimat gornogo uzla Tigertysh (yug Kuznetskogo Alatau) v pozdnem pleystotsen-golotsenovom vremeni*. [Dynamics of glaciation and climate of the Tigertysh mountain node (south of the Kuznetsk Alatau) in the Late Pleistocene-Holocene time]. PhD thesis, Tomsk, 2014. 25 p. In Russian.
- Dolgushin L.D., Osipova G.B. *Ledniki* [Glaciers]. Moscow : Publ. house Thought, 1989. 447 p. In Russian.
- Enikeev F.I. *Depressii snegovykh granic pleystotsenovykh oledeneniya Vostochnogo Zabaykal'ya* [Paleosnowline depressions of Pleistocene glaciations in the Eastern part of Transbaikalia] // *Geomorfologiya*. 2006, No 3. pp. 56–65. In Russian.
- Enikeev F.I. *Ozera Vostochnogo Zabaykal'ya* [Lakes of Eastern Transbaikalia] // *Geography and Natural Resources*, 2017. No 2, pp. 124–134. In Russian.
- Enikeev F.I., Saryshko V.E. *Glyacial'nyy morfogenez i rosspeobrazovanie Vostochnogo Zabaykal'ya* [Glacial morphogenesis and placer formation in the Eastern Transbaikalia]. Chita: ChitGU, 2009. 370 p. In Russian.
- Enikeev F.I., Saryshko V.E. *Ledniki hrebta Kodar (Severnoe Zabaykal'e)* [Glaciers of the Kodar ridge (Northern Transbaikalia)] // *Geography and Natural Resources*. 2014. No 1. pp. 107–117. In Russian.
- Ermakova O.D. *Regionalnyye osobennosti osadkov v zimniy period na severnom makrosklone Khamar-Dabankogo khrebta (Yuzhnoe Priбайkal'ya)* [Regional features of precipitation during the winter period on the northern macroslope of the Khamar-Daban ridge (Southern Baikal region)] // *Proceedings of the Samara Scientific Center*. 2010. T. 1, No 1 (5), pp. 1379–1382. In Russian.
- Kalesnik S.V. *Ocherki po glyatsiologii* [Essays on glaciology]. Moscow: Geografiz, 1963. 551 p. In Russian.
- Nagor'ya Priбайkal'ya i Zabaykal'ya (istoriya razvitiya rel'yefa Sibiri i Dal'nego Vostoka) [The highlands of the Baikal and Transbaikalia (history of the development of the relief of Siberia and the Far East)]. Moscow: Nauka, 1974. 359 p. In Russian.
- Schukin I.S. *Obshchaya geomorfologiya*. [General geomorphology]. T. 1. Moscow: MGU. 1960. 615 p. In Russian.
- Shi Yafeng. *Glaciers and glacial geomorphology in China* // *Quaternary Geology and Environment in China*. Science Press, Beijing, China, 1991. pp.16–27.

Autor:

Enikeev Farid Iskhakovich, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia.

УДК 551.4.07

ГЕНЕЗИС ГРЯДОВО-ЛОЖБИННОГО РЕЛЬЕФА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

А.В. Поздняков^{1,2}, Ю.С. Пупышев¹, А.В. Пучкин^{1,2}, Т.Ш. Фузелла¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия



Исследованы текстурные характеристики гряд – структура, гранулометрический и минералогический состав отложений; дана общая характеристика гряд. Установлено, что формирование грядово-ложбинных комплексов Западно-Сибирской равнины произошло в результате развития эоловых дефляционно-аккумулятивных процессов. Изоморфное (автомодельное) формирование парагенетически связанных эолово-аккумулятивных гряд и дефляционно-денудационных ложбин на всех континентах северного полушария явилось реакцией на соответствующие изменения геологических (и климатических) условий среды.

Ключевые слова: голоценовая история, грядово-ложбинный рельеф, текстура, структура, конвергентная слоистость, песчаная пустыня.

Введение

История развития геозкосистем континентальной части северного полушария в голоцене (13 тыс. л. н.) насыщена множеством пространственно разобщенных, но объединенных временем генетически разнородных событий. Главные из них: резкое похолодание климата, сопровождавшееся переформированием экотонных и гибелью мамонтовой фауны; переселение морских млекопитающих (тюленей рода *pusa*) из арктических морей в континентальные озера северной части Евразии (оз. Байкал, Каспийское, Ладожское и другие озера); формирование высоконапорных ледово-подпрудных озерных бассейнов – оз. Миссула (США), Чуйско-Курайское (Россия).

К той же категории природных событий относится и образование протяженных (до 100 км) лениаментоподобных гряд в Южной Сибири (Барабинская равнина и Казахстанское Приишимье), бэровских бугров в Прикаспийской низменности и Калмыкии, гряд Южной Каролины, ориентированных форм рельефа на Великих Равнинах и гряд *paha* – материковых дюн на юго-востоке США (рис. 1).

Можно полагать, что все они характеризуются пролонгированным действием, выразившимся в накоплении информации о направленных изменениях климатических и ландшафтных характеристик в течение 13 тыс. лет. В формировании грядово-ложбинного литогенетического комплекса сосредоточен значительный, до сих пор не полностью раскрытый объем разнообразной информации – не только о его динамике, но и об изменениях природных условий, включая и климатические, произошедших на границах плейстоцена и голоцена в северной части континентов. Научная и практическая

актуальность состоит в разрешении вопроса, действием каких сил было предопределено развитие перечисленных процессов на Земле.

В статье излагаются результаты, полученные при исследовании генезиса грядово-ложбинного геоморфолитогенетического комплекса Барабинской равнины. Его информационная суть позволяет значительно приблизиться к объективному отображению причин, инициировавших изменения климата, которые, предположительно [Волков, 1976, 1980; Величко, Тимирева, 2005; Казьмин, Волков 2010], начались в голоцене (ранний дриас, 13 тыс. л. н.) и продолжают в настоящее время, проявляясь в потеплении климата.

Цель исследования состоит в определении генезиса грядово-ложбинного литогенетического комплекса (ГЛПК). Приведены результаты изучения геологических разрезов слагающих гряды отложений; представлена общая характеристика текстуры, слоистости и структуры отложений; характеристика гранулометрического и минералогического состава. На основе их анализа делается вывод о формировании ГЛПК вследствие активного действия дефляционно-аккумулятивных процессов, по-видимому, начавшихся в раннем дриасе. Установлено, что в моделировке дефляционно-аккумулятивного грядово-ложбинного рельефа заметно влияние более позднего развития абразионно-аккумулятивных процессов. Определение генезиса гряд проведено на основе дешифрирования космических снимков, маршрутного геоморфологического обследования грядово-ложбинного комплекса Барабинско-Чановской территории и анализа результатов ранее проводившихся исследований.

Современное состояние изученности проблемы генезиса грядово-ложбинного литогенетического комплекса. Генезис, причины и условия образования про-

тяженных лениаментоподобных ленточных гряд в южной части Западно-Сибирской равнины (Барабинско-Чановский, Приишимский и другие грядовые ком-

плексы) до настоящего времени представляются и описываются в виде недостаточно обоснованных фактическим материалом постулируемых положений.

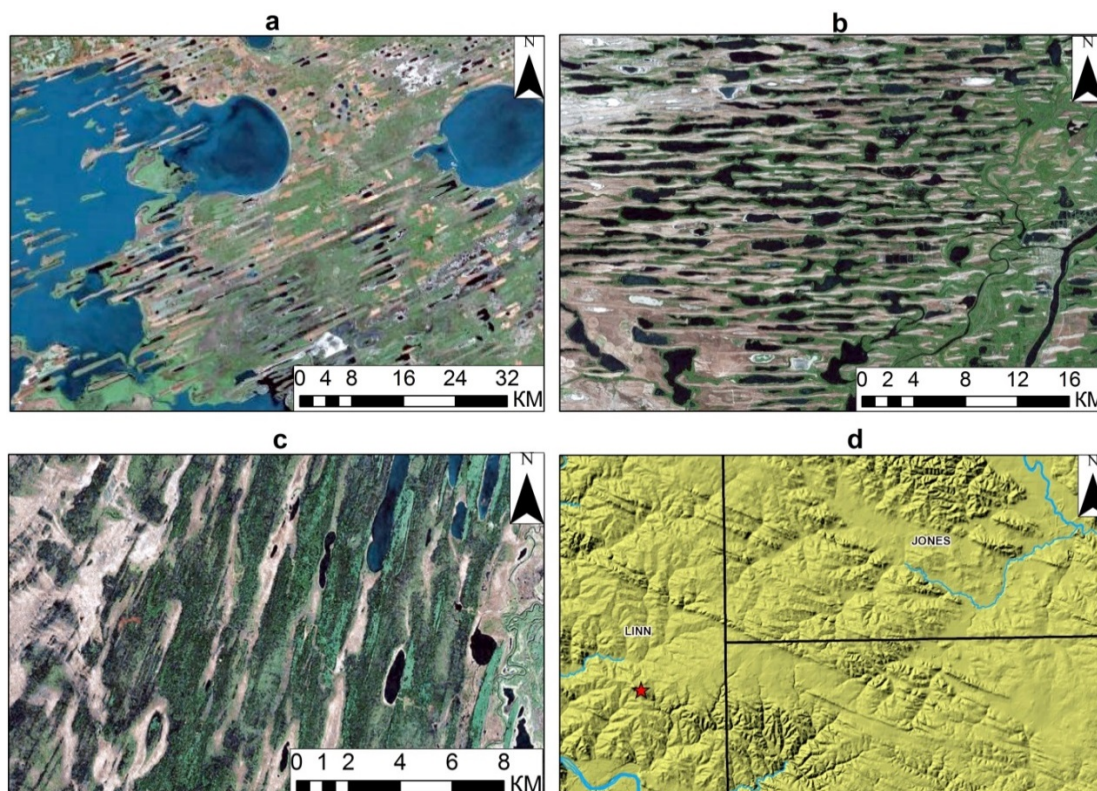


Рис. 1. Фрагменты грядово-ложбинного рельефа, сформировавшегося на территории континентальной части Северного полушария

a – грядово-ложбинный рельеф Чановско-Барабинской равнины (Западно-Сибирская низменность); *b* – Бэровские бугры в Прикаспийской низменности; *c* – грядово-ложбинный рельеф в провинции Саскачеван (Канада); *d* – грядово-ложбинный рельеф паха, штат Айова, США [Prior, 1991]

Fig. 1. Fragments of ridge-hollow relief formed on the territory of the continental part of the Northern hemisphere
a – ridge-hollow relief of the Chanovo-Barabinsk plain (West Siberian lowland); *b* – Baer knolls in the Caspian lowland; *c* – ridge-hollow relief in the province of Saskatchewan (Canada); *d* – ridge-hollow relief «paha», Iowa, USA [Prior, 1991]

Предложено пять гипотез: флювиально-гляциальная, аллювиально-аккумулятивная, эоловая, гравитационная и космогенная. В монографии «История развития речных долин и проблемы мелиорации земель» [Белецкая, 1979; Николаев и др., 1979] серия статей посвящена дискуссии по проблеме генезиса «гривного рельефа» Барабинской равнины и Петропавловского Приишмья (Казахстан). Мнения ученых разделились на две взаимно исключающие альтернативы. Одни исследователи категорически отвергали эоловый генезис долин, полагая, что они имеют эрозионно-аккумулятивное происхождение; другие же обосновывали образование грядово-ложбинного рельефа дефляционно-аккумулятивными процессами.

Определяющую роль в суждениях играла отмечаемая всеми исследователями исключительная выдержанность (ориентированность) простирания

гряд, почти геодезическая точность, с которой гривы уложены на поверхности Земли. Замечательный анализ закономерностей пространственного распределения гряд был проведен Д.Н. Фиалковым [Фиалков, 1964, 1970], установившим и количественно охарактеризовавшим со среднеквадратической ошибкой измерений $+1,6-2,3^\circ$ соотношения протяженности гряд и их азимутальной ориентировки. Кроме того, им была установлена разность площадей гряд и межгрядовых понижений. По результатам анализа Д.Н. Фиалков пришел к выводу, что «ни водные, ни эоловые процессы не могли создать механизм, способный с такой точностью моделировать рельеф по направлению длинных осей простирания гряд» [Фиалков, 1964, с. 12]. Автор убежден, что силы, создавшие Чановско-Барабинский ансамбль гряд, надо искать в геотектонических процессах.

Существует и иная точка зрения, согласно которой определяющее значение в формировании грядово-ложбинных комплексов имели процессы, непосредственно связанные с «трансконтинентальными системами катастрофических потоков» [Гросвальд, 1999]. По мнению М.Г. Гросвальда, «прямолинейные долинны формы создаются не только ветром и тектоникой, но также потоками высокой мощности», что связано с образованием и последующим прорывом ледово-подпрудных озер. Подводя итог практического применения своих идей для объяснения генезиса грядово-ложбинного рельефа, автор утверждает, что «грандиозность размеров грядово-ложбинных комплексов, их прямолинейность, слабая зависимость от топографии местности и принадлежность к непрерывной трансконтинентальной зоне позволяют предполагать их связь с катастрофическими потоками огромной мощности» [Гросвальд, 1999, с. 52].

В разные годы проводившие исследования генезиса глив И.А. Волков и С.П. Казьмин связывают их образование (так же, как и грядово-ложбинного рельефа в Прикаспии) с эоловыми процессами и лесовой аккумуляцией [Волков, 1976, 1980; Казьмин, Волков, 2010]. Утверждается, что ГЛГК формировался в эпохи аридизации (~21–14 тыс. л. н.), сопровождавшиеся развитием эоловых процессов, ареной деятельности которых была поверхность днища, освобожденная от затопления Мансийским морем. Отмечается, что грядово-ложбинный рельеф является наложенным на различные элементы древнего рельефа [Волков, 1976, с. 273].

Совсем недавно появились публикации коллектива авторов [Бейзель, 2018; Бейзель и др., 2019], в которых в постулированной и в предположительной формах высказаны две противоположные точки зрения. В одной, опирающейся на идеи М.Г. Гросвальда о флювиально-катастрофическом происхождении грядово-ложбинного рельефа во всех известных районах их распространения в пределах России, гипотеза об эоловом происхождении слагающих гряды отложений ставится под сомнение [Бейзель и др., 2019, с. 8] и отмечается, что только покровные лесовые суглинки, имеющие широкое распространение на рассматриваемой территории, являются эоловыми. Согласно другой [Бейзель, 2018], утверждается, что поскольку Казанцевская грива, «как и все остальные, сложена эоловыми осадками», она сформировалась «под воздействием бокового ветра, направленного с север-северо-запада на юг-юго-восток», следовательно, «гряды являются поперечными формами эолового рельефа и созданы ветрами северных румбов; современными аналогами глив являются эоловые формы третьего порядка – драа, выделенные и детально описанные в Сахаре» [Бейзель, 2018, с. 95].

Изоморфным аналогом грядово-ложбинного рельефа Барабинской равнины являются параллельные друг другу, вытянутые в согласованном субширотном направлении гряды в Прикаспийской низменности, впервые охарактеризованные К.М. Бэрром [1856] и названные им *буграми* (рис. 1, 2), формировавшиеся, по его мнению, в результате изменений уровня Каспийского моря. Характеристика Бэровских бугров, приведенная Б.А. Федоровичем [Федорович, 1941, 1964], до деталей совпадает с геоморфологической картиной причановской части грядово-ложбинного рельефа Западной Сибири. «Тысячи длинных, узких, вытянутых прямолинейно и параллельно друг другу озер... ильменей... правильными рядами разложенные на земле и слегка, лишь на четверть, выступающие из воды... Этот замечательный рельеф тянется до берега Каспия (читай оз. Чаны. – *Авт.*), постепенно все более заполняясь его водами... но не заканчивается даже на дне морском (читай озерном. – *Авт.*), где сквозь мелкие воды просвечиваются на дне такие же длинные, округлые и пологие увалы... Поражает какая-то искусственность этого рельефа, настолько он правилен, однообразен и геометричен в своих очертаниях» [Федорович, 1941, с. 98]. Б.А. Федорович считал генезис бэровских бугров эоловым. Этой же точки зрения придерживались О.К. Леонтьев и Н.Н. Фотеева [Леонтьев, Фотеева, 1965] и многие другие исследователи.

Известны и сторонники другой гипотезы генезиса бэровских бугров, как и К. Бэр, связывающие его с развитием абразионно-аккумулятивных процессов в условиях «мощных встречных нагонно-стоковых течений в прибрежной части Каспия в период регрессии» [Свиточ, Ключевиткина, 2004, 2007]. По их заключению, не являются они и генетическим аналогом *грядовому рельефу* Западной Сибири и *эоловым грядам* в среднеазиатских пустынях.

Геоморфологическим аналогом грядовому рельефу Барабинской равнины являются ориентированные грядово-ложбинные комплексы, наблюдаемые и достаточно изученные в различных районах США. В некоторых публикациях [Baldauf et al., 2019] рассматриваются исторические аспекты формирования дюнного рельефа на Великих Равнинах США (дюны штата Небраска), где, как полагается авторами, было 12 периодов *реактивации* дюнного рельефа, с перерывами происходившей в позднем плейстоцене, среднем голоцене и в малый ледниковый период.

Вероятно, можно считать до сих пор не превзойденным монографический обзор по географическому распространению и геоморфологической характеристике материковых дюн, выполненный Н.В. Markewich [Markewich, Markewich, 1994; Markewich et al., 2015]. В обобщении приводятся морфометрические характеристики грядовых дюн

ных комплексов в Южной Каролине и Северной Каролине, где их высота не превышает 8–10 м, а многие достигают лишь 2 м. Отмечается, что тяжелые минералы повсюду составляют менее 1 % от всего дюнного объема песка. На поставленный авторами и важный для нас вопрос, являются ли эоловыми материковые дюны на юго-востоке США, дается утвердительный ответ: дюны образовались в результате ветровой эрозии большого количества песка из открытых полей, террас и бухт Каролины и накопления этого песка на соседних покрытых растительностью террасах и склонах долин. Говоря о времени формирования ГЛГК, авторы утверждают, что в течение позднего плейстоцена и раннего голоцена дюны формировались во многих различных регионах Соединенных Штатов (штаты Аризона, Колорадо, Техас и Нью-Мексико, Вайоминг, Канзас и Небраска и др.). Они свидетельствуют об интервалах палеоклимата, когда ветровая эрозия и осаждение песка были доминирующими процессами изменения ландшафта.

Представляется важным обобщающий вывод авторов о том, что на некоторых территориях юго-восточной, западной, центральной и северо-восточной частей Соединенных Штатов засуха и сильные однонаправленные ветры были распространены в течение от 10 до 12 тыс. лет. Таким образом, подтверждается предложенная ранее глобальная модель засушливости в северном полушарии в раннем голоцене [Волков, 1976; 1980; Величко, Тимирева, 2005].

По терминологии американских исследователей [Gaylord et al., 2002; Iannicelli, 2010], «парная эоловая активность» (дюна–лесс) характеризует покровные отложения на Колумбийском плато в восточной части Вашингтона. Рельеф формировался в условиях полуаридного климата за счет устойчивого действия направленных с юго-запада на северо-восток ветров. Установлено, что линейные песчаные гряды формировались в более засушливых частях территории, а холмы, сложенные богатого илом лессом с небольшой примесью песка, преобладают в более влажных частях территории.

Теоретический и научно-методологический интерес в аспекте определения генезиса *Барабинского типа* грядово-ложбинного рельефа представляют исследования, посвященные проблемам формирования так называемых *ориентированных гряд паха*, своеобразных линейных инлайеров (термин введен по названию района в южной части штата Айова) (рис. 1, *d*). Грядово-ложбинный рельеф типа *пах* распространен на территориях США с засушливым климатом: штаты Иллинойс, Канзас, Колумбийском плато и др. [Scholtes, 1951; Prior J.C., 1991; Iannicelli, 2003]. Он представляет собой сложенные песчаным материалом и покрытые лессом линейные гряды холмов высотой 10–30 м, ориентированные по простиранию с северо-запада на юго-восток.

Генезис грядово-ложбинного рельефа типа *пах* до сих пор дискутируется. В одной из последних гипотез [Iannicelli, 2003, 2010] полагается, что паха представляет собой реликтовые ориентированные гряды, образованные эрозионными процессами, развивавшимися в результате таяния снега в период холодной фазы плейстоцена. Пример образования ориентированных форм рельефа на о. Девон (остров в составе Канадского Арктического архипелага) свидетельствует, что начальной стадией развития гряд паха являлось формирование ориентированных речных долин, а затем их эолово-лессовое моделирование. Из данного суждения делается вывод, что грядово-ложбинный рельеф паха представляет собой реликты водоразделов, формировавшихся вследствие линейной эрозии и криогенных процессов [Iannicelli, 2003].

В качестве одного из дополнительных диагностических признаков существования аридных условий служат некоторые особенности образования берегов небольших по площади бессточных озерных бассейнов. К таковым относятся формы рельефа в виде серповидных валов и гряд высотой 6–9 м, сложенных суглинком и алевроитовым песком и окаймляющих блюдцеобразные понижения поверхности (например, солончаков и озер), названные *лунеттами* [Bowen et al., 2018]. Подобные образования в советской и российской научной литературе не называются таким термином, но часто встречаются, в частности на озерах Барабинской равнины. Валы образуются исключительно с подветренной стороны озерных ванн и понижений. Их образование, по нашим данным, связано с абразией берегов и эоловым выносом песчаного материала с подветренной стороны пляжей; развитие процесса начинается весной и продолжается в зимнее время.

Представленные нами суждения о генезисе ориентированного грядово-ложбинного рельефа имеют важное значение в исследовании причин изменения климата на Земле и в разработке прогноза дальнейшего развития событий. Они в общем совпадают с выводами, полученными российскими исследователями [Волков., 2003; Величко, Тимирева, 2005; Казьмин, Волков, 2010], и согласуются с выводами зарубежных ученых, полагающих, что ритмичность лессовой седиментации свидетельствует о глобальных экологических (и климатических) изменениях на континентах.

Фактологический материал и методы исследования

Наше исследование строится на основе методологии *системного критицизма*, направленного на раскрытие ошибочных или имеющих недостаточную изученность суждений, включающего их системный

анализ, позволяющий отличить ошибочные суждения от научно обоснованных. Этот метод предполагает рассматривать грядово-ложбинный комплекс как неординарный широко распространенный феномен в операционально-замкнутой природной геосистеме, представляющий собой выходную характеристику.

Методология системного критицизма, базируясь на глубоком научном знании процессов, создающих природный объект, и на применении процедур, позволяющих определять последовательность пространственно-временных событий, есть единственно возможный метод, приближающий исследование к объективному отображению природных явлений. Среди них могут быть и динамические геосистемы, находящиеся в стадиях самоорганизации и развития, в стадии динамического равновесия, в стадии деградации или возрождения и др.

Геосистемы характеризуются различной по длительности историей формирования и разнообразием накопленной информации. Дешифровка информа-

ции раскрывает не только происхождение геосистем, но и пространственно-временную последовательность изменения условий среды, которыми определялось их характерное время развития. Единственным из всех методов надежного дешифрирования информации служит исследование стратификации слагающих гряды отложений, фациального состава и его текстурно-структурных особенностей, характеризовавших условия окружающей среды, включая и климатические изменения.

Для определения генезиса гряд нами осуществлено дешифрирование космических снимков (геосервис Google Earth), маршрутное геоморфологическое обследование территории, анализ результатов ранее проводившихся исследований и изучение текстуры слоистости кореллятивных отложений гряд. В качестве наиболее представительной по распространению и геоморфологической выраженности гряд была выбрана территория Чановско-Барабинского грядово-ложбинного геоморфоскульптурного комплекса (рис. 2).

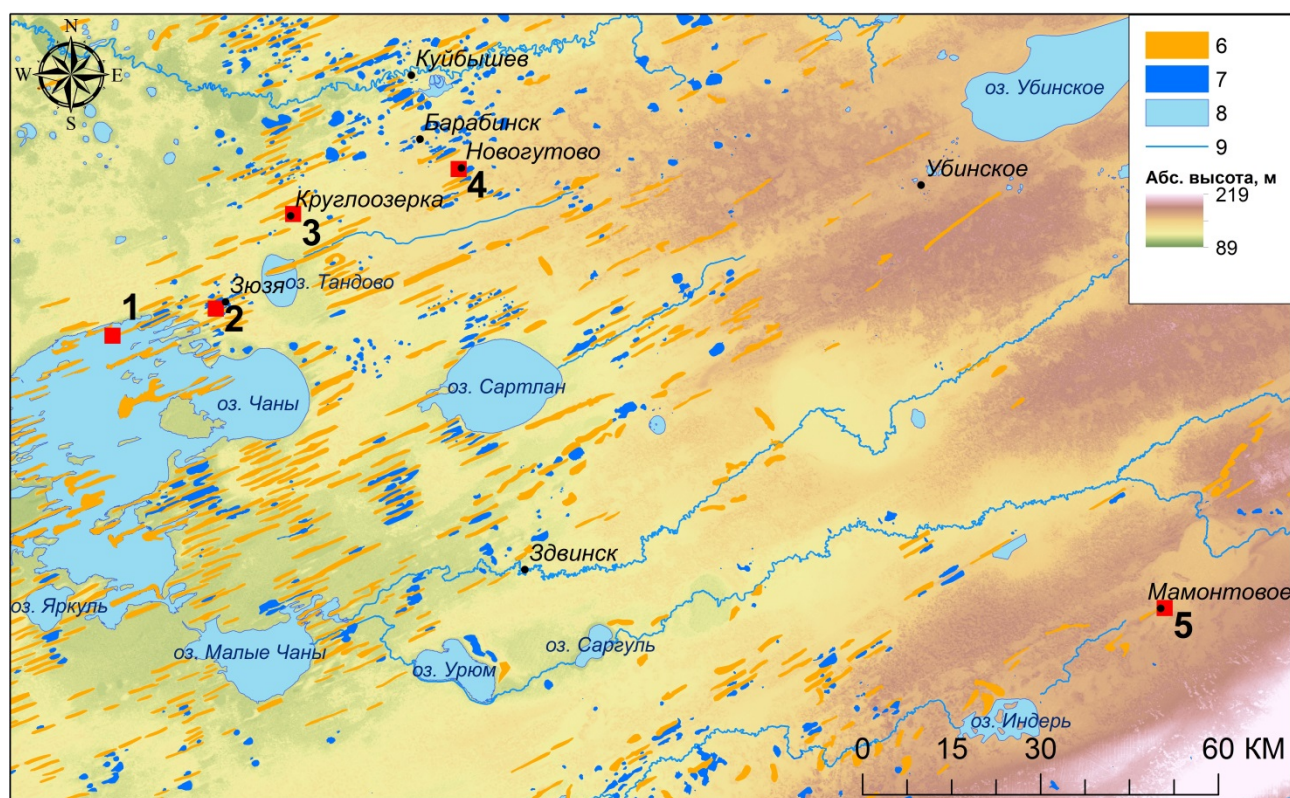


Рис. 2. Схема расположения участков исследования грядово-ложбинного рельефа на территории Барабинско-Чановского грядово-ложбинного комплекса

Участки геолого-геоморфологического исследования гряд: 1 – естественное обнажение абразионного клифа Казанцевской гряды; техногенные разрезы отложений на грядах: 2 – Зюзинская; 3 – Круглозерская; 4 – Новогутовская; 5 – Волчья грива (с. Мамонтовое). Выраженные в масштабе: 6 – гряды (гивы); 7 – озера, заложенные в ложбинах (межгрядовых понижениях); 8 – озера; 9 – реки, протекающие по межгрядовым понижениям

Fig. 2. Layout of the study areas of ridge-hollow relief on the territory of Barabinsk-Chanovo ridge-hollow complex
Areas of geological and geomorphological research of ridges: 1 – a natural outcrop of the Kazantsevskaya ridge's abrasive cliff; man-made sections on the ridges: 2 – Zyuzinskaya ridge; 3 – Kruglozerskaya ridge; 4 – Novogutovsky ridge; 5 – Volch'ya ridge (village Mamontovoe). Expressed in scale: 6 – ridges; 7 – lakes embedded in hollows (inter-ridge depressions); 8 – lakes; 9 – rivers that flowing in depressions between ridges

На ней наблюдается множество линейных строго ориентированных на северо-восток (азимут 65–70°) гряд и разделяющих их ложбин протяженностью в несколько десятков километров. В межгрядовых ложбинах повсеместно располагаются зарастающие бессточные озера. Гряды пересекают самое большое в пределах Западно-Сибирской низменности оз. Чаны (площадь акватории, в зависимости от наполнения, составляет 1 708–2 269 км²). Для детального исследования были определены пять находящихся в транспортной доступности геоморфологически изоморфных участков гряд (см. рис. 2).

Территория *Казанцевской гряды* – это полуостров Казанцевский мыс протяженностью 12 км и прилегающая к нему акватория заливов оз. Чаны. Азимут простираения гряды, как и других подобных ей на окружающем пространстве их распространения, составляет 64° (северо-восток). Здесь обнаружено естественное обнажение внутреннего строения гряды, представляющее собой абразионный клиф высотой 5,5 м и протяженностью 300 м, секущий грядку вкрест ее простираения под углом с юго-востока на северо-запад (азимут 305°).

Зюзинская гряда (по названию с. Зюзя) – это четко выраженное в рельефе выположенное грядовое линейное возвышение с абсолютной высотой поверхности 115–117 м. Относительное превышение водораздельной выравненной поверхности над урезом воды располагающихся по обеим ее сторонам ложбинных (межгрядовых) озер составляет 10–12 м. Здесь исследовался техногенный разрез кирпичного завода (ныне закрытого) высотой до 4 м.

Круглоозерская гряда (по названию с. Круглоозерка) также характеризуется выровненной водораздельной поверхностью с увеличивающейся абсолютной высотой в северо-восточном направлении от 112 до 117 м. Относительные превышения поверхности составляют 5–7 м. По обеим сторонам грядовой возвышенности в разделяющих ее ложбинах сохраняются зарастающие озера, многие из которых имеют каплевидную форму, ориентированную по направлению ложбин и преобладающих ветров (65–70° СВ). Исследовался техногенный разрез отложений гряды на участке ее максимального возвышения – 117 м. Мощность вскрытой толщи отложений 3 м.

Новогутовская гряда (с. Новогутово) морфологически аналогична вышеописанным, за исключением того, что абсолютная высота ее поверхности на протяжении 5 км от наинизшей ее части (118 м) возрастает по направлению ЮЗ–СВ до 127 м. Затем так же убывает. По обеим сторонам гряды располагаются зарастающие бессточные ложбинные озера, с вытянутой их осью согласно простираению гряды. Слагающие грядку отложения описаны в обнаруженном на окраине села техногенном обнажении с высотой стенки до 3 м.

Волчья грива (с. Мамонтовое) располагается в 60 км на юг от станции Каргат Транссибирской железнодорожной магистрали. Шоссейная трасса пересекает грядку на участке между селами Озерки 6-е и Мамонтовое. Морфологически выраженная часть гряды наблюдается на протяжении 12,5 км, начиная с абсолютной высоты 140 м юго-западнее с. Озерки 6-е до 147 м на ее окончании в с. Мамонтовое. По обе стороны от гряды располагаются заболоченные озера, как и во всех других случаях, вытянутые согласно простираению гряды с юго-запада на северо-восток (азимут 58°). На окончании в северной части гряды описан техногенный разрез с высотой стенок до 3,5 м.

Методика описания разрезов. Руководящим принципом исследования слагающих гряды отложений является фациальный анализ, позволяющий объективно соотнести общегеографические условия осадконакопления с их синхронным отображением в формах рельефа. Поэтому при описании геологических разрезов особое внимание обращалось на выявление в отложениях гряд конвергентного типа текстуры слоистости, текстуры слоистости облегания и текстуры резких несогласий в стратификации отложений. Их описание сопровождалось отбором проб для гранулометрического анализа, проводившегося в камеральных условиях на почвенных ситах. Соотношение фракций определялось по их весу в процентах от общего веса пробы; а также шлиховым опробованием (16 проб) для полного минералогического анализа рыхлых отложений (анализ шлихов выполняла М.И. Липичук в лаборатории отделения геологии Томского политехнического университета).

Текстурно-структурная характеристика слагающих гряды отложений – результаты исследований

Текстуры конвергентной слоистости и стратиграфических несогласий. Наиболее представительным геологическим разрезом, в котором четко выражены конвергентные структуры слоистости (рис. 3, а), является Круглоозерская гряда (около с. Круглоозерка). Здесь техногенным разрезом глубиной 3 м вскрыты шесть залегающих с угловым несогласием пачек детритовых суглинков, преимущественно светло-коричневого цвета. Первая снизу пачка представлена алевроито-глинистыми конвергентными слоями (в клин сходящиеся слои), веером расходящимися к верхней части разреза отложений. Слоистость имеет четко выраженные границы, с возрастанием угла наклона от подошвы слоя к кровле от 10 до 20°; данное обстоятельство, по видимому, характеризует начало формирования ядра гряды, установленного и в разрезах отложений других гряд.

Вторая снизу тонкослоистая алевроито-суглинистая пачка, согласно залегающая на первой, тоже представлена конвергентной совокупностью слоев алевроитового песка и суглинками желтовато-светлоричного цвета; слои сходятся к нижней части разреза; угол наклона 25° – 30° , толщина слоев 5 мм, с четко выраженными границами толщиной 1–2 мм.

Третья пачка параллельно-слоистых алевроитовых суглинков с детритом фораминифер с резким несогласием горизонтально залегают на первой и второй толщах (рис. 3, а). Наблюдается чередование слоев с карбонатными выцветами со слоями без них. Возможно, выцветы связаны с сезонными из-

менениями влажности (дождями или таянием снежного покрова).

Четвертая пачка характеризуется конвергентно-слоистой текстурой, представленной расходящимися к кровле слоями суглинков с многочисленными включениями бесформенных обломков фораминифер.

Пятая и шестая пачки представлены незакономерно переслаивающимися субгоризонтально залегающими покровного типа суглинками, чередующимися со слоями карбонатных выцветов. В целом структура осадков представлена глиной с примесью алевроита и мелкозернистого кварц-полевошпатового песка с мелкими детритовыми обломками фораминифер.

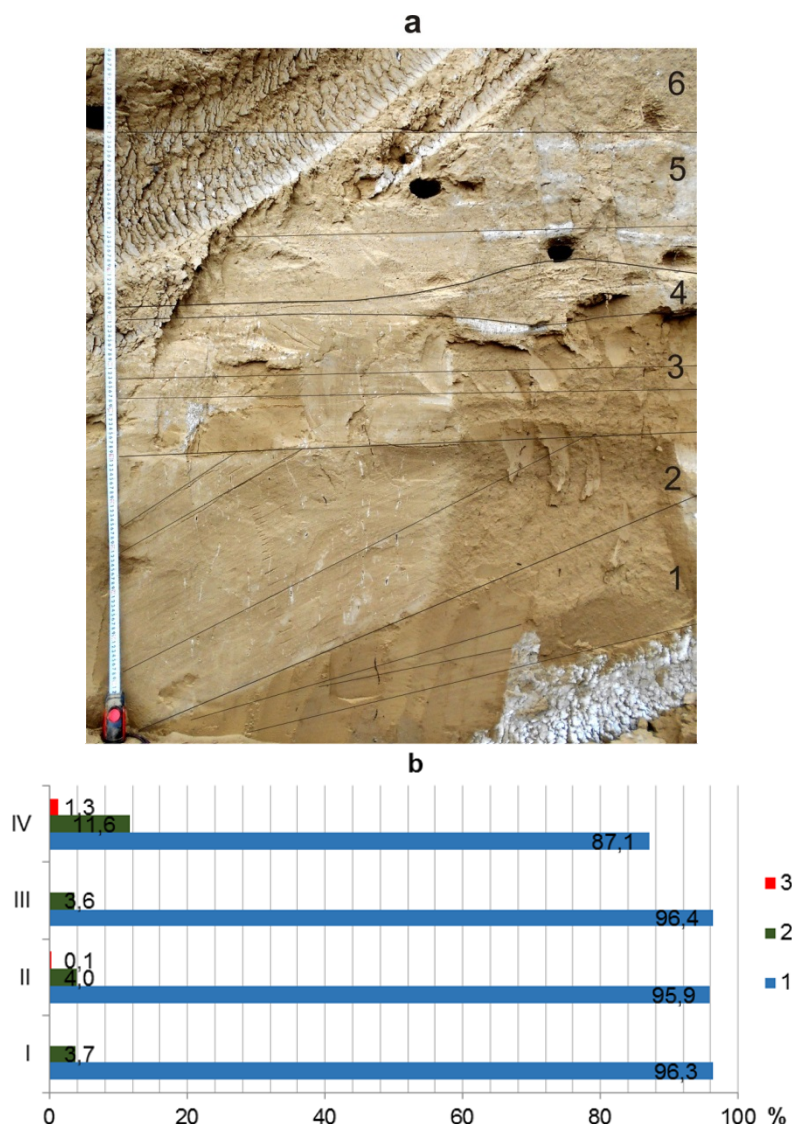


Рис. 3. Круглозерская гряда (азимут простирания гряды 65° СВ)

а – техногенный разрез общей мощностью 3 м, азимут стенки разреза – 355° С: 1–6 – номера пачек слоев. Вскрыты алевроитовые суглинки с карбонатным детритом фораминифер. Наблюдается характерная для эоловых отложений текстура конвергентной слоистости и стратиграфических несогласий; б – гранулометрический состав отложений гряды по фракциям: 1 – менее 0,25 мм; 2 – 0,25–0,5 мм; 3 – более 0,5 мм; I, II, III, IV – номера проб из 1–4 пачек слоев разреза соответственно

Fig. 3. Kruglozerskaya ridge (azimuth of the ridge course 65° NE)

а – man-made section with a total thickness of 3 m, azimuth of the section wall – 355° N: 1–6 – numbers of bands layers. It was uncovered aleurite loam with carbonate detritus of foraminifera. It is observed a texture of convergent stratification and stratigraphic displacements, characteristic of aeolian deposits; б – granulometric composition of ridge deposits by fractions: 1 – less than 0.25 mm; 2 – 0.25–0.5 mm; 3 – more than 0.5 mm; I, II, III, IV – sample numbers from 1–4 bands layers of section, respectively

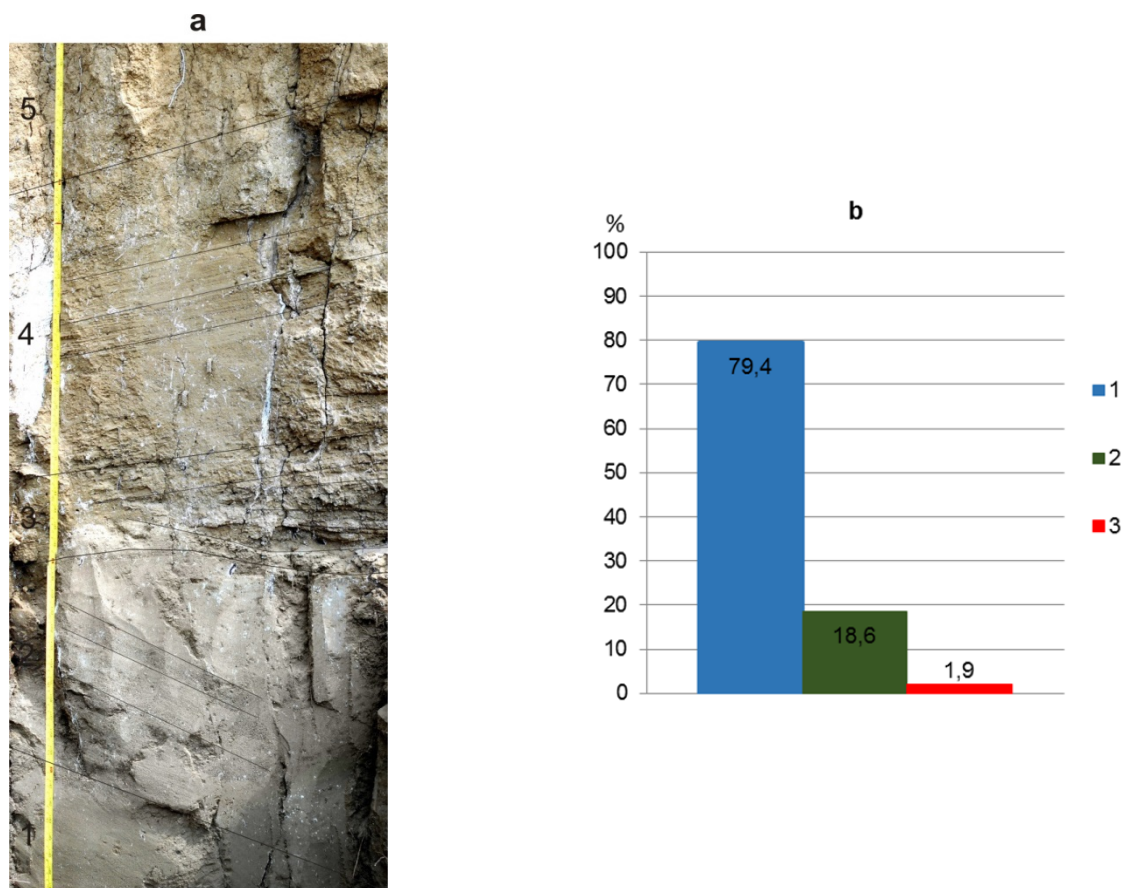


Рис. 4. Казанцевская гряда (азимут простирания гряды 64° СВ)

a – естественное обнажение абразивного клифа, азимут простирания стенки разреза 305° СЗ: 1–5 – номера пачек слоев. Отложения представлены алевроитовыми суглинками с большой примесью карбонатного детрита (различной размерности обломков фораминифер). Типичная (характерная) текстура конвергентной слоистости с меняющейся направленностью схождения: слои, сходящиеся к подошве с азимутом падения 110° ЮВ (пачка 2), сменяются слоями сходящимися к кровле с падением на север (пачки 3–5). Первая пачка – предполагаемое ядро гряды; *b* – гранулометрический состав отложений гряды по фракциям: 1 – менее 0,25 мм; 2 – 0,25–0,5 мм; 3 – более 0,5 мм

Fig. 4. Kazantsevskaya ridge (azimuth of the ridge course 64° NE)

a – natural outcrop of the abrasive cliff, azimuth of the outcrop wall 305° NW: 1–5 – numbers of bands layers. The deposits are represented by aleurite loams with a large admixture of carbonate detritus (of various sizes of fragments of foraminifera). It is typical (characteristic) texture of convergent stratification with a varying direction of convergence: layers converging to the foot with a dip azimuth of 110° SE (band 2) are replaced by layers converging to the roof with a fall to the north (bands 3–5). The first band is the estimated core of the ridge; *b* – granulometric composition of ridge deposits by fractions: 1 – less than 0.25 mm; 2 – 0.25–0.5 mm; 3 – more than 0.5 mm

Конвергентный характер слоистости (сходящиеся под острым углом слои) установлен во всех изучавшихся разрезах: Новоутовской (рис. 5), Казанцевской (рис. 4) и Зюзинской (рис. 6) гряд.

Облегающий тип текстуры с элементами слоистости самоуплотнения в начальной стадии эпигенеза. Установлена диагностически важная особенность слоистости отложений всех гряд – наблюдается облегающий (покровный) тип накопления осадков в заключительный период их формирования. К облегающему типу слоистости мы относим отложения с угловым несогласием, лежащие на осадках, составляющих «ядра» гряд. Облегающий тип текстуры слоистости повторяет форму подстилающего их базиса, т.е. согласно лежит на поверхности (автомодельно повторяет профиль рельефа), но резко несо-

гласно сечет слои нижележащих отложений в ядрах гряд. Все слои покровно-облегающего типа текстуры характеризуются высокой карбонатностью, наличием мелких обломков детрита фораминифер и морских лилий. Облегающий тип слоистости выражен в разрезах в разной мере, но в наибольшей он присутствует в разрезе отложений Волчьей гривы (с. Мамонтовое, см. рис. 7). Здесь ядро гряды не вскрыто техногенным разрезом.

Для рассматриваемого типа слоистости характерным является повсеместно наблюдаемое чередование слоев, отчетливо выраженное выцветами карбонатов. Возможно, карбонатизация связана с периодическим (сезонным) действием восходящих и нисходящих токов воды атмосферных осадков, растворявших раковинный детрит.

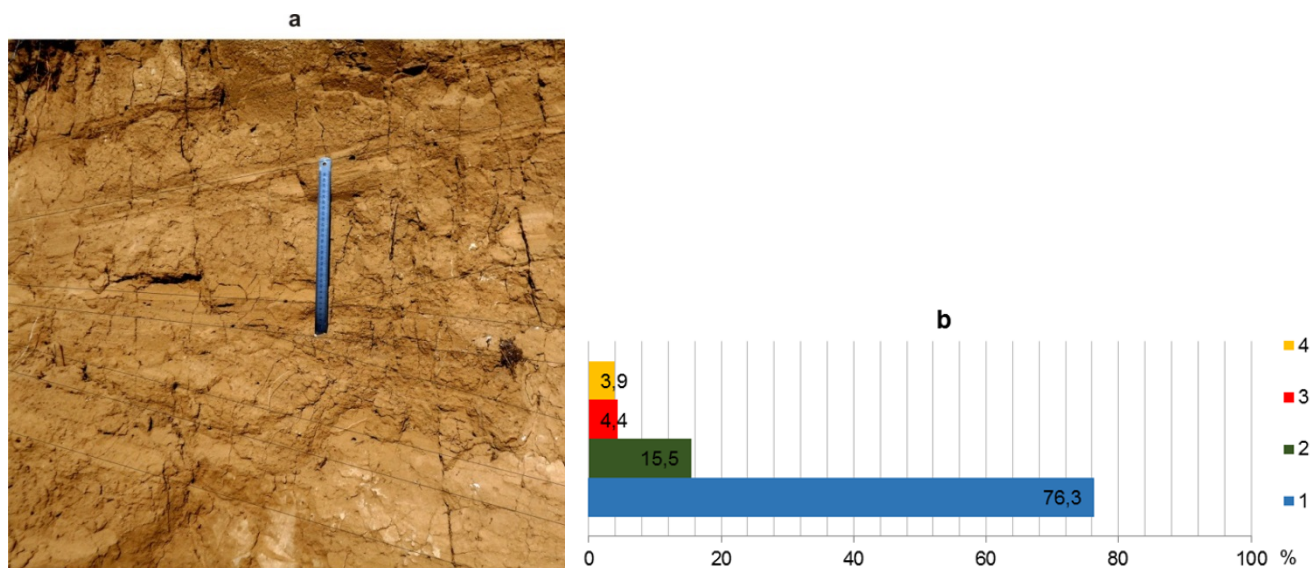


Рис. 5. Новогутовская гряда (азимут простирания гряды 64° СВ)

a – техногенный карьер, азимут простирания стенки разреза 110° ЮВ, глубина пачки слоев 1,5–2 м. Вскрыты пачки конвергентно-слоистых незакономерно переслаивающихся детритовых суглинков и супесей; *b* – гранулометрический состав отложений гряды по фракциям: 1 – менее 0,25 мм; 2 – 0,25–0,5 мм; 3 – 0,5–1 мм; 4 – более 1 мм

Fig. 5. Novogutovskaya ridge (azimuth of the ridge course 64° NE)

a – man-made quarry, the azimuth of the section wall course is 110° SE, the depth of the band layers is 1,5–2 m. It was uncovered packs of convergent-layered irregularly interbedded detrital loams and sandy loams; *b* – granulometric composition of ridge deposits by fractions: 1 – less than 0.25 mm; 2 – 0.25–0.5 mm; 3 – 0.5–1 mm; 4 – more than 1 mm

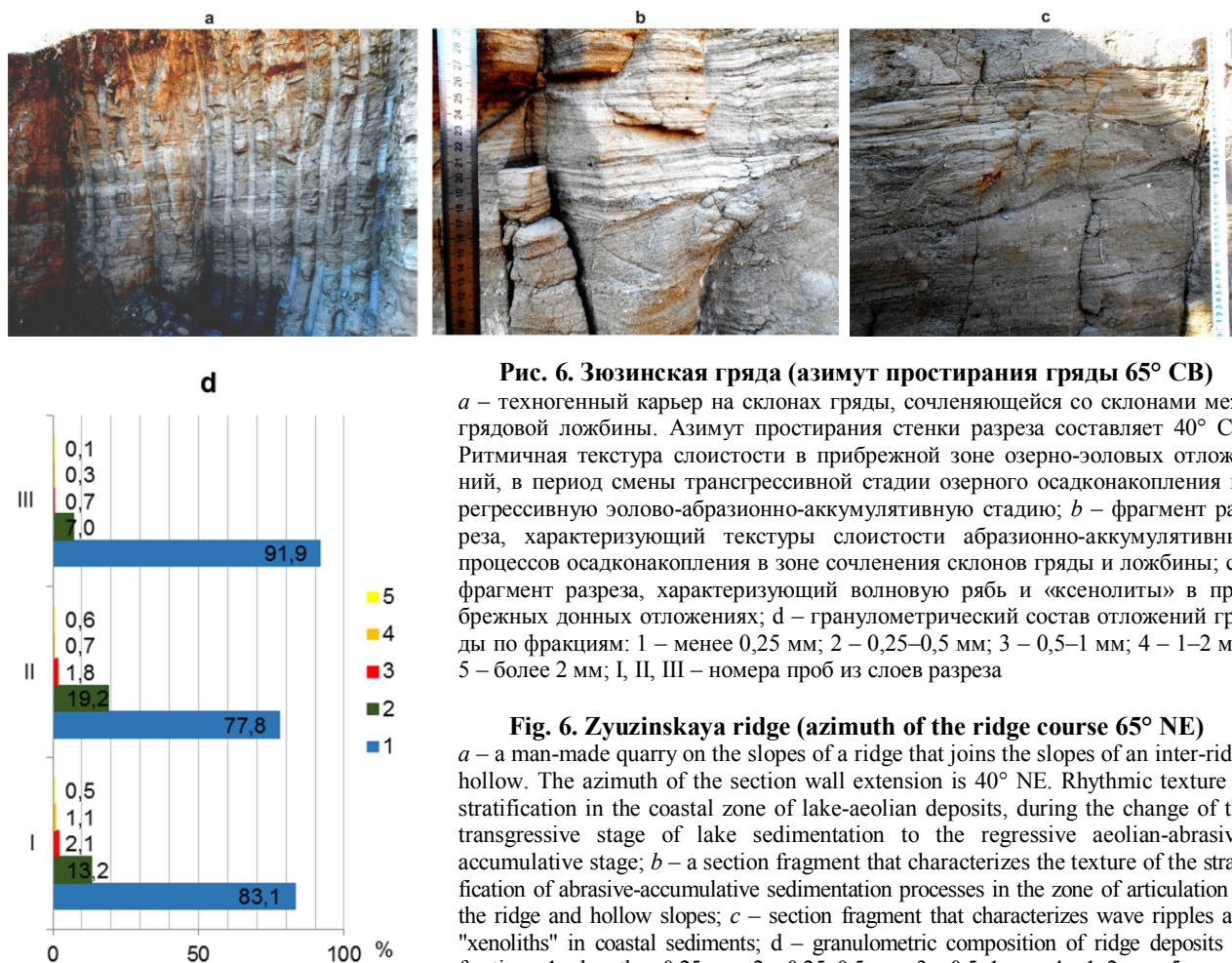


Рис. 6. Зюзинская гряда (азимут простирания гряды 65° СВ)

a – техногенный карьер на склонах гряды, сочленяющейся со склонами межгрядовой ложбины. Азимут простирания стенки разреза составляет 40° СВ. Ритмичная текстура слоистости в прибрежной зоне озерно-эоловых отложений, в период смены трансгрессивной стадии озерного осадконакопления на регрессивную эолово-абразионно-аккумулятивную стадию; *b* – фрагмент разреза, характеризующий текстуру слоистости абразионно-аккумулятивных процессов осадконакопления в зоне сочленения склонов гряды и ложбины; *c* – фрагмент разреза, характеризующий волновую рябь и «ксенолиты» в прибрежных донных отложениях; *d* – гранулометрический состав отложений гряды по фракциям: 1 – менее 0,25 мм; 2 – 0,25–0,5 мм; 3 – 0,5–1 мм; 4 – 1–2 мм; 5 – более 2 мм; I, II, III – номера проб из слоев разреза

Fig. 6. Zyuzinskaya ridge (azimuth of the ridge course 65° NE)

a – a man-made quarry on the slopes of a ridge that joins the slopes of an inter-ridge hollow. The azimuth of the section wall extension is 40° NE. Rhythmic texture of stratification in the coastal zone of lake-aeolian deposits, during the change of the transgressive stage of lake sedimentation to the regressive aeolian-abrasive-accumulative stage; *b* – a section fragment that characterizes the texture of the stratification of abrasive-accumulative sedimentation processes in the zone of articulation of the ridge and hollow slopes; *c* – section fragment that characterizes wave ripples and "xenoliths" in coastal sediments; *d* – granulometric composition of ridge deposits by fractions: 1 – less than 0.25 mm; 2 – 0.25–0.5 mm; 3 – 0.5–1 mm; 4 – 1–2 mm; 5 – more than 2 mm; I, II, III – sample numbers from the section layers

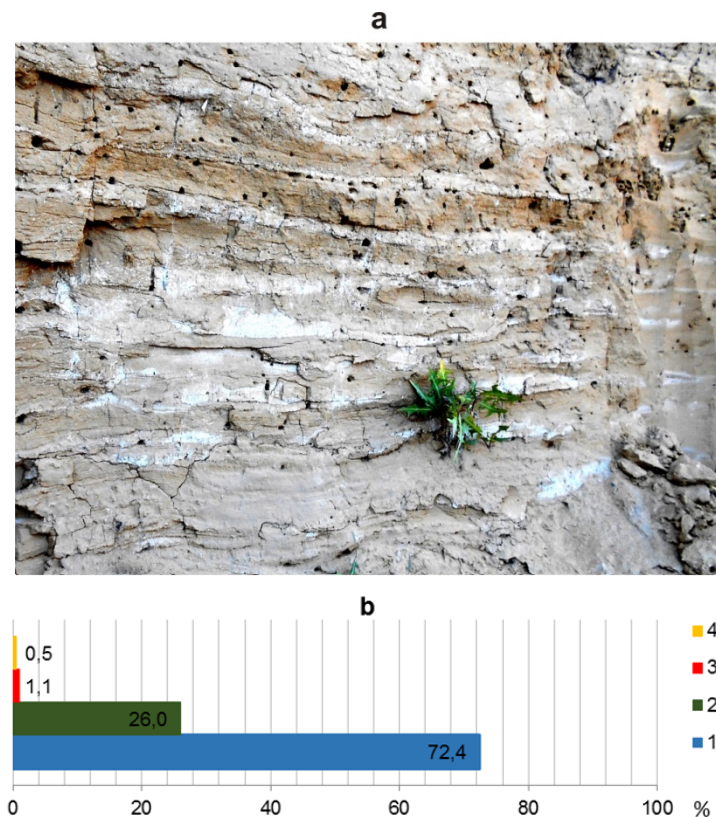


Рис. 7. Волчья гряда (с. Мамонтовое, азимут простирания гряды 58° СВ)

a – техногенный карьер, азимут простирания стенки разреза 75° СВ. Облегающий тип сезонно-ритмического (?) осадконакопления песчано-алевритовых карбонатно-детритовых отложений с элементами слоистости самоуплотнения. Отложения ядра гряды не вскрыты; *b* – гранулометрический состав отложений гряды по фракциям: 1 – менее 0,25 мм; 2 – 0,25–0,5 мм; 3 – 0,5–1 мм; 4 – более 1 мм.

Fig. 7. Volch'ya ridge (village Mamontovoe, azimuth of the ridge course 58° NE)

a – man-made quarry, azimuth of the section wall course 75° NE. Form-fitting type of seasonal-rhythmic (?) sedimentation of sand-aleurite carbonate-detritus deposits with self-sealing stratification elements. Deposits of the core of the ridge are not opened; *b* – granulometric composition of ridge deposits by fractions: 1 – less than 0.25 mm; 2 – 0.25–0.5 mm; 3 – 0.5–1 mm; 4 – more than 1 mm

Регрессивно-ритмичная текстура слоистости в зоне сочленения ложбинных озер со склонами гряд. Хорошо выраженная ритмичная слоистость установлена в разрезе отложений Зюзинской гряды (см. рис. 6). Важным диагностическим показателем является наклон ритмической абразионно-аккумулятивной толщи 5–7°, согласный с наклоном подножия гряды. Отчетливо выраженные песчаные валы ряби установлены на наклонной поверхности древней прибрежной отмели в разрезе отложений Зюзинской гряды. Данные обстоятельства (рябь, ксенолитоподобные включения и наклонная до 7° прибрежная отмель) свидетельствуют о том, что озерная трансгрессия осуществлялась в период после образования грядово-ложбинного рельефа.

Гранулометрический состав отложений. Согласно результатам гранулометрического анализа, в отложениях всех изучавшихся гряд алевритопелитовая фракция составляет 80–85 % (см. рис. 3–7). Такой размер частиц не характерен для отложе-

ний, формировавшихся в русловых потоках, как утверждалось в некоторых публикациях [Гроссвальд, 1999].

Минералогическая характеристика отложений. Результаты анализа согласуются с выводами американских ученых [Markewich et al., 2015] о крайне низком содержании в отложениях фракций тяжелых минералов: единичные зерна сидерита, турмалина, амфибола, пирита; очень редко ильменит, альмандин, пироксен. Преобладают хорошо окатанные зерна кварца, обломки карбонатов, пиритизированные обломки фораминифер из отложений морского генезиса и солоноватых водных бассейнов. Однако замечено увеличение тяжелых фракций в отложениях в краевых частях гряд, на границах сочленения их с озерными террасами, где существенно меняется и слоистость отложений – возникает ритмическая слоистость. Она обусловлена тем, что вследствие абразионного моделирования грядовых форм в период озерных (возможно, и Мансийского моря) транс-

грессий происходило удаление пелитово-алевритопесчаных фракций, обусловившее повышение концентрации тяжелых минералов. Особенно оно характерно для минералогического состава отложений Казанцевской гряды, где в отложениях, подвергшихся абразионной переработке, наблюдается повышенное содержание ильменита, граната, магнетита, циркона и пр.

Ксенолитоподобные вложения инородных отложений. В разрезах Казанцевской и Зюзинской гряд (см. рис. 4, 6) в прибрежных озерных осадках, в зоне сочленения их со склонами гряд, установлены замкнутые куски осадочных пород, поступавших из верхних приповерхностных горизонтов. Видимо, абразионный размыв сопровождался обваливанием подмываемых слоев грунта и последующим их замыванием (заиливанием), с характерным для этого процесса изменением слоистости перед инородным телом и за ним (см. рис. 6).

Генезис Чановско-Барабинского грядово-ложбинного геоморфолитогенетического комплекса – обсуждение

Механизм формирования грядово-ложбинного рельефа. По текстурно-структурным характеристикам гряд, их геоморфологическим особенностям («комплексные барханные гряды типа китовых спин» [Федорович, 1964, 1941]), по строгой выдержанности пространственной ориентировки с юго-запада на северо-восток (азимут 60–65°) и параллельности между собой, по значительной протяженности (от 5 до 100 км) гряды нами отнесены к категории линейных песчаных дюн, подобных *сейфовым* дюнным комплексам в Сахаре [Рединг и др., 1990].

Главной рельефообразующей силой выступали так называемые свободные турбулентные струйные потоки, в результате действия которых формировались ложбины выдувания; воздушными струями, направленными в стороны от оси ветровых потоков, где, как и следует из закономерностей динамики самоограничения свободных струй [Поздняков, 1986], скорость ветра убывала, происходила аккумуляция песка, дававшая начало образованию гряд. Поэтому формирование грядово-ложбинного морфолитогенетического комплекса нами характеризуется как самоорганизующийся автоматический процесс изоморфного развития парагенетически связанных эолово-аккумулятивных гряд и дефляционно-денудационных ложбин [Поздняков, 2020]. Это значит, что профиль в поперечном сечении гряд, изменяясь в пространственно-временных характеристиках, сохранял свои относительные морфометрические соотношения по форме (отношение приращенной высоты $\Delta h(t)$ гряд к половине их ширины $\Delta x(t)/2$) и содержанию (по текстуре слоистости от-

ложений и их гранулометрической и минералогической дифференциации).

Коррелятные отложения гряд характеризуются конвергентно-слоистой текстурой, представленной сочетанием расходящихся к кровле и подошве слоев – текстурой слоистости, типичной для эоловой аккумуляции. По-видимому, грядово-ложбинный комплекс Западно-Сибирской равнины, так же как и бэровских бугров, создан дефляцией и эоловой аккумуляцией с последующей моделировкой абразионно-аккумулятивными процессами.

Вывод о том, что «накопление коррелятных осадков шло в постоянно меняющейся водной обстановке» [Свиточ, Ключевиткина, 2004, 2007], противоречит как результатам нашего анализа, так и собственному фактическому материалу этих авторов. В описываемых ими разрезах коррелятных отложений гряд наблюдаются парагенетически связанные конвергентные текстуры – веером расходящиеся слои, направленные к кровле и к подошве толщи. Данный факт мы относим к числу важных диагностических признаков эоловой седиментации, характерной для эоловой аккумуляции на склонах автоматическо формирующихся гряд. Задокументированные (рис. 8) авторами поперечные разрезы с западной и восточной сторон гряды Дундук [Свиточ, Ключевиткина, 2004] характеризуют симметричность текстуры и косую слоистость конвергентного типа.

Можно согласиться с тем, что слагающие гряды осадки не принадлежат к отложениям только одной генетической группы. Нами это обстоятельство подтверждается. Действительно, изначально заложившиеся дефляционно-аккумулятивными процессами ориентированные песчаные гряды неоднократно подвергались абразионному и, возможно, последующему дефляционному их моделированию (см. рис. 6).

Постулировавшие М.Г. Гросвальдом и его единомышленниками [Гросвальд, 1999] идеи о грандиозных катастрофических паводках, формировавшихся в результате прорыва ледниковых плотин в пределах северной части Западно-Сибирской равнины, являются необоснованными. Нельзя согласиться и с возрожденной А.А. Свиточем идеи К. Бэра, согласно которой формирование грядово-ложбинного рельефа обуславливалось быстро протекавшей регрессией Каспийского моря. Изменение границ моря были опосредованной причиной формирования этого геоморфологического феномена. Она состояла в расширении границ арены развития экзогенных сил рельефообразования на освобождавшейся от затопления поверхности, сложенной песчаным и алевритопелитовым материалом.

Формирование ориентированного грядово-ложбинного рельефа – наблюдаемый в настоящее время процесс в семиаридных условиях юго-

западных районов Калмыкии (например, в районе сел Утта, Чапчачи, Нарын Худуг и др., рис. 9). Здесь современный рельеф представлен вытянутыми в юго-восточном направлении дюнами в соответствии с преобладающим направлением ветра. Для завер-

шения процесса формирования грядового рельефа недостает только увеличения влажности климата или возвратной трансгрессии Каспийского моря до абсолютной высоты – 5–10 м ниже уровня мирового океана.

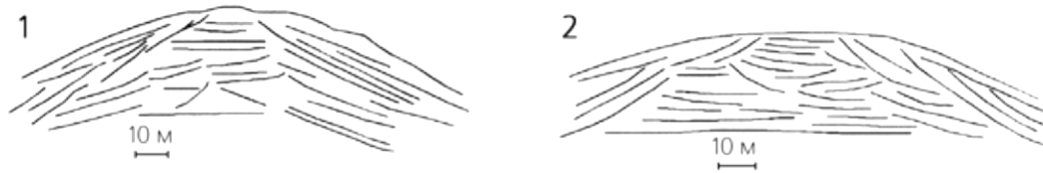


Рис. 8. Текстуры конвергентной слоистости в западной (1) и восточной (2) стенках поперечных разрезов бугра (гряды) Дундук по материалам [Свиточ, Ключевиткина, 2004, с. 35]
Fig. 8. Textures of convergent stratification in the Western (1) and Eastern (2) walls of the cross-section mounds (ridges) Dunduk based on materials [Svitoch, Klyuvitkina, 2004, p. 35]

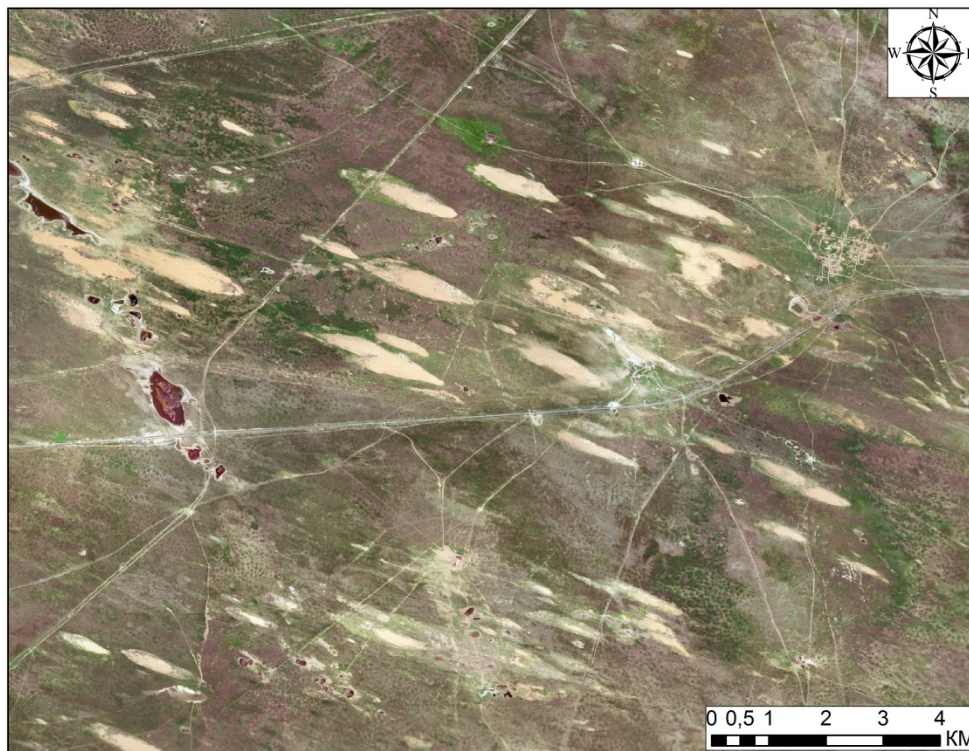


Рис. 9. Формирующиеся дюнные гряды в Калмыкии в южной зоне действия сильных ветров (будущие бэровские бугры, если влажность климата повысится и уровень Каспийского моря поднимется на 5–10 м). Протяженность дюнных гряд от нескольких сотен метров до 3 км

Fig. 9. Forming dune ridges in Kalmykia in the southern zone of strong winds (future Baer knolls, if the humidity of the climate increases and the level of the Caspian sea rises by 5–10 m). The length of the dune ridges ranges from several hundred meters to 3 km

На территории Западно-Сибирской низменности условия для формирования грядово-ложбинного рельефа появились 11–10 тыс. л. н., когда после регрессии моря началось [Величко, Тимирева, 2005] криоаридное опустынивание и развитие дефляционно-аккумулятивных процессов по прикаспийскому типу. Следы криоаридной эпохи недавно установле-

ны и в различных частях в Восточной Сибири [Галанин, 2018]. По мнению А.А. Галанина, эоловые формы рельефа различной морфоскульптурной модификации имеют распространение на более чем 60% территории центральной части Якутии (ориентированный грядово-ложбинный эоловый рельеф на водораздельных поверхностях рек Лены и Вилюя и

др.), где, по результатам исследования автора, процесс активной дефляционно-аккумулятивной деятельности закончился 10–12 тыс. лет назад.

Можно полагать, что образование протяженных лениаментноподобных ленточных гряд в Южной Сибири (Барабинская равнина и бэровские бугры в Прикаспийской низменности и Калмыкии) и в США (гряды Южной Каролины) и др., является следствием релаксации геосистем, интегрально характеризующей изменения климата в течение голоцена.

Согласно нашей гипотезе [Поздняков, 2015], причиной явился взрыв над акваторией Северного Ледовитого океана космического тела и образование сферически расходящихся волн. Алгоритм последующих событий укладывается в два динамических режима: 1) режим катастрофически быстрого изменения существовавшего ранее (14–13 тыс. л. н.) геоморфологического базиса и геоэкологического состояния, заложивших новые начальные условия формирования, трансформации экологических систем и составляющих их экотон; 2) режим релаксации, характеризующийся потеплением климата, формированием и развитием морфоскульптуры, направляющей геосистемы к асимптотически устойчивому состоянию. Он наблюдался в течение голоцена, продолжается в настоящее время и прогнозируется в будущем, если существенно не изменятся условия среды.

Процессы релаксации в природных явлениях относятся к числу самоорганизующихся и выражаются

в восстановлении нарушенных функциональных связей в новых условиях среды. В отличие от релаксации в контролируемых физических системах, в природе она является необратимой.

Тематически наше исследование согласуется с исследованиями ученых США, ведущими поиски связей в изменениях природной среды с космическим ударным воздействием, произошедшим около 13 тыс. л. н. на территории Северной Америки [Wolbach et al., 2018].

Краткий обзор мнений по определению генезиса широко распространенного на территории России и других регионах Земли грядово-ложбинного комплекса представляет убедительное доказательство несостоятельности применения для этих целей гомоморфологических методов. С позиций изоморфизма [Поздняков, 2020] полагается, что совершенно необходимо исследовать структуры причинно-следственных связей во взаимодействующих силах, организующих формы рельефа, и нельзя судить о генезисе рельефа лишь по внешнему выражению его форм, которые могут быть подобными (гомоморфными), но различными по генезису.

Работа выполнена согласно государственному заданию № 0369-2019-0005 – «Быстропротекающие природные процессы с насыщением, обусловленные климатическими изменениями и антропогенным воздействием (на примерах модельных районов Западной Сибири и Алтая)».

ЛИТЕРАТУРА

- Бейзель А.Л. Новые данные к разработке модели формирования гривного рельефа юга Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь : XIV Междунар. науч. конгресса. 2018. Т. 2. С. 92–96. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-2-92-96
- Бейзель А.Л., Соболев Е.С., Ян П.А. Новые данные по проблеме происхождения гривного рельефа юга Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь : XV Междунар. науч. конгресса. 2019. Т. 2, № 1. С. 3–9. DOI: 2618-981X-2019-2-1-3-9
- Белецкая Н.П. Морфология и морфометрия гривного рельефа // История развития речных долин и проблемы мелиорации земель. Западная Сибирь и Средняя Азия. Новосибирск : Наука, 1979. С. 148–156.
- Николаев В.А., Пилькевич И.В., Пучкова Д.В. Природа гривного рельефа южных равнин Западной Сибири // История развития речных долин и проблемы мелиорации земель. Западная Сибирь и Средняя Азия. Новосибирск : Наука, 1979. С. 166–178.
- Величко А.А., Тимирева С.Н. Западная Сибирь – великая позднеледниковая пустыня // Природа. 2005. № 5. С. 54–63.
- Волков И.А. Роль эолового фактора в эволюции рельефа // Проблемы экзогенного рельефообразования. М. : Наука, 1976. С. 264–288.
- Волков И.А. Позднелазарский (сарганский) покров лёссов, лёссовидных суглинков и эоловых песков // Палеогеография Западно-Сибирской равнины в максимум позднеплейстоценового оледенения. Новосибирск : Наука, 1980. С. 66–73.
- Волков И.А. Плейстоценовая субэоловая толща и динамика природной среды (на примере Западной Сибири) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 4. С. 364–372.
- Галанин А.А. Эоловый рельеф холодных регионов Восточной Сибири: вопросы генезиса и классификации // XXXVI Пленум геоморфологической комиссии РАН. Барнаул : Изд-во Алт. госуниверситета, 2018. С. 95–102.
- Гросвальд М.Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. М. : Научный мир, 1999. 120 с.
- Казьмин С.П., Волков И.А. Характер природных процессов в азиатской части России во время последней ледниковой стадии // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 5–10.
- Леонтьев О.К., Фотеева Н.Н. Происхождение и возраст бэровских бугров // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1965. № 2. С. 90–97.
- Поздняков А.В. Динамическое равновесие в рельефообразовании. М. : Наука, 1986. 207 с.
- Поздняков А.В. Возможные причины резкого изменения климата и деградации мамонтового фаунистического комплекса в неоплейстоцене // Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов: Т. I: Естественные науки. Ховд; Томск, 2015. С. 121–126.

Поздняков А.В. Рельеф Западно-Сибирской равнины: взгляд через призму гомоморфизма и изоморфизма // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке». Томск : Изд-во Том. ун-та, 2020. С. 50–53.

Рединг Х.Г., Коллинсон Дж.Д., Аллен Ф.А. и др. Обстановки осадконакопления и фации. М. : Мир, 1990. 352 с.

Свиточ А.А., Клювиткина Т.С. Бэровские бугры – загадка Северного Прикаспия // Природа. 2004. № 2 (1062). С. 32–38.

Свиточ А.А., Клювиткина Т.С. К вопросу о происхождении Бэровских бугров Северного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13, № 33–34. С. 24–39.

Федорович Б.А. Происхождение «бэровских бугров» Прикаспия // Известия АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1941. № 1. С. 95–116.

Федорович Б.А. Развитие и преобразование географической среды. М. : Наука, 1964. 238 с.

Фиалков Д.Н. Грядовые формы рельефа Западно-Сибирской низменности. Омск : Зап.-Сиб. книж. изд-во, 1964. 59 с.

Фиалков Д.Н. К вопросу о происхождении грядовых форм рельефа юга Западно-Сибирской низменности // Проблемы геоморфологии и неотектоники платформенных областей Сибири. Новосибирск : Наука, 1970. С. 112–117.

Baldauf P.E., Burkhardt P.A., Hanson P.R., Miles M., Larsen A. Chronology of dune development in the White River Badlands, northern Great Plains, USA // Aeolian Research. 2019. V. 37. P. 14–24.

Bowen M.W., Johnson W.C., King D.A. Spatial distribution and geomorphology of lunette dunes on the High Plains of Western Kansas: implications for geoarchaeological and paleoenvironmental research // Physical Geography. 2018. V. 39 (1). P. 21–37. DOI: 10.1080/02723646.2017.1319683

Gaylord D.R., Sweeney M.R., Busacca A.J. Geomorphic development of a late Quaternary paired eolian sequence, Columbia Plateau, Washington // Geological Society of America Abstracts with Programs. 2002. V. 34 (6). P. 245.

Iannicelli M. Devon island's oriented landforms as an analog to Illinois-type Paha // Polar Geography. 2003. V. 27 (4). P. 339–350. DOI: 10.1080/789610227

Iannicelli M. Evolution of the Driftless Area and Contiguous Regions of Midwestern USA Through Pleistocene Periglacial Processes // The Open Geology Journal. 2010. V. 4. P. 35–54. DOI: 10.2174/1874262901004010035

Markewich H.W., Markewich W. An overview of Pleistocene and Holocene inland dunes in Georgia and the Carolinas: morphology, distribution, age, and paleoclimate // U.S. Geological Survey Bulletin. 1994. V. 2069. 32 p. DOI: 10.3133/b2069

Markewich H.W., Litwin R.J., Wysocki D.A., Pavich M.J. Synthesis on Quaternary aeolian research in the unglaciated eastern United States // Aeolian Research. 2015. V. 17. P. 139–191.

Prior J.C. Landforms of Iowa. Iowa City : University of Iowa Press, 1991. 153 p. DOI: 10.17077/0003-4827.11051

Scholtes W.H. Properties and classification of the paha loess-derived soils in northeastern Iowa. Retrospective Theses and Dissertations. 1951. 171 p.

Wolbach W.S. et al. Extraordinary Biomass-Burning Episode and Impact Winter Triggered by the Younger Dryas Cosmic Impact ~12,800 Years Ago. 1. Ice Cores and Glaciers // The Journal of Geology. 2018. V. 126. P. 165–184. DOI: 10.1086/695703

Авторы:

Поздняков Александр Васильевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: synergeia.pol@gmail.com

Пучкин Алексей Васильевич, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: burabay@mail.ru

Пупышев Юрий Сергеевич, аспирант, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: pupyshev95@mail.ru

Фузелла Татьяна Шалвовна, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: fts10@yandex.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 42–57. DOI: 10.17223/25421379/17/4

A.V. Pozdnyakov^{1,2}, A.V. Puchkin^{1,2}, Yu.S. Pupyshev¹, T.Sh. Fuzella¹

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

GENESIS OF THE RIDGE-HOLLOW RELIEF OF THE WEST SIBERIAN PLAIN

To determine the genesis of the ridge-hollow complex, a study was made of the texture of the bedding and structure of sediments, the granulometric and mineralogical composition of five technogenic sections and one natural geological outcrop. The following types of texture of layering were distinguished: textures of convergent layering and stratigraphic disagreements; regressive-rhythmic texture of layering in the zone of articulation of the hollow lakes with the slopes of the ridges; a tight-fitting type of texture with elements of self-compaction layering in the initial stage of epigenesis.

In the sediments of ridges, the silt-pelite fraction is 80–85 %, and the mineralogical composition is characterized by an extremely low content of fractions of heavy minerals: single grains of siderite, tourmaline, amphibole, pyrite; very rarely ilmenite, almandine, pyroxene. Well rounded quartz grains, fragments of carbonates, and pyritized fragments of foraminifera predominate. Nevertheless, an increase in heavy fractions (pyrite, magnetite, ilmenite, almandine, zircon, etc.) was noted in the sediments of the ridges at the borders of their junction with lake terraces. Apparently, this is due to an increase in the concentration of heavy minerals due to abrasion modeling

of ridges during the period of lake transgressions, accompanied by the removal of pelitic-silty-sand fractions. In the texture of the stratification of coastal lake sediments, bottom ripples and xenolith-like inclusions are established, which indicate that lake transgression was carried out in the period after the formation of the ridge-valley relief.

According to the textural, structural and geomorphological features of the ridges, the strict consistency of their orientation and the regular increase in the height of the watershed surface of the ridges in the northeast (60–65 °) direction to their end; coordinated parallelism and length from 5 to 100 km, the ridges are classified as linear sand dunes, similar to the safe dunes of Central Asia and the Sahara. The main relief-forming force was free turbulent jet flows, which formed blowing troughs and wind gradients directed to the slopes of the trenches that bound them. At the edges of the hollows, where, according to the laws of dynamics of self-limitation of free jets, the wind speed decreased and sand accumulated, giving rise to the formation of ridges.

The formation of a ridge-hollow complex is presented as a self-organizing self-similar process of isomorphic development of paragenetically related aeolian-accumulative ridges and deflation-denudation hollows.

The idea posed by M.G. Grosvald and his like-minded people about the grand catastrophic floods resulting from the breakthrough of glacial dams within the northern part of the West Siberian Plain is unfounded. The formation of the ridge-hollow complex apparently occurred at the borders of the Pleistocene and Holocene and was predetermined by a sharp change in the ecological situation (and climate), which caused the total destruction of the vegetation cover (and wildlife) and the exposure of sea and lake sand and pelitic strata, which became the arena for the development of aeolian processes.

Keywords: *Holocene history, ridge-hollow relief, texture, structure, convergent stratification, sandy desert.*

References

- Beyzel' A.L. *Novye dannye k razrabotke modeli formirovaniya grivnogo rel'efa yuga Zapadnoy Sibiri* [New data for the development of a model for the formation of the ridge relief in the South of Western Siberia] // *Interespo GEO-Sibir': XIV Mezhdunar. nauch. kongr.* 2018. T.2. pp. 92–96. In Russian. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-2-92-96
- Beyzel' A.L., Sobolev E.S., Yan P.A. *Novye dannye po probleme proiskhozhdeniya grivnogo rel'efa yuga Zapadnoy Sibiri* [New data on the problem of the origin of the ridge relief in the South of Western Siberia] // *Interespo GEO-Sibir': XV Mezhdunar. nauch. kongr.* 2019. T.2. No 1. pp. 3–9. In Russian. DOI: 2618-981X-2019-2-1-3-9
- Beletskaya N.P. *Morfologiya i morfometriya grivnogo rel'efa* [Morphology and morphometry of the ridge relief] // *Istoriya razvitiya rechnykh dolin i problemy melioratsii zemel'. Zapadnaya Sibir' i Srednyaya Aziya.* Novosibirsk: Nauka. 1979. pp. 148–156. In Russian.
- Nikolaev V.A., Pil'kevich I.V., Puchkova D.V. *Priroda grivnogo rel'efa yuzhnykh ravnin Zapadnoy Sibiri* [Nature of the ridge relief of the southern plains of Western Siberia] // *Istoriya razvitiya rechnykh dolin i problemy melioratsii zemel'. Zapadnaya Sibir' i Srednyaya Aziya.* Novosibirsk: Nauka. 1979. pp. 166–178. In Russian.
- Velichko A.A., Timireva S.N. *Zapadnaya Sibir' – velikaya pozdnelednikovaya pustynya* [Western Siberia – the great late glacial desert] // *Priroda.* Moscow: Nauka. 2005. №5. pp. 54–63. In Russian.
- Volkov I.A. *Rol' eolovogo faktora v evolyutsii rel'efa* [The role of the aeolian factor in the evolution of the relief] // *Problemy ekzogenogo rel'efoobrazovaniya.* Moscow: Nauka. 1976. pp. 264–288. In Russian.
- Volkov I.A. *Pozdnezryanskiy (sartanskiy) pokrov lessov, lessovidnykh suglinkov i eolovykh peskov* [Later Zyryansky (Sartan) cover of loess, loess-like loam and aeolian sands] // *Paleogeografiya Zapadno-Sibirskoy ravniny v maksimum pozdnezryanskogo oledeneniya.* Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie. 1980. pp. 66–73. In Russian.
- Volkov I.A. *Pleistotsenovaya subaeral'naya tolshcha i dinamika prirodnoy sredy (na primere Zapadnoy Sibiri)* [Pleistocene subaerial strata and dynamics of the natural environment (on the example of Western Siberia)] // *Russian Geology and Geophysics.* 2003. T. 44. No 4. pp. 364–372. In Russian.
- Galanin A.A. *Eolovyy rel'ef kholodnykh regionov Vostochnoy Sibiri: voprosy genezisa i klassifikatsii* [Aeolian relief of cold regions of Eastern Siberia: questions of genesis and classification] // XXXVI Plenum geomorfologicheskoy komissii RAN. Barnaul: Izd-vo Altayskogo gosuniversiteta, 2018. pp. 95–102. In Russian.
- Grosval'd M. G. *Evrasiyskie gidrosfernye katastrofy i oledenenie Arktiki* [Eurasian hydrospheric catastrophes and the Arctic glaciation]. Moscow : Nauchnyy mir, 1999. 120 p. In Russian.
- Kaz'min S.P., Volkov I.A. *Kharakter prirodnnykh protsessov v aziatskoy chasti Rossii vo vremya posledney lednikovoy stadii* [The character of the natural processes in the Asian part of Russia during the last glacial stage] // *Geography and Natural Resources.* 2010. No 3. pp. 5–10. In Russian.
- Leont'ev O.K., Foteeva N.N. *Proiskhozhdenie i vozrast berovskikh bugrov* [The origin and age of the Baer knolls] // *Izvestiya AN SSSR. Ser. geogr.* 1965. No 2. pp. 90–97. In Russian.
- Pozdnyakov A.V. *Dinamicheskoe ravновесие v rel'efoobrazovanii* [Dynamic equilibrium in relief formation]. Moscow : Nauka. 1986. 207 p. In Russian.
- Pozdnyakov A.V. *Vozможные причины резкого изменения климата и деградации мамонтового фаунистического комплекса в neopleistocene* [Possible causes of abrupt climate change and degradation of the mammoth faunal complex in the Neopleistocene] // *Prirodnye usloviya, istoriya i kul'tura Zapadnoy Mongolii i sopredel'nykh regionov:* T.I: Estestv. nauki. Khovd, Tomsk. 2015. pp. 121–126. In Russian.
- Pozdnyakov A.V. *Rel'ef Zapadno-Sibirskoy ravniny: vzglyad cherez prizmu gomomorfizma i izomorfizma* [The relief of the West Siberian Plain: a view through the prism of homomorphism and isomorphism] // *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Geomorfologiya i fizicheskaya geografiya Sibiri v XXI veke.* Tomsk: Izd-vo TGU. 2020. pp. 50–53. In Russian.
- Reding X. G., Kollinson Dzh. D., Allen F. A. et al. *Obstanovki osadkonakopleniya i fatsii* [Sedimentation conditions and facies]. Moscow : Mir, 1990. 352 p. In Russian.
- Svitoch A.A., Klyuvitkina T.S. *Berovskie bugry – zagadka Severnogo Prikaspiya* [Baie Hillocks: An Enigma of the Northern Peri-Caspian Area] // *Priroda.* 2004. No 2 (1062). pp. 32–38. In Russian.
- Svitoch A.A., Klyuvitkina T.S. *K voprosu o proiskhozhdenii Berovskikh bugrov Severnogo Prikaspiya* [To the question of the origin of Baer knolls from the Northern Caspian region] // *Aridnye ekosistemy.* 2007. T. 13. No 33–34. pp. 24–39. In Russian.
- Fedorovich B.A. *Proiskhozhdenie "berovskikh bugrov" Prikaspiya* [The origin of the Baer knolls of the Peri-Caspian Area] // *Izvestiya AN SSSR, Ser. geogr. i geofiz.* 1941. No 1. pp. 95–116. In Russian.

Fedorovich B.A. *Razvitie i preobrazovanie geograficheskoy sredy* [Development and transformation of the geographical environment]. M.: Nauka, 1964. 238 p. In Russian.

Fialkov D.N. *Gryadovye formy rel'efa Zapadno-Sibirskoy nizmennosti* [Ridge landforms of the West Siberian lowland]. Omsk: Zapadnosibirskoe knizhnoe izd-vo. 1964. 59 p. In Russian.

Fialkov D.N. *K voprosu o proiskhozhdenii gryadovykh form rel'efa yuga Zapadno-Sibirskoy nizmennosti* [On the origin of ridge landforms in the South of the West Siberian lowland] // Problemy geomorfologii i neotektoniki platformnykh oblastey Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1970. pp. 112–117. In Russian.

Baldauf P.E., Burkhart P.A., Hanson P.R., Miles M., Larsen A. Chronology of dune development in the White River Badlands, northern Great Plains, USA // *Aeolian Research* 37. 2019. pp. 14–24.

Bowen M.W., Johnson W.C., King D.A. Spatial distribution and geomorphology of lunette dunes on the High Plains of Western Kansas: implications for geochronological and paleoenvironmental research // *Physical Geography*. 2018. V. 39(1). pp. 21–37. DOI: 10.1080/02723646.2017.1319683

Gaylord D.R., Sweeney M.R., Busacca A.J. Geomorphic development of a late Quaternary paired eolian sequence, Columbia Plateau, Washington // *Geological Society of America Abstracts with Programs*. 2002. V. 34(6). p. 245.

Iannicelli M. Devon island's oriented landforms as an analog to Illinois-type Paha // *Polar Geography*. 2003. V. 27(4). pp. 339–350. DOI:10.1080/789610227

Iannicelli M. Evolution of the Driftless Area and Contiguous Regions of Midwestern USA Through Pleistocene Periglacial Processes // *The Open Geology Journal*. 2010. V. 4. pp. 35–54. DOI:10.2174/1874262901004010035.

Markewich, H. W., Markewich W. An overview of Pleistocene and Holocene inland dunes in Georgia and the Carolinas: morphology, distribution, age, and paleoclimate // *U.S. Geological Survey Bulletin* 2069. 1994. 32 p. <https://doi.org/10.3133/b2069>

Markewich H. W., Litwin R. J., Wysocki D. A., Pavich M. J. Synthesis on Quaternary aeolian research in the unglaciated eastern United States. *Aeolian Research*. 2015. V. 17. pp. 139–191.

Prior J.C. Landforms of Iowa. Iowa City: University of Iowa Press, 1991. 153 p. doi.org/10.17077/0003-4827.11051

Scholtes W.H. Properties and classification of the paha loess-derived soils in northeastern Iowa. *Retrospective Theses and Dissertations*. 1951. 171 p.

Wolbach W.S., et al. Extraordinary Biomass-Burning Episode and Impact Winter Triggered by the Younger Dryas Cosmic Impact ~12,800 Years Ago. 1. Ice Cores and Glaciers // *The Journal of Geology* 126. 2018. V. 2. pp. 165–184. DOI: 10.1086/695703

Author's:

Pozdnyakov Alexander V., Dr. Sci. (Geography), Chief Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: synergeia.pol@gmail.com

Puchkin Alexey V., Cand. Sci. (Geography), Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: burabay@mail.ru

Pupyshev Yury S., graduate student, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: pupyshev95@mail.ru

Fusella Tatiana Sh., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: fts10@yandex.ru

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 550.4:546.79(571.53)

ИСТОЧНИКИ УРАНА, ТОРИЯ И СЕРЫ В СНЕГОВОЙ ВОДЕ ИРКУТСКО-АНГАРСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ (ПРИБАЙКАЛЬЕ)

В.И. Гребенщикова, П.П. Грицко



Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Результаты геохимического мониторинга распределения радионуклидов (U, Th) и S в снеговой воде Прибайкалья на территориях двух крупных промышленных городов – Иркутска, Ангарска и их окрестностей показали, что содержания рассмотренных элементов характеризуются незначительной вариабильностью, но часто превышают как региональный фон Байкальского региона, так и локальный природный фон снеговой воды озера Байкал. Основным источником поступления изученных радионуклидов и серы является аэротехногенный перенос за счет эксплуатации в городах топливно-энергетических предприятий, печного отопления в частном жилом секторе и многочисленного автотранспорта. Ранее выявленные нами локальные «аномалии» повышенного содержания радионуклидов в почвах Иркутска и Ангарска аналогичны повышенным концентрациям радиоэлементов и серы в снеговой воде на территории городов. Установлено, что жилые территории рассмотренных городов испытывают более слабое влияние промышленных зон за счет обилия в городах зеленых насаждений, разграничивающих жилые и промышленные участки, которые способны аккумулировать поступающие в воздух токсиканты. Сравнительный анализ снеговой воды в ближайшем к Иркутску поселке Листвянка на берегу Байкала показал, что там также происходит увеличение загрязнения, обусловленного значительной и неконтролируемой туристической нагрузкой.

Ключевые слова: снеговая вода, уран, торий, сера, промышленные и жилые районы городов, техногенные источники, радионуклиды.

Важными информативными источниками эколого-геохимического состояния окружающей среды, аккумулирующими в себе все загрязнители, являются природные сорбенты – почвенный и снеговой покровы. Почвенный покров содержит широкую гамму химических элементов, в том числе радиоактивных элементов естественного и искусственного происхождения, так как представляет собой благоприятную среду для их поглощения. В почвах Прибайкалья содержания урана и тория изучены достаточно хорошо [Коваль и др., 2000; Кузнецов и др., 2013; Грицко, Гребенщикова, 2014; Гребенщикова и др., 2017; Chernyago et al., 2012;]. Многочисленные публикации по распределению токсичных элементов в городских почвах имеются по другим городам России [Alekseenko, Alekseenko, 2014; Artamonova, 2016] и мира [Batijargal et al., 2010; Charro et al., 2013; Cinelli et al., 2017].

Сведений о распределении радионуклидов в снеговом покрове промышленных городов Иркутской области получено недостаточно. Однако следует отметить, что почвы формируются продолжительное время и, соответственно, длительно накапливают токсичные элементы, а состав снега меняется каждый год в зависимости от выбросов различными предприятиями и только затем токсиканты могут поступать в почву и поверхностную воду. Поэтому снеговой покров может предоставлять информацию о возможном загрязнении

в настоящее время (в последние годы), что более достоверно позволит судить об источниках их поступления [Геохимия..., 2008; Гребенщикова, 2013; Таловская и др., 2016; Voutsas, Samara, 2002; Bozlaker et al., 2013; Grebenshchikova et al., 2017].

Однако и это не всегда возможно, так как зависит от ландшафтно-географического положения территории, направления и силы ветра и других причин. Согласно имеющимся данным [Павлова и др., 2015], среди элементов, изучаемых в снеговом покрове г. Благовещенска Амурской области, нет достаточно полной картины об источниках и путях распространения высокотоксичных элементов, к которым относятся также и радионуклиды.

В эколого-геохимическом мониторинге снеговой покров представляется более доступным и широко применяемым компонентом окружающей среды, химический состав которого свидетельствует в целом о ее состоянии. В Байкальском регионе снеговой покров накапливается в течение длительного периода (более 5 месяцев). Его геохимические особенности сохраняют информацию о происходящих химических изменениях в атмосфере за весь зимний период [Гребенщикова, 2013].

Снег выступает долговременным депонирующим компонентом и существенным информативным источником изучения природы аэротехногенных выпадений из атмосферы, аккумулирующим в себе в

зимний период все поллютанты, поступающие в атмосферу. Для снеговой воды и почвенного покрова нет данных по предельно допустимым концентрациям урана и тория, утвержденных санитарно-эпидемиологическими службами, поэтому при сравнении полученной информации учитываем региональные фоновые содержания радионуклидов и локальный (природный) фон в наиболее чистом районе озера Байкал, где нет промышленных предприятий и население постоянно не проживает.

Основная цель работы – изучение распределения содержаний радионуклидов (урана и тория), а также серы в пробах талой снеговой воды, отобранных на территориях наиболее крупных промышленных центров Прибайкалья – Иркутска, Ангарска и выявление возможных источников поступления поллютантов в снеговой покров исследуемых городов.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлась талая снеговая вода урбанизированных территорий крупных промышленных городов Иркутской области – Иркутска, Ангарска и их окружения, подверженных воздействию многопрофильных производственных предприятий.

Город Иркутск – областной центр Иркутской области, расположен на берегах рек Иркуты и Ангары, которая является единственным стоком озера Байкал (рис. 1). Самыми крупными производствами в городе являются авиационный завод и Ново-Иркутская ТЭЦ.

Город Ангарск расположен в 70 км на СЗ от Иркутска, в междуречье Ангары и Китоя. По сравнению с Иркутском, Ангарск относительно молодой город, в градостроительном плане которого изначально было предусмотрено разделение на промышленную и жилую зоны с сохранением между ними природной лесозащитной полосы (сосновый лес, парки и др.). Крупные промышленные предприятия города представлены нефтегазоперерабатывающими заводами, заводом по обогащению урана, а также несколькими крупными ТЭЦ, обслуживающими население и предприятия.

В настоящее время уровень загрязнения воздушного бассейна в городах Иркутск и Ангарск оценивается как очень высокий, причем по сравнению с 2017 г. степень загрязнения в г. Ангарске возросла [Государственный..., 2019]. Существенное влияние оказывают также природно-климатические факторы, препятствующие рассеиванию техногенных выбросов на территории исследуемых городов. В городах отмечаются низкие среднегодовые температуры воздуха, воды и почвы, длительный период промерзания компонентов окружающей среды, что может обуславливать пониженную возможность их к самоочищению от антропогенного воздействия.

Источники выбросов в атмосферу, главным образом, это крупные объекты энергетики, машиностроения и металлообработки, предприятия по производству строительных материалов, транспорта, жилищного хозяйства. Количество промышленных предприятий, в том числе и с вредным производством, в г. Ангарске существенно больше, чем в Иркутске. Здесь находятся электролизный химический комбинат по обогащению урана, многочисленные заводы: нефтеперерабатывающий, газовый, гипсовый, керамический, трубный, металлоконструкций и другие, а также несколько крупных ТЭЦ, которые вносят свой вклад в загрязнение города.

Дополнительную нагрузку на состояние объектов окружающей среды вносят мелкие котельные, функционирующие в городах, и жилой сектор с печным отоплением преимущественно в зимний сезон.

Стоит отметить, что больше всего загрязняющих веществ поступает в атмосферу от Ангарских и Ново-Иркутской ТЭЦ – 84 % от выбросов всех ТЭЦ, причем ингредиентная структура выбросов характеризуется преобладанием оксидов серы [Майсюк, 2017; Санеев, Майсюк, 2018], а также, по нашим данным, используемый уголь Иркутского угольного бассейна отличается относительно повышенными содержаниями радионуклидов [Гребенщикова и др., 2017]. Случаи превышения максимальной разовой предельно допустимой концентрации диоксида серы были отмечены в обоих городах [Государственный..., 2019].

Снеговая геохимическая съемка на территории городов Иркутска и Ангарска проводилась в течение 4 лет в конце февраля – начале марта, в конце сезона устойчивого снежного покрова перед началом снеготаяния. Опробование выполнялось по редкой сети примерно 1:100 000 (1 × 1 км) и определялось интенсивностью жилой и промышленной застройки на городских территориях.

Пробы снега отбирались на выбранной открытой площадке. Размер лунок от 30 × 30 см до 70 × 70 см, в зависимости от глубины слоя снега. При этом особое внимание обращалось на отбор слоев снега у земной поверхности, с целью исключения миграции различных веществ из почвенного и растительного покрова и их влияния на химический состав снега. В ряде случаев нижний слой от 5–10 до 15 см по этой причине не отбирался. Вес пробы составлял 10–15 кг. Доставленные пробы до обработки хранились при температуре ниже 0 °С. Для таяния снега пробу на ночь помещали в лаборатории в прозрачные полиэтиленовые ведра. Сразу отделялся твердый осадок от водной фазы, чтобы свести к минимуму процесс растворения техногенной пыли. В городе Иркутске выполнен химический анализ 34 проб снеговой воды, в Ангарске – 40 проб (таблица).

Вариации содержания U, Th и S в снеговой воде Иркутска и Ангарска и окружающих территорий, мкг/дм³

Variations of U, Th and S content in snow water of Irkutsk and Angarsk cities and adjacent territories, µg / L

Объект	Количество проб	U	Th	S
		<u>min-max</u> среднее	<u>min-max</u> среднее	<u>min-max</u> среднее
г. Иркутск	34	<u><0,05–0,35</u> 0,05	<u><0,01–0,16</u> 0,02	<u>800–16 000</u> 3 774
г. Ангарск	40	<u><0,05–0,50</u> 0,09	<u><0,001–0,04</u> 0,01	<u>800–9 007</u> 3 686
Байкальский локальный природный фон [Гребенщикова и др., 2017]	4	0,02	0,01	1 000
Берег Байкала (пос. Листвянка) в 2018 г.	12	<u>0,01–0,03</u> 0,02	<u>0,0004–0,005</u> 0,003	<u>888–1 999</u> 1 285
Берег Байкала (пос. Листвянка) в 2019 г.	12	<u>0,02–0,10</u> 0,04	<u>0,001–0,10</u> 0,01	<u>1 262–3 395</u> 2 562

Работа выполнена с использованием научного оборудования, аккредитованного ЦКП изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН. Анализ снеговой воды выполнялся на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Element 2 фирмы Finnigan MAT (США) (аналитик О.В. Зарубина).

Результаты исследования и обсуждение

Как уже было отмечено, наиболее существенное воздействие на окружающую среду в Иркутской области оказывают предприятия топливно-энергетического комплекса: ТЭЦ, ГРЭС, котельные различной мощности, добывающие, перерабатывающие предприятия (уголь, нефть, газ и др.) и огромное количество автотранспорта при отсутствии метро. Поскольку такие предприятия расположены на территории городов или рядом, то загрязнение атмосферных осадков в дальнейшем сказывается на состоянии атмосферного воздуха, почвенного, снегового и растительного покровов, что существенным образом оказывает влияние на здоровье человека городских территорий Прибайкалья. С учетом данных по химическому составу компонентов окружающей среды был рассчитан агрегированный (ингаляционный и пероральный) риск для здоровья населения городов и сельских районов Прибайкалья. Установлено, что ингаляционный риск существенно выше перорального, т.е. токсиканты поступают в организм человека за счет атмосферного загрязнения. Также было показано, что для сельского населения агрегированный риск значительно меньше [Ефимова и др., 2016; Рукавишников и др., 2016]. Отмечается, что к числу приоритетных загрязнителей атмосферы в Прибайкалье относятся диоксиды серы и азота, бенз(а)пирен, формальдегид, тяжелые и радиоактивные металлы.

Минерализация снеговой воды в Иркутске изменяется незначительно, среднее значение 30 мг/дм³. Концентрация pH близка к нормальной и составляет 6,2–7,2. Максимальное значение минерализации, достигающее 300–500 мг/дм³, отмечено только ря-

дом с автозаправками, здесь также преобладают Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . На остальной территории города макрокомпонентный состав снеговой воды довольно однообразен.

Минерализация снеговых вод в Ангарске варьирует в более широких пределах – от 11 до 300 мг/л, средняя по городу – 44 мг/дм³. Максимальная минерализация отмечается на промплощадках в северной и восточной частях города и обусловлена повышенным содержанием в снеговой воде ряда макрокомпонентов – SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Na^+ и Ca^{2+} [Гребенщикова, 2013]. Особенностью химического состава снеговых вод территории промышленных зон Ангарска является достаточно высокий разброс величины pH – 5,3–9,7, т.е. от слабо кислых до щелочных. Минимальные значения pH отмечены в южной части города (район электролизного химического комбината и шламоотстойника ТЭЦ-9). Максимальные значения установлены в северной и восточной части промышленной зоны. Рассчитанная величина запыленности снегового покрова в Иркутске выше, чем в Ангарске.

Концентрация ионов водорода (pH) в снеговой воде заповедников Прибайкалья в среднем составляет 4,7 [Нецветова и др., 2004]. На западном берегу Байкала (природный фоновый район), где нет промышленных предприятий, pH составляет 5,4–6,3, минерализация – 9–17 мг/дм³.

На территории жилой части Ангарска рассмотренные макрокомпоненты и pH распределяются независимо от расстояния до промплощадок, но средние значения соответствуют региональным фоновым содержаниям. Распределение их обусловлено влиянием выбросов с промплощадок и находящихся там же ТЭЦ с последующим ветровым переносом.

По полученным нами ранее данным [Гребенщикова и др., 2008; Гребенщикова, 2013] и подтвержденными в последние годы, в снеговой воде г. Иркутска разброс содержаний как урана (от 0,01 до 0,35 мкг/дм³), тория (от 0,003 до 0,16 мкг/дм³), так и серы (от 1 170 до 16 600 мкг/дм³) довольно значителен, что свидетель-

ствует о неоднородном характере распределения этих элементов в снеговом покрове города, однако средние содержания довольно близки.

Радиационный фон любой территории складывается из природного фона и радиоактивного загрязнения, обусловленного антропогенным воздействием, поэтому при характеристике экологического состояния территории необходимо сравнивать полученные данные именно с региональным фоном, а не с кларками элементов [Гусева и др., 2019]. В связи с этим анализ данных проводился в сравнении с собственными данными ранее проведенных исследований [Гребенщикова и др., 2017], полученных для природной территории западного побережья оз. Байкал, где отсутствуют промышленные предприятия и нет постоянно проживающего населения. Данные по этому району можно принять как условно фоновые (природные), которые составляют для U – 0,02 мкг/дм³, Th – 0,01 мкг/дм³, S – 1 000 мкг/дм³ (см. таблицу).

В 2018–2019 гг. выполнен анализ снеговой воды на юго-западном берегу Байкала в пос. Листвянка в 70 км от Иркутска, который плотно застроен гостиницами, турбазами, здесь имеются как многоквартирные, так и частные дома, отапливаемые углем. На протяжении последних лет Листвянку интенсивно посещают туристы (до 1,5–2,0 млн человек в год),

многие – автотранспорте. Полученные значения содержаний элементов в снеговой воде пос. Листвянка показали отличия в сторону более низких значений только по торию в 2018 г. Однако в 2019 г. содержания U, Th и S в снеговой воде увеличились в 2 и более раза, что можно объяснить только ростом огромной социально-экологической (туристической) нагрузки на поселок и береговую часть Байкала, несмотря на отсутствие здесь промышленных предприятий. Значения радиоактивных элементов в снеговой воде несколько ниже, чем на городских территориях Иркутска и Ангарска, и близки к локальному природному фону на чистых берегах Байкала (см. таблицу), но в 2019 г. они приближаются к значениям в снеговой воде городских территорий. Содержание S при этом в 2–3 раза выше локального природного фона.

Построение на территории Ангарска и Иркутска площадных моноэлементных карт-схем распределения U, Th и S в снеговой воде позволило выявить ареалы повышенных содержаний элементов. Максимальные значения содержаний урана в пробах талой снеговой воды на территории Иркутска обнаружены вблизи левобережья р. Иркут на дачных и садовых участках, в районе расположения НИ ТЭЦ и на территории автозаправочной станции «КрайсНефть» – до 0,35 мкг/дм³ (левобережье Ангары) (рис. 1).

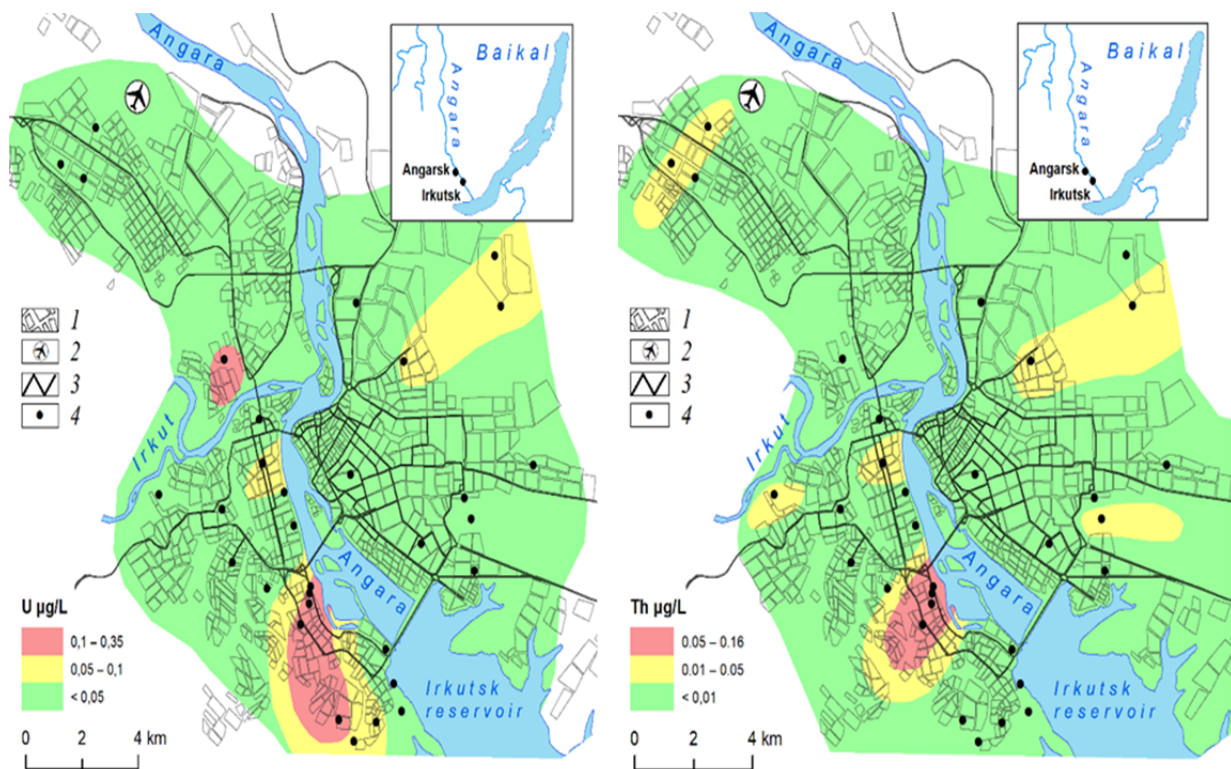


Рис. 1. Распределение концентраций урана и тория в снеговом покрове г. Иркутска и его пригорода, мкг/дм³

Здесь и на рис. 2: 1 – жилой сектор; 2 – авиазавод; 3 – автотрасса; 4 – места отбора проб снега

Fig. 1. Distribution of uranium and thorium concentrations in snow water of Irkutsk and its suburbs, µg/L
Here and in fig. 2: 1 – residential sector; 2 – aircraft factory; 3 – highway; 4 – snow sampling sites

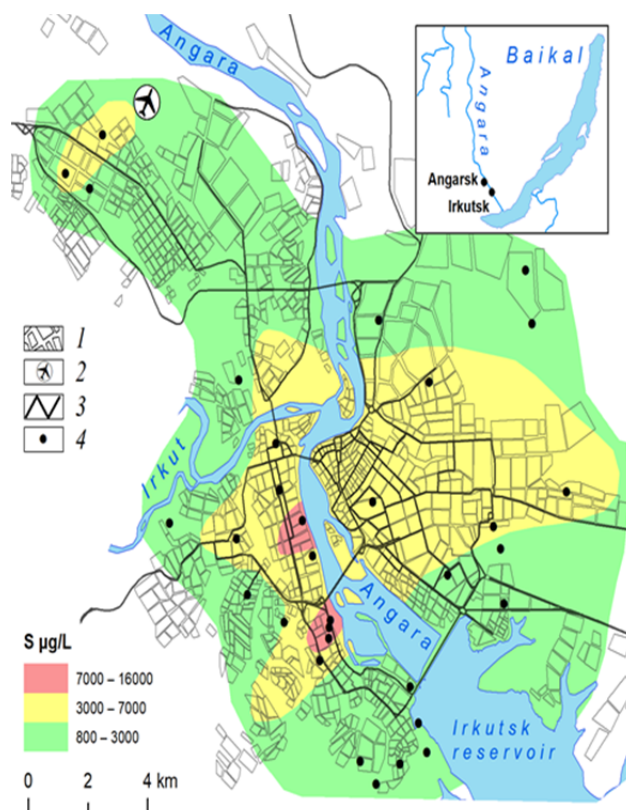


Рис. 2. Распределение концентраций серы в снеговой воде г. Иркутска и его пригорода, мкг/дм³

Fig. 2. Distribution of sulfur concentrations in snow water of Irkutsk and its suburbs, µg/L

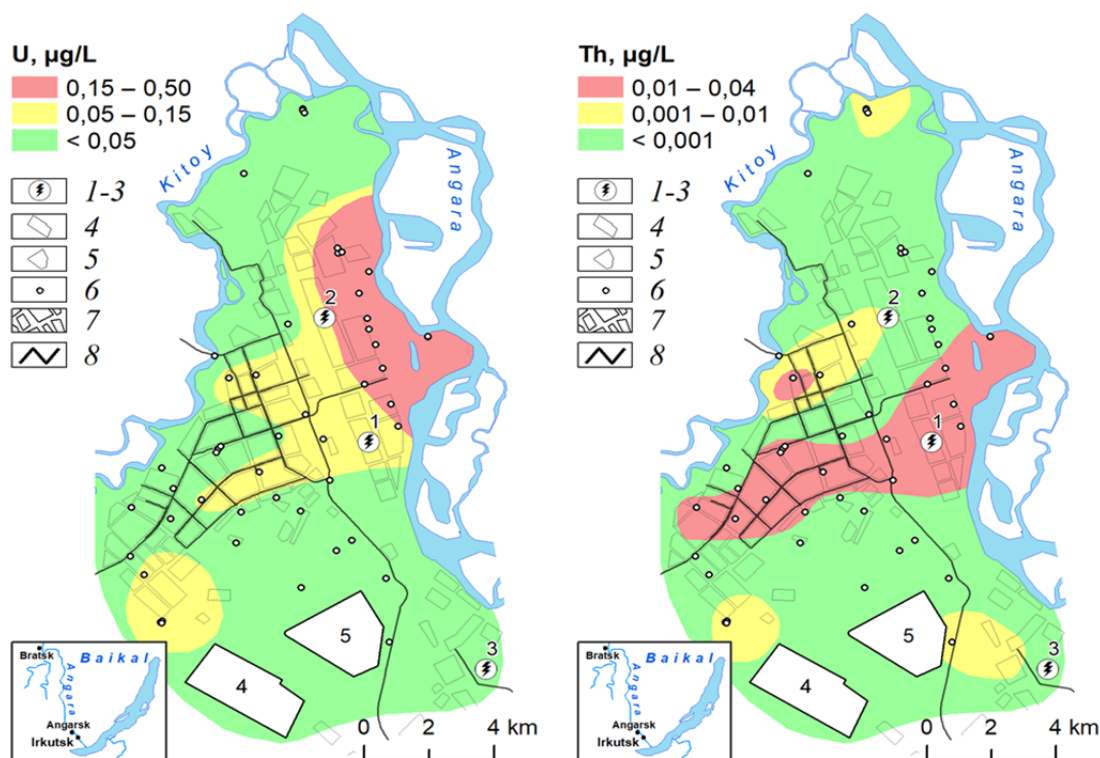


Рис. 3. Распределение концентраций урана и тория в снеговой воде г. Ангарска и его пригорода, мкг/дм³

Здесь и на рис. 4: 1–3 – теплоэлектростанции; 4 – электролизный химический комбинат; 5 – шламоотстойник; 6 – места отбора проб снега; 7 – жилой сектор; 8 – дороги

Fig. 3. Distribution of uranium and thorium concentrations in snow water of Angarsk and its suburbs, µg/L

Here and in fig. 4: 1–3 – thermal power plants; 4 – electrolysis chemical plant; 5 – sludge collector; 6 – snow sampling sites; 7 – residential sector; 8 – roads

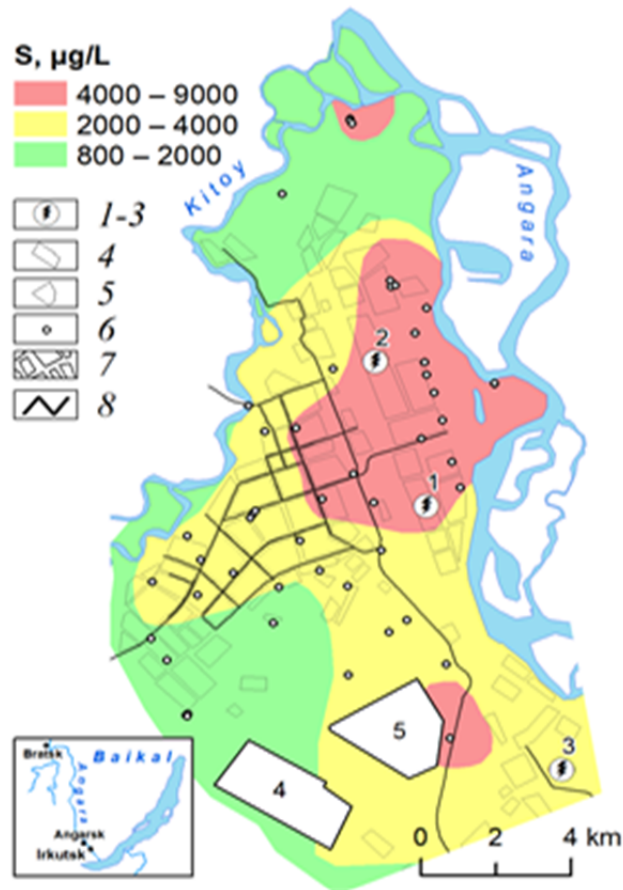


Рис. 4. Распределение концентраций серы в снеговой воде г. Ангарска и его пригорода, мкг/дм³

Fig. 4. Distribution of sulfur concentrations in snow water of Angarsk and its suburbs, µg/L

Распределение тория в снеговом покрове города фактически аналогично картине распределения урана: максимальные значения радионуклида отмечаются также вблизи НИ ТЭЦ. Одновременно повышенные содержания урана и тория отмечены в западной части Иркутска вблизи военного склада.

Содержание серы на территории расположения «КрайсНефть» максимально – 16 000 мкг/дм³ (см. рис. 2). Относительно повышенные содержания серы в снеговой воде отмечаются в густонаселенных, центральных частях города на правом и левом берегу Ангары и вблизи авиазавода из-за частых ветров со стороны Ангары.

Согласно полученным ранее данным [Королева, Холодова, 2012], рассчитанная величина запыленности снегового покрова в Ангарске меньше, чем в Иркутске. Она максимальна в восточной (промышленной) части города.

Моноэлементные карты-схемы распределения радионуклидов и серы в снеговой воде на территории г. Ангарска выявили их слабо выраженные ореолы в связи с небольшим разбросом содержаний элементов и, соответственно, слабой контрастностью (см. рис. 3, 4),

что объясняется защищенностью жилой зоны города от промышленных предприятий в восточной его части.

В снеговом покрове г. Ангарска, в его промышленной восточной зоне, содержания урана находятся в пределах 0,15–0,50 мкг/дм³, тория – 0,01–0,04 мкг/дм³. При этом максимальные содержания урана незначительно выше, чем в Иркутске, а содержания тория, наоборот, меньше.

Региональный природный фон Прибайкалья, как уже было сказано (мкг/дм³), для урана – 0,02, тория – 0,01. Превышение значений фона для радиоактивных элементов отмечается лишь в восточной промышленной зоне, расположенной вдоль левобережья Ангары. Самые высокие концентрации отмечены в окружении ТЭЦ-9.

Стоит отметить, что проведенные нами ранее исследования [Гребенщикова и др., 2017] также выявили максимальные содержания урана в почвах Ангарска в районе предприятий ТЭЦ-1, ТЭЦ-9 и за пределами города в южной части, где расположен шламоотстойник гидрозолоотвала ТЭЦ-9. Прослойки золы встречаются в профилях окружающих почв и отмечаются повышенными концентрациями урана и тория – 17 и 44 мг/кг соответственно.

В большинстве случаев в снеговой воде на территории Ангарска содержания изученных элементов низкие и находятся на уровне регионального фона или незначительно превышают его. При этом ореолы относительно повышенных концентраций урана, тория и серы отчетливо окаймляют в городе все четыре ТЭЦ и нефтехимический комбинат, протягиваясь в крест простирания городской территории с восточной стороны от р. Ангары на запад до р. Китой. Незначительное превышение U и Th проявлено в юго-западной части города в районе электролизного химического комбината.

Однако содержание серы здесь в снеговой воде находится на уровне фоновых значений. Максимум серы в Ангарске ниже в 2 раза, чем в Иркутске, и отмечен только в районе карьеров в северной части города. Ореол повышенных содержаний ($4\,000\text{--}9\,000\text{ мкг/дм}^3$) серы в виде шлейфа от ТЭЦ переходит в жилую зону города, но затем вдоль р. Китой фиксируются ее фоновые значения (см. рис. 4).

Повышенные содержания радиоактивных элементов и серы в снеговом покрове крупных промышленных городов Прибайкалья – Иркутска и Ангарска имеют различное происхождение, связанное со спецификой деятельности промышленных предприятий и градостроительными особенностями. Несмотря на локальный характер и малые площади, занимаемые рассмотренными радионуклидами и серой, в городах Прибайкалья проводится регулярный контроль радиационной обстановки.

По ранее полученным нами данным по распределению элементов-токсикантов в почвах, было отмечено, что почвенный покров Иркутска и Ангарска, несмотря на современный техногенный пресс, относится к категории «допустимого» по уровню загрязнения тяжелыми металлами, в том числе в отношении U и Th. Причины относительно благополучного состояния почв городов Прибайкалья могут быть обусловлены наличием большого количества на их территориях зеленых насаждений, широких лесозащитных полос, являющихся естественными фильтрами и имеющимся потенциалом к восстановлению природных свойств почв городов Иркутской области.

Заключение

Полученные аналитические данные по составу и геохимическим особенностям снега в рассматриваемых промышленных городах Прибайкалья позволяют сделать вывод, что накопление снеговой водой

элементов-токсикантов в городах и дальнейшее поступление их в другие компоненты окружающей среды (почва, вода, растения) обусловлены хозяйственной деятельностью человека и наличием промышленных предприятий разного профиля. Снеговая вода двух рассмотренных городов различается по макро- и микрокомпонентному составу и отражает промышленную специфику городов.

Результаты определения валовых концентраций Th, U и S в снеговом покрове территорий промышленных городов Прибайкалья – Иркутска, Ангарска и их пригородов показали вариабельность значений рассматриваемых элементов. Они могут превышать региональный и локальный (природный) фон Байкальского региона, но имеют близкие между собой средние содержания.

Влияние электролизного химического комбината по обогащению урана в г. Ангарске на содержание радионуклидов в снеговом покрове города достоверно не установлено.

Повышенные содержания тория, урана и серы фиксируются в снеговом покрове исследуемых городов небольшими локальными «пятнами» вокруг промышленных объектов или на некотором удалении от них, что свидетельствует об их аэротехногенном поступлении и обусловлено влиянием топливно-энергетических и нефтехимических предприятий.

Жилые территории рассмотренных городов испытывают слабое, но продолжительное влияние промышленных зон. Они сохраняются за счет обилия зеленых насаждений, разграничивающих жилые и промышленные участки.

За счет большой туристической нагрузки на побережье Байкала содержания урана, тория и серы в снеговой воде заметно приближаются к их значениям на городских территориях Прибайкалья. Несомненно, что этот факт требует тщательного регулирования и проверки сложившейся ситуации.

Установлено, что приоритетным источником повышенных содержаний элементов в Прибайкалье является аэротехногенное поступление их от нефтехимических предприятий, а также ТЭЦ и котельных, использующих уголь местного угольного бассейна.

Авторы благодарны сотрудникам ИГХ СО РАН, принимавшим участие в исследованиях.

Работа выполнена по проекту НИР № 0350-2019-0005 AAAA-A17-117041910034-5 и поддержана РФФИофи_м (№ 17-29-05022).

ЛИТЕРАТУРА

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2018 году». Иркутск : Мегапринт, 2019. 307 с.

Гребенщикова В.И. Геохимическая специфика состава снеговой воды некоторых городов Иркутской области // Вода: химия и экология. 2013. № 2. С. 19–25.

Гребенщикова В.И., Грицко П.П., Кузнецов П.В., Дорошков А.А. Уран и торий в почвенном покрове Иркутско-Ангарской промышленной зоны (Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 7. С. 93–104.

Гребенщикова В.И., Кузнецов П.В., Ефимова Н.В., Халбаев В.Л., Холодова М.С. Эколого-геохимическая оценка Иркутско-Ангарской промышленной зоны // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 56–66. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(56-66).

Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В.И. Гребенщикова, Э.Е. Лустенберг, Н.А. Китаев, И.С. Ломоносов / науч. ред. М.И. Кузьмин. Новосибирск : Гео, 2008. 234 с.

Грицко П.П., Гребенщикова В.И. Содержание урана и тория в почвенном покрове территории г. Иркутска и его пригорода // Инженерная экология. 2014. № 1. С. 26–38.

Гусева А.С., Устинов С.А., Петров В.А. Распределение природных радионуклидов в почвах на территории Новой Москвы // Известия вузов. Геология и разведка. 2019. № 5. С. 88–94. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-5-88-94

Коваль П.В., Гребенщикова В.И., Китаев Н.А. и др. Геохимия окружающей среды Прибайкалья // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 4. С. 571–577.

Ефимова Н.В., Мыльникова И.В., Парамонов В.В., Кузьмина М.В., Гребенщикова В.И. Оценка химического загрязнения и риска для здоровья населения Иркутской области // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 99–103. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(99-103)

Королева Г.П., Холодова М.С. Оценка экологического состояния городов Приангарья по атмосферным осадкам в зимний и летний периоды // Вестник ИРГТУ. 2012. № 7 (66). С. 60–66.

Кузнецов П.В., Гребенщикова В.И., Айсуева Т.С. Оценка содержаний урана и тория в почвах г. Черемхово (Иркутская область) и его окрестностей в связи с добычей и сжиганием каменного угля // Биосфера. 2013. Т. 5, № 2. С. 175–181.

Майсюк Е.П. Роль энергетики в экологическом состоянии Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 100–107. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(100-107)

Нецветова О.Г., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Кобелева Н.А., Погодаева Т.В. Химический состав снежного покрова в запovedниках Прибайкалья // География и природные ресурсы. 2004. № 1. С. 66–72.

Павлова Л.М., Радомская В.И., Юсупов Д.В. Высокотоксичные элементы в снежном покрове на территории г. Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 1. С. 27–35.

Рукавишников В.С., Ефимова Н.В., Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С., Заборцева Т.И., Гребенщикова В.И., Журба О.М., Лешенко А.Я., Донских И.В. Оценка среды обитания и здоровья населения в зоне размещения производства алюминия в условиях Восточной Сибири (на примере г. Шелехова) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 104–107. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(104-107)

Санеев Б.Г., Майсюк Е.П. Оценка воздействия топливно-энергетического комплекса Иркутской области на природную среду // Известия Байкальского государственного университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 249–256. DOI: 10.17150/2500-2759.2018.28(2).249–256

Таловская А.В., Язиков Е.Г., Шахова Т.С., Филимонов Е.А. Оценка аэротехногенного загрязнения в окрестностях угольных и нефтяных котельных по состоянию снегового покрова (на примере Томской области) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 10. С. 116–130.

Alekseenko V., Alekseenko A. The abundances of chemical elements in urban soils // Journal of Geochemical Exploration. 2014. V. 147 (B). P. 245–249.

Artamonova S.Yu. Technogenic fallout of Uranium and Thorium in the Vicinity of Novosibirsk (Russia, West Siberia) // Physics Procedia 84. 2016. V. 84. P. 280–287.

Batjargal T.E., Otgonjargal E., Baek K., Yang J.-S. Assessment of metals contamination of soils of Ulaanbaatar, Mongolia // Journal of Hazardous Materials. 2010. V. 184. P. 619–621.

Bozlaker A., Buzcu-Güven B., Fraser M.P. et al. Insights into PM10 sources in Houston, Texas: Role of petroleum refineries in enriching lanthanoid metals during episodic emission events // Atmospheric Environment. 2013. V. 69. P. 109–117.

Charro E., Pardo R., Pena V. Statistical analysis of the spatial distribution of radionuclides in soils around a coal-fired power plant in Spain // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. V. 124. P. 84–92.

Chernyago B.P., Nepomnyashchikh A.I., Medvedev V.I. Current radiation environment in the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53, No 9. P. 926–935.

Cinelli G., Tondeur F., Dehandschutter B., Bossew P., Tollefsen T., de Cort M. Mapping uranium concentration in soil: Belgian experience towards a European map // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. V. 166 (2). P. 220–234.

Grebenshchikova V.I., Gritsko P.P., Kuznetsov P.V., Doroshkov A.A. Uranium and thorium in soil cover of the Irkutsk-Angarsk industrial zone (Baikal region) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2017. V. 328, No 7. P. 93–104.

Voutsas D., Samara C. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas // Atmospheric Environment. 2002. V. 36, No 22. P. 3583–3590.

Авторы:

Гребенщикова Валентина Ивановна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии окружающей среды и физико-химического моделирования, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: vgreb@igc.irk.ru

Грицко Полина Павловна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, лаборатория геохимии окружающей среды и физико-химического моделирования, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: rysya-87@mail.ru

V.I. Grebenshchikova, P.P. Gritsko

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

SOURCES OF URANIUM, THORIUM AND SULFUR IN THE SNOWY WATERS OF THE IRKUTSK-ANGARSK INDUSTRIAL ZONE (BAIKAL REGION)

The results of geochemical monitoring of the distribution of radionuclides (U, Th) and S in the snow water of the Baikal region on the territories of two large industrial cities - Irkutsk, Angarsk and their environs showed that the contents of the considered elements are characterized by insignificant variability, but often exceed both the regional background of the Baikal region and the local natural background of the snow water of lake Baikal. The concentrations of elements were determined by a mass spectrometer with inductively coupled plasma ICP-MS (Finnigan MAT Element 2). The main source of the studied radionuclides and sulfur is aerotechnogenic transport due to the operation of fuel and energy enterprises in cities, furnace heating in the private residential sector and numerous vehicles. Accordingly, increased levels of U, Th and S in the snow water of Irkutsk and Angarsk were found near thermal power plants, industrial chemical enterprises, gas stations, and on the territory of the private residential sector. Previously identified local "anomalies" of increased radionuclide content in the soils of the cities of Irkutsk and Angarsk are similar to the increased concentrations of radio elements and sulfur in snow water on the territory of cities. It was found that the residential areas of the cities under consideration are less affected by industrial zones due to the abundance of green spaces in cities that distinguish residential and industrial areas, which are able to accumulate toxicants entering the air. A comparative analysis of snow water in the village closest to Irkutsk on the shore of Lake Baikal showed that there is also an increase in pollution caused by a significant and uncontrolled tourist load.

Keywords: snow water, uranium, thorium, sulfur, industrial and residential areas of cities, technogenic sources, radionuclides.

References

- Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2018 godu» [State report "On the state and environmental protection of the Irkutsk region in 2018"]. Irkutsk: OOO "Megaprint", 2019. 307 p. In Russian
- Grebenshchikova V.I. Geochemical specificity of snow water composition in some cities of the Irkutsk regions // Water: chemistry and ecology. 2013. No 2. pp. 19–25. In Russian
- Grebenshchikova V.I., Gritsko P.P. Uranium and thorium in soil cover of the Irkutsk-Angarsk industrial zone (Baikal region) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2017. V. 328. No 7. pp. 93–104. In Russian
- Grebenshchikova V.I., Kuznetsov P.V., Efimova N.V., Khalbaev V.L., Kholodova M.S. Ecological-geochemical assessment of the Irkutsk-Angarsk industrial zone // Geography and natural resources, 2017. No 3. pp. 56–66. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(56-66) In Russian
- Geokhimiya okruzhayushchey sredy Pribaykal'ya (Baykal'skiy geoeologicheskiy poligon) [Geochemistry of the environment of the Baikal region (Baikal geoeological polygon)] / V.I. Grebenshchikova, E.E. Lustenberg, N.A. Kitaev, I.S. Lomonosov / scientific ed. M.I. Kuzmin, Novosibirsk: geo Academic publishing house, 2008. 234 p. In Russian
- Gritsko P. P., Grebenshchikova V. I. Content of uranium and thorium in the soil cover of the territory of Irkutsk and its suburbs // Engineering ecology, 2014. No 1. pp. 26–38. In Russian
- Guseva A.S., Ustinov S.A., Petrov V.A. Distribution of natural radionuclides in the soils on the territory of the New Moscow // University news. Geology and exploration, 2019. No 5. pp. 88–94. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-5-88-94. In Russian
- Koval P.V., Grebenshchikova V.I., Kitaev N.A., et al. Geochemistry of the environment of the Baikal region // Russian Geology and Geophysics. 2000. V. 41. No 4. pp. 571–577. In Russian
- Efimova N.V., Mylnikova I.V., Paramonov V.V., Kuzmina M.V., Grebenshchikova V.I. Assessment of chemical pollution and public risks in the Irkutsk region // Geography and natural resources, 2016. N S6, pp. 99–103. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(99-103) In Russian
- Koroleva G. P., Kholodova M. S. Assessment of the ecological state of the cities of the Angara region by atmospheric precipitation in winter and summer periods // Vestnik Irstu, 2012. No 7 (66). pp. 60–66. In Russian
- Kuznetsov P.V., Grebenshchikova V.I., Isaeva T.S. assessment of the content of uranium and thorium in the soils of Cheremkhovo (Irkutsk region) and its environs in connection with coal mining and burning // Biosphere, 2013. V. 5. No 2. pp. 175–181. In Russian
- Maisyuk E.P. Role of the power industry in the ecological status of the Baikal natural territory // Geography and natural resources, 2017. No 1. pp. 100–107 // DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(100-107) In Russian
- Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Kobeleva N.A., Pogodaeva T.V. Chemical composition of snow cover in the reserves of the Baikal region // Geography and natural resources, 2004. No 1. pp. 66–72. In Russian
- Pavlova L.M., Radomskaya V.I., Yusupov D.V. Highly toxic elements in snow cover in the Blagoveshchensk territory // Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology, 2015. No 1. pp. 27–35. In Russian
- Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Zabortseva T.I., Grebenshchikova V.I., Zhurba O.v., Leshchenko Ya.A., Donskikh I.V. Assessment of the environment and public health condition in the area of aluminum production facilities, Eastern Siberia (by the example of Shelekhov city) // Geography and natural resources, 2016. No S6. pp. 104–107. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(104-107). In Russian
- Saneev B.G., Maisyuk E.P. Assessment of the Impact of Fuel and Energy Sector of the Irkutsk Region on the Environment // News of the Baikal state University, 2018. T. 28. No 2. pp. 249–256. DOI: 10.17150/2500-2759.2018.28(2).249–256 In Russian
- Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Shakhova T.S., Filimonenko E.A. Assessment of aerotechnogenic pollution in the vicinity of coal and oil boilers on the state of snow cover (on the example of the Tomsk region) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2016. V. 327. No 10. pp. 116–130. In Russian
- Alekseenko V., Alekseenko A. The abundances of chemical elements in urban soils // Journal of Geochemical Exploration, 2014. V. 147 (B). pp. 245–249.

- Artamonova S.Yu. Technogenic fallout of Uranium and Thorium in the Vicinity of Novosibirsk (Russia, West Siberia) // *Physics Procedia* 84, 2016. V. 84. pp. 280–287.
- Batjargal T.E. Otgonjargal E., Baek K., Yang J.-S. Assessment of metals contamination of soils of Ulaanbaatar, Mongolia // *Journal of Hazardous Materials*, 2010. V. 184. pp. 619–621.
- Bozlaker A., Buzcu-Güven B., Fraser M.P. and S.Chellam. Insights into PM10 sources in Houston, Texas: Role of petroleum refineries in enriching lanthanoid metals during episodic emission events // *Atmospheric Environment*, 2013. V. 69. pp. 109–117.
- Charro E., Pardo R., Pena V. Statistical analysis of the spatial distribution of radionuclides in soils around a coal-fired power plant in Spain // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013. V. 124. pp. 84–92.
- Chernyago B.P., Nepomnyashchikh A.I., Medvedev V.I. Current radiation environment in the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory // *Russian Geology and Geophysics*, 2012. V. 53. No 9. pp. 926–935.
- Cinelli G., Tondeur F., Dehandschutter B., Bossew P., Tollefsen T., M. de Cort. Mapping uranium concentration in soil: Belgian experience towards a European map // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017. V. 166–2. pp. 220–234.
- Grebenshchikova V.I., Gritsko P.P., Kuznetsov P.V., Doroshkov A.A. Uranium and thorium in soil cover of the Irkutsk-Angarsk industrial zone (Baikal region) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. V. 328. No 7. pp. 93–104.
- Voutsas D., Samara C. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas // *Atmospheric Environment*, 2002. V. 36. No 22. pp. 3583–3590.

Author's:

Grebenshchikova Valentina Iv., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Environmental Geochemistry and Physicochemical Modeling A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: vgreb@igc.irk.ru

Gritsko Polina P., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Lead Engineer, Laboratory of Environmental Geochemistry and Physicochemical Modeling, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: rysya-87@mail.ru

УДК 502.333

РИСКИ В СФЕРЕ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОПАСНЫМИ ПРИРОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА

М.А. Мельник¹, Е.С. Волкова¹, С.А. Мельник²

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия



Предлагается унифицированная методика оценки рисков для зимнего лесопользования, представленного лесозаготовительной отраслью. Оценка проводится на основе анализа метеоданных и нормированных денежных потерь, произошедших из-за простоя лесозаготовительной техники и нарушения условий вывоза древесины в результате воздействия опасных природных процессов. Апробация подхода осуществлялась на примере Томской области по таким показателям, как сильный мороз, сильные ветры, метели, продолжительность функционирования ледовых переправ и зимников. Результаты показали, что в целом по области наблюдается высокая степень рисков и отмечается тенденция их роста.

Ключевые слова: риски лесопользования, опасные природные процессы, лесозаготовка, ущерб, зимний период.

Введение

На территории России в последнее десятилетие отмечается увеличение случаев проявления природных опасностей гидрометеорологического характера. Статистика показывает, что в среднем ежегодный прирост составляет 14–15 случаев [Коршунов и др., 2010]. В этих условиях особенно уязвимой становится хозяйственная деятельность в сфере природопользования, поскольку ее устойчивое функционирование в значительной степени прямо или опосредованно зависит от воздействия природных факторов. Лесопользование, как один из видов природопользования, не исключение и является метеозависимой отраслью. В таежных лесах Западной Сибири основной вид лесопользования представлен заготовкой древесины, доходы от которой приносят ощутимый вклад в федеральный и региональные бюджеты. Однако лесозаготовительная деятельность, как правило, ведется в труднодоступных районах и сопряжена с существенными природными рисками. Для лесного хозяйства России природные риски, связанные с опасными и неблагоприятными погодными условиями, достаточно высокие, и площади погибших от их воздействия лесов из года в год варьируют от 20 до 460 тыс. га [Каткова, 2013].

Изучение и обобщение научных трудов по рискам, вызванных природными процессами [Ваганов, 2002; Кочуров, 2003; Акимов и др., 2004; Осипов, 2010], позволило в целом дать определение *природным рискам* как меры вероятности наступления опасного события природного характера в совокупности с величиной потерь, которые повлекло данное событие. Так как риск имеет место в процессе осуществления хозяйственной деятельности в условиях

опасности, то человек может оценивать его степень и принимать решения о приемлемости деятельности в сложившихся условиях, т.е. проводить анализ риска.

Риск-анализ подразумевает комплекс исследований по выявлению различных видов опасности, определению вероятности их наступления и оценку возможного ущерба, а также формирование адаптивных мероприятий по уменьшению рисков, иницируемых опасными факторами, при осуществлении каких-либо видов хозяйствования, в нашем случае – лесозаготовительной деятельности. Конечная цель анализа рисков состоит, по мнению Т.Е. Катковой [2011], в получении информации о структуре, свойствах объекта (системы) и присущих ему рисках, достаточной для принятия решений по уменьшению возможного ущерба.

Процедура риск-анализа для лесодобывающей промышленности имеет свою специфику и описана в научной литературе недостаточно полно, но ее значимость и прикладное значение отмечаются в ряде работ российских и зарубежных ученых [Каткова, 2011; Шальнев и др., 2016; Peltola et al., 2010; Naderpour et al., 2019]. Важность исследований подобного рода объясняется потребностью многих предприятий в объективной информации по оценке вероятности наступлений опасных событий и по ущербам, поскольку риск предпринимателя в лесозаготовительном секторе достаточно высок. Для снижения рисков субъекту лесопользования необходимо знать, какие породы обеспечат в будущем создание продуктивных устойчивых насаждений против болезней и ветровалов, какие опасные природные явления наиболее характерны для данной местности, их повторяемость, интенсивность и т.д. [Пет-

ров и др., 2001]. Оперативное и своевременное выявление территориальных особенностей, частоты проявления таких опасностей, величины наносимого от их воздействия ущерба лесозаготовительной деятельности позволяют организовывать систему мониторинга по предупреждению возможных рисков. Кроме того, результаты исследования имеют немаловажное значение в сфере страхования от стихийных бедствий для лесного хозяйства, поскольку система оценки рисков для данной отрасли практически не разработана [Сабиров, 2014].

Сложность реализации процедуры риск-анализа заключается, прежде всего, в отсутствии полномасштабной пространственно-временной базы по показателям природно-климатических опасностей, а также в недостатке информации о величине реального денежного ущерба для этих предприятий. Отсюда следует, что выбор того или иного способа количественной оценки рисков зависит, в первую очередь, от объема доступной информации о риске и требуемой точности оценок. Также приходится учитывать фактический уровень риска – чем меньше вероятность наступления опасного события, тем труднее измерить риск [Шальнев и др., 2016].

Наиболее проработанными в этом вопросе являются методики оценки ущербов и рисков лесного хозяйства для теплого периода года, наносимых пожарами природного и антропогенного характера [Моисеев, 2009; Петров, 2010; Каткова, 2011; Шихов, 2014; Brunette et al., 2015; Neale et al., 2016], болезнями и вредителями леса [Фарбер и др., 2003; Мельник и др., 2018; Aukema et al., 2011; Kenis et al., 2009], сильными ветрами [Шихов, 2014; Мельник и др., 2016]. Перечисленные природные опасности влияют на лесоресурсный потенциал территории, вызывая деградацию и гибель древостоя на обширных территориях. Соответственно, разработкой системы мониторинга и методологических подходов риск-анализа для таких видов опасностей занимаются многие научные коллективы. Опасности зимнего периода, оказывающие влияние в основном на лесозаготовительную деятельность и вывозку древесины, изучены гораздо хуже, хотя около 80 % перевозок заготовленного древесного сырья производится по зимникам [Мохирев и др., 2018]. В этом вопросе наибольшую популярность получили исследования таких негативных факторов, как сильные ветры [Nilsen et al., 2004; Blennow et al., 2010], метели [Журавлев и др., 2019], неустойчивое состояние зимних лесовозных дорог [Лукашевич, 2013].

Исходя из этого, целью данного исследования является создание унифицированной методики оценки степени возможных рисков для лесозаготовительной деятельности в зимний период на основе анализа метеоданных и нормированных денежных потерь. Под *природным риском лесозаготовитель-*

ной деятельности в зимний период понимается вероятность возможных ощутимых потерь от простоя лесозаготовительной техники и затруднений вывозки древесины, обусловленных комплексом опасных и неблагоприятных природных явлений. В работе авторы уходят от традиционной балльной оценки рисков, рассчитывая вполне реальный денежный ущерб, который может быть нанесен региональной сфере лесопользования в зимний период.

Апробация подхода осуществлялась для территории Томской области, которая является классическим примером региона с высоким древесно-сырьевым потенциалом и его интенсивным освоением в условиях сурового климата. Территория области имеет высокую лесистость (почти 60 %), здесь сосредоточено 20 % запасов древесины всего Западно-Сибирского региона, при этом расчетная лесосека установлена в размере 38,6 млн м³. Казалось бы, существуют большие перспективы развития отрасли, однако статистика показывает, что объем фактической заготовки древесины в области на расчетный 2017 г. составляет 5,09 млн м³, таким образом, расчетная лесосека осваивается лишь на 13,2 % [Лесной план..., 2018]. Причины такого положения кроются, прежде всего, в экономической ситуации развития регионального лесного сектора и в низкой транспортной доступности лесных ресурсов, но немаловажный вклад в лимитирование развития отрасли вносит спектр природных рискоформирующих факторов.

Материалы и методы исследования

Анализ риска обычно начинается с его идентификации – выявления тех видов опасностей и рискоформирующих факторов, которые способны нанести ощутимый материальный урон. Влияние опасных явлений на лесозаготовительную деятельность главным образом выражается в простоях техники и рабочей силы, нарушениях условий как ручной, так и машинной валки, а также погрузки и транспортировки заготовленной древесины. В зимний период в Томской области наибольшие потери связаны, в первую очередь, с такими опасными метеорологическими явлениями, как морозы и сильные ветры, сопровождающиеся метелями. Из перечня Росгидромета для Западно-Сибирского УГМС в список такого рода опасных явлений попадают: сильный мороз ($t_{\min} < -40^{\circ}\text{C}$ в течение 3 сут и более), аномально холодная погода ($t_{\min} < -35^{\circ}\text{C}$ в течение 5 сут и более), очень сильный ветер (более 20 м/с), сильная метель (перенос снега с подстилающей поверхности сильным ветром продолжительностью 12 ч и более) [Перечень..., 2020]. Перечисленные опасности существенно влияют на все сферы жизнедеятельности человека и на все виды природопользования, в том числе и на лесопользование, однако

явления, наблюдающиеся ежегодно, но не достигающие критериев опасности, также могут наносить не меньший урон.

Уже при -35°C в течение даже одного дня или при скорости ветра более 15 м/с лесозаготовительные компании прекращают работу, поскольку в данных условиях эксплуатации техники предельно снижается работоспособность аккумуляторных батарей, агрегатов трансмиссии, гидравлического и пневмогидравлических приводов, значительно затрудняются техническое обслуживание и ремонт инструмента и агрегатов машин. Помимо перерыва в основных лесозаготовительных работах в таких условиях приостанавливается процесс вывозки древесины. Сильные ветры усугубляют риски зимней лесозаготовки: ручная валка леса, сортиментная и хлыстовая заготовки запрещены при скорости ветра более 10 м/с, при погрузке древесины работы приостанавливаются, если скорость превышает 12,5 м/с [Шегельман и др., 2005]. В зимний период наибольшему негативному влиянию ветровой деятельности подвержены периферийные проселочные дороги и зимники – снежные заносы и «переметы» временно парализуют их функционирование [Мельник, Мельник, 2016]. Учитывая эти факторы, для территории Томской области выбраны следующие основные показатели, входящие в группу наиболее опасных для зимнего лесопользования природных процессов: дни с морозами ниже -35°C , дни с ветром более 15 м/с, дни с метелями, сокращенные сроки действия ледовых переправ. Все они носят колебательный характер, меняются от года к году, имеют территориальные особенности, связанные не только с природными условиями, но и со степенью доступности древесно-сырьевых ресурсов.

Информационно-аналитическая база по выделенным показателям формировалась по данным Росгидромета за последний 15-летний зимний период по 18 метеостанциям, расположенным в Томской области и на территории близлежащих регионов. Дополнительные станции из соседних регионов были взяты для более точного пространственного моделирования с использованием базового ГИС-инструмента «Интерполяции» на основе метода обратно взвешенных расстояний.

Зимний период в Сибири – наиболее благоприятное время для транспортировки лесоматериалов из лесосек в связи со стабильной отрицательной температурой воздуха, и сроки данного периода находятся ориентировочно в промежутках между 10 ноября и 20 марта и зависят от наступления заморозков осенью и потепления весной [Мохи́рев и р., 2019]. Зимний сезон на территории Томской области включает три фазы (умеренно морозную, значительно морозную, предвесеннюю), которые продолжаются на территории области с начала ноября по конец марта [Фи-

ландышева, Сорока, 2013]. Дополнительные материалы по срокам функционирования ледовых переправ предоставлены МЧС России по Томской области за 2013–2018 гг.

Пожалуй, наибольшую сложность в ходе исследования вызывает процедура определения величины возможного ущерба в денежном выражении, ведущего к снижению предпринимательской прибыли от продажи древесины при произведенных затратах. В нашем случае для оценки суммы возможного ущерба использовались необходимые для проведения расчетов экономические показатели ряда лесозаготовительных предприятий Томской области малого и среднего бизнеса за последний десятилетний период.

Ущерб от опасных и неблагоприятных погодных явлений для лесопользования, главным образом, зависит от двух составляющих:

$$Y = Y_{\pi} + Y_{\text{в}}, \quad (1)$$

где Y_{π} – величина ущерба от простоя лесозаготовительных машин, руб./сут; $Y_{\text{в}}$ – величина ущерба, связанного с дополнительными затратами на содержание лесовозных дорог, руб./сут.

Ущерб в случае простоев складывается из недополученного дохода и заработной платы лесозаготовительной бригады во время простоя. Для всех лесозаготовительных компаний унифицировать величину понесенных потерь представляется трудноразрешимой задачей, поскольку имеется территориальная дифференциация условий лесопользования: древесно-сырьевые ресурсы имеют свои категории качества, для их заготовки используется разная техника, варьирует заработная плата, отличаются дорожные условия и транспортная доступность. Однако зная значение прибыли, полученной в результате заготовки древесины, производительность техники и затраты в случае простоев, для каждого конкретного случая с использованием данной методики можно рассчитать суточный ущерб от проявления опасных природных явлений, повлекших за собой приостановку лесозаготовительной деятельности.

Удельная прибыль от заготовки одного кубометра древесины была рассчитана по формуле

$$П = P \cdot C - Z_3 - Z_{\text{в}} - Z_{\pi}, \quad (2)$$

где $П$ – прибыль, руб./куб. м/сут; P – производительность, куб. м/сут; C – средняя рыночная цена древесины руб./куб. м; Z_3 – затраты на заготовку древесины, в том числе на топливо, зарплату операторам лесозаготовительной техники, руб./сут; $Z_{\text{в}}$ – затраты на вывозку древесины, в том числе на строительство и содержание лесовозных дорог, руб./сут; Z_{π} – постоянные затраты.

Согласно данным, полученным по итогам проведенного нами анкетирования ряда предприятий, входящих в лесопромышленный кластер Томской области, усредненное значение прибыли от заготовки одного кубометра древесины по Томской области

на 2019–2020 гг. составило 1 000 руб./м³. Данная величина, главным образом, отражает прибыль лесозаготовительных предприятий малого и среднего бизнеса, работающих с использованием современных комплексов Ponsse (харвестер – форвардер) и осуществляющих вывозку древесины по договору об оказании транспортных услуг со сторонним предприятием. Исходя из этого, величина недополученного дохода от вынужденного простоя лесозаготовительной техники, вызванного неблагоприятными природными условиями, в течение одних суток определялась в зависимости от удельной прибыли и производительности. Например, для комплекса Ponsse, имеющего производительность 300 куб. м/сут [Герасимов и др., 2012], недополученная прибыль будет составлять 300 тыс. руб./сут. Процедура округления значения прибыли позволяет пренебречь затратами на заработную плату бригады операторов в дни простоя, которая составляет в среднем 8 тыс. руб./сут. Следовательно, ущерб в результате простоя лесозаготовительной техники в течение суток может быть рассчитан следующим образом:

$$Y_{\text{п}} = \Pi \cdot P + Z_{\text{зп}} \approx 300 \text{ тыс. руб./сут.} \quad (3)$$

Ущерб от дополнительных затрат на содержание лесовозных дорог рассчитывается по формуле:

$$Y_{\text{в}} = l \cdot Z_{\text{од}}, \quad (4)$$

где $Y_{\text{в}}$ – ущерб от дополнительных затрат на очистку лесных дорог, руб.; l – протяженность дороги, км; $Z_{\text{од}}$ – затраты на очистку одного км дороги от снега, руб./км, что в среднем по области, по данным коммерческих предложений организаций, оказывающих услуги спецтехники, составляет 150 руб./км. Отметим, что в представленной работе расценки имеют усредненное значение и требуют дополнительного более детального экономического анализа применительно для конкретных условий заготовки (удаленность, степень доступности, площадь делянок, используемая техника и пр.).

Говоря о рисках лесопользования, нужно заметить, что ряд современных методик анализа риска основывается на таких популярных измерителях, как вероятность и последствия, а также на различных комбинациях этих характеристик [Акимов и др., 2004]. Вероятность события для опасных природно-климатических явлений, как правило, определяется через частоту проявления этих событий. Вероятностный метод анализа риска позволяет обеспечить приемлемую достоверность получаемых результатов при условии последующей тенденции опасных природных процессов. Дополнительная оценка величины ущерба, наносимого этими опасными событиями, позволяет рассчитать материальные потери, интерпретируемые в денежном эквиваленте. Отсюда вытекают две главные составляющие анализа риска – частота проявления опасных событий

(их вероятность) и величина возможного материального ущерба.

Риск-анализ лесопользования основывается на определении вероятностной функции распределения величины возможных ущербов от каждого вида опасностей и комплексного анализа полученных зависимостей, т.е. зависимостей числа дней с опасным явлением и вероятности их проявления. При этом если опасное явление наблюдается ежегодно не менее k раз, то данному значению k будет соответствовать вероятность 100%; аналогично рассчитывается вероятность для всех возможных значений числа дней с опасностью:

$$p = N_k / N, \quad (5)$$

где p – вероятность того, что в году будет наблюдаться k дней с опасным явлением; N_k – число лет, в которые наблюдается k дней с опасным явлением, N – общее число лет наблюдений.

Исходя из повторяемости опасного явления и среднего значения ущерба в день, вычисляются значения возможных ущербов, т.е. каждое значение числа дней с опасностью умножается на 300 тыс. руб./сут, в случае, если опасность ведет к простоя лесозаготовительной техники; если опасное явление приводит к нарушению транспортной доступности делянок, то число дней с опасностью умножается на 150 руб./км и на протяженность лесных дорог. Функция распределения вероятности представляется в табличном виде, где отражена информация о том, с какой вероятностью можно ожидать определенные значения ущербов.

Некоторые авторы [Ваганов, Ман-Сунг Им, 2001], вводя определения риска, предлагают рассматривать его как произведение вероятности возникновения опасного события на возможный ущерб от этого события. Полученные значения рисков имеют менее вариабельный характер, их максимальные значения можно рассматривать как наиболее оптимальные величины для принятия управленческих решений для минимизации ущербов.

Таким образом, на заключительном этапе проводится комплексный анализ распределения вероятностей возможных ущербов и рисков от всех опасностей, включенных в анализ, на основе которого можно делать выводы о целесообразности заготовки древесины, особенно для отдаленных и труднодоступных районов, но имеющих высокий лесоресурсный потенциал.

Результаты исследования

В рамках данного исследования показано, что в целом по области наблюдается высокая степень рисков для сферы лесопользования от влияния опасных природно-климатических процессов зимнего периода. Отмечается общая тенденция роста проявления опас-

ных процессов, однако, по мнению [Игнатьева, Кнауф, 2020], для Томской области риск перехода опасных природных явлений в чрезвычайные ситуации слабый.

Рассматривая показатели опасных метеорологических явлений, предлагаемых Росгидрометом, можно отметить, что аномально холодная погода наблюдается на территории области не ежегодно. Наиболее неблагоприятным в этом отношении является север и северо-восток области, здесь за исследуемый период вероятность наступления аномально холодной погоды составляет более 60 %. Например, на станции Ванжиль-Кынак в зимний сезон 2005–2006 гг. было зафиксировано пять таких случаев. В центральной части области эта вероятность составляет порядка 20 %, а на юге только 13 %. Такое опасное явление, как сильный мороз, происходит несколько реже, чем аномально холодная погода, но имеет схожее временное и пространственное распределение. Наряду с Александровским районом сильные морозы часто фиксируются в Каргасокском и северо-восточной части Верхнекетского районах (рис. 1). В отдельные годы они могут продолжаться непрерывно до 22 дней.

Опасные явления, связанные с ветровой активностью, в Томской области также наблюдаются не каж-

дый год, и наиболее неблагоприятным в этом отношении является период с середины апреля по июнь. За исследуемый временной промежуток в зимний период года ветра с порывами более 25 м/с или средней скоростью более 20 м/с зарегистрировано не было. Для некоторых метеостанций в отдельные годы фиксировались единичные случаи с порывами ветра более 20, но менее 25 м/с, что не достигает критерия опасности, определенных Росгидрометом. Как правило, с такой силой ветер наблюдается на территории области в феврале и марте.

Анализируя такой основной показатель для оценки рисков лесопользования, вызванных морозами, как температура воздуха ниже -35°C , можно отметить, что эта температура наблюдается ежегодно почти на всей исследуемой территории, но с разной вероятностью. Так, на юге области вероятность составляет 79 %, тогда как на северо-востоке она соответствует 100 %, здесь ежегодно наблюдается не менее 6 дней в году с такой температурой. С учетом вероятности и возможных значений ущерба от простоя лесозаготовительной техники, получено, что в Александровском, Верхнекетском и Каргасокском районах ежегодно с вероятностью 100 % минимальные значения недополученной прибыли составляют 1,8; 1,5 и 1,2 млн руб. соответственно (рис. 2).

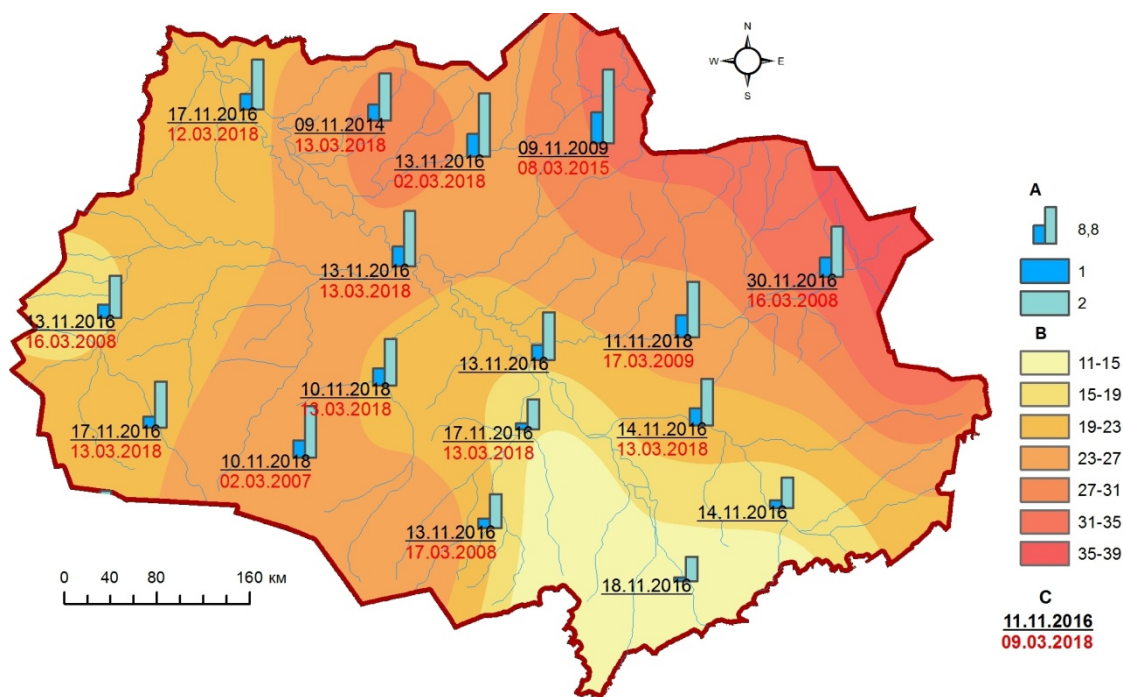


Рис. 1. Пространственное распределение среднего числа дней с морозами по территории Томской области за период 2005–2019 гг.

A – среднегодовые значения дней с морозами 1) ниже -40°C ; 2) ниже -35°C . *B* – среднегодовые значения дней с морозами ниже -30°C . *C* – даты самых ранних и самых поздних морозов -30°C с ноября по март за исследуемый период

Fig. 1. Spatial distribution of the average number of days with frosts across the Tomsk Oblast for years 2005–2019
A – average annual numbers of days with frosts 1) below -40°C ; 2) below -35°C . *B* – average annual numbers of days with frosts below -30°C . *C* – the dates of the earliest and latest frosts -30°C from November to March for the study period

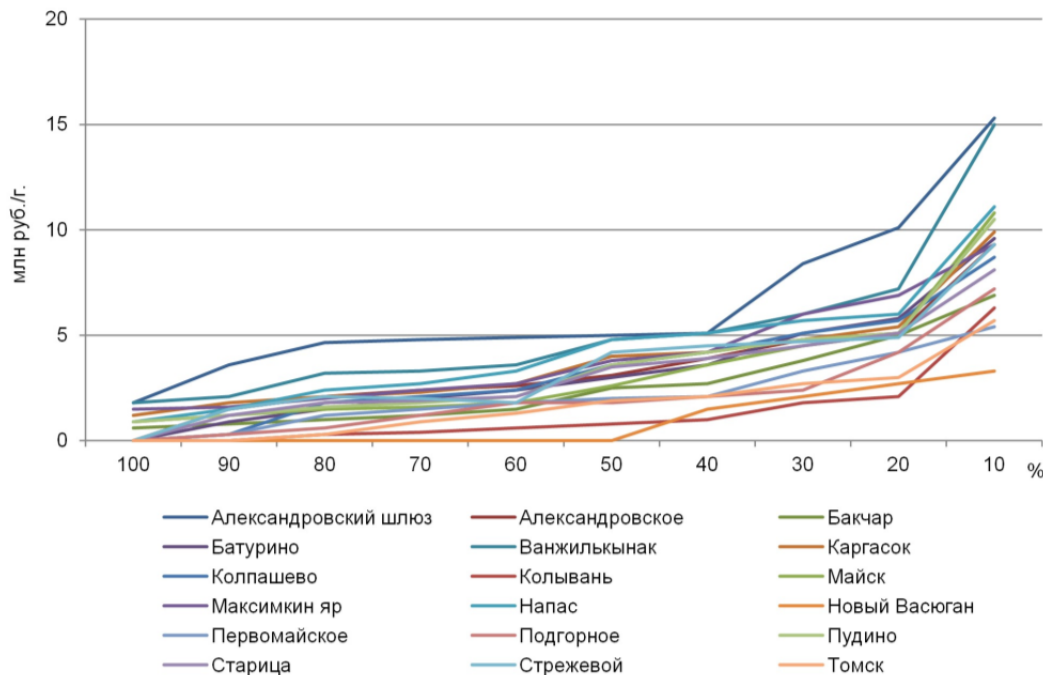


Рис. 2. Изменение величины недополученной прибыли от простоя лесозаготовительной техники в результате низких температур в зависимости от вероятности их наступления

Fig. 2. Variability of lost profit resulting from the logging equipment downtime due to the probability of low temperatures

Максимальные возможные размеры недополученной прибыли также приходится на север области и могут превышать 15 млн руб./год, при этом вероятность возникновения таких потерь составляет 10 %. На юге области (Кожениковский, Томский районы) данные показатели значительно ниже: минимальные ущербы здесь составляют 0,3 млн руб. и могут ожидаться с вероятностью менее 80 %, а максимальные – порядка 6 млн руб. с вероятностью 10 %. Важно подчеркнуть, что здесь и далее в расчетах данные по ущербам и рискам приводятся на один лесозаготовительный комплекс, если в заготовке участвует большее количество комплексов, то приведенные значения увеличиваются кратно. Исходя из того, что наибольшая заготовка древесины ведется в Верхнекетском, Первомайском и Томском районах области, анализ рисков для этих территорий представляет наибольший интерес.

Необходимо отметить, что эти районы области расположены в разных природно-климатических условиях и имеют неодинаковую степень доступности. Верхнекетский район, обладая значительными запасами древесно-сырьевых ресурсов (расчетная лесосека составляет 4302,5 тыс. м³) и располагаясь в средне-таежной подзоне таежной лесоболотной природной зоны, приравнивается к районам Крайнего Севера. Многие территории этого района не имеют круглогодичного сообщения с районным и област-

ным центрами. Зимой интенсивность работы некоторых лесозаготовительных компаний в сильной степени зависит от сроков эксплуатации ледовых переправ. Первомайский район также характеризуется довольно высокими значениями ежегодно допустимых объемов заготовки древесины (3 717,7 тыс. м³) и, находясь на юго-востоке области, наряду с Томским районом относится к южно-таежной подзоне. Климатические условия в зимний период Первомайского и Томского районов более благоприятны для ведения лесозаготовительных работ. При этом Томский район с объемом расчетной лесосеки в 1 686,6 тыс. м³ с позиции транспортной доступности имеет самое выгодное положение.

Поскольку в этих трех районах наблюдается выраженная дифференциация природных условий и доступности, то ущербы при одних и тех же значениях вероятности в Верхнекетском районе в среднем в 2 раза превышают аналогичный показатель Первомайского района и в 2,5 раза – показатель Томского района. Функции распределения вероятностей недополученной прибыли от простоя лесозаготовительной техники, вызванной низкими температурами, представлены в табл. 1.

Если значения материального ущерба возрастают при уменьшении вероятности возникновения опасности, то величина рисков вычисляется как произведение вероятности и соответствующего

ущерба, и наибольшее значение имеет в пределах вероятности от 50 до 60 %. Это объясняется тем, что максимальные значения рисков показывают наиболее возможную величину недополученной прибыли: для Верхнекетского района – 1,9 млн руб., для Первомайского – 1,08, для Томского – 0,95 млн руб.

Другой немаловажный рискоформирующий климатический фактор для лесопользования в зимний период связан с ветровой активностью. Проанализировав показатель количества дней с порывами ветра более 15 м/с, можно говорить о том, что данное явление ежегодно и повсеместно случается на территории области, за исключением станции Томск (рис. 3).

Таблица 1
Распределение значений недополученной прибыли и рисков от простоя лесозаготовительной техники, вызванных низкими зимними температурами

Table 1

Distribution of lost profit and risks from the logging equipment downtime due to low winter temperatures

Район	Вероятность, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Верхнекетский	Ущерб, тыс. руб./год	1 500	1 600	2 000	2 400	2 700	3 800	4 200	6 000	6 900	9 300
	Риск, тыс. руб./год	1 500	1 440	1 600	1 680	1 620	1 900	1 680	1 800	1 380	930
Первомайский	Ущерб, тыс. руб./год	–	300	1 200	1 500	1 800	2 000	2 100	3 300	4 200	5 400
	Риск, тыс. руб./год	–	270	960	1 050	1 080	1 000	840	990	840	540
Томский	Ущерб, тыс. руб./год	–	–	300	900	1 300	1 900	2 100	2 700	3 000	5 700
	Риск, тыс. руб./год	–	–	240	630	780	950	840	810	600	570

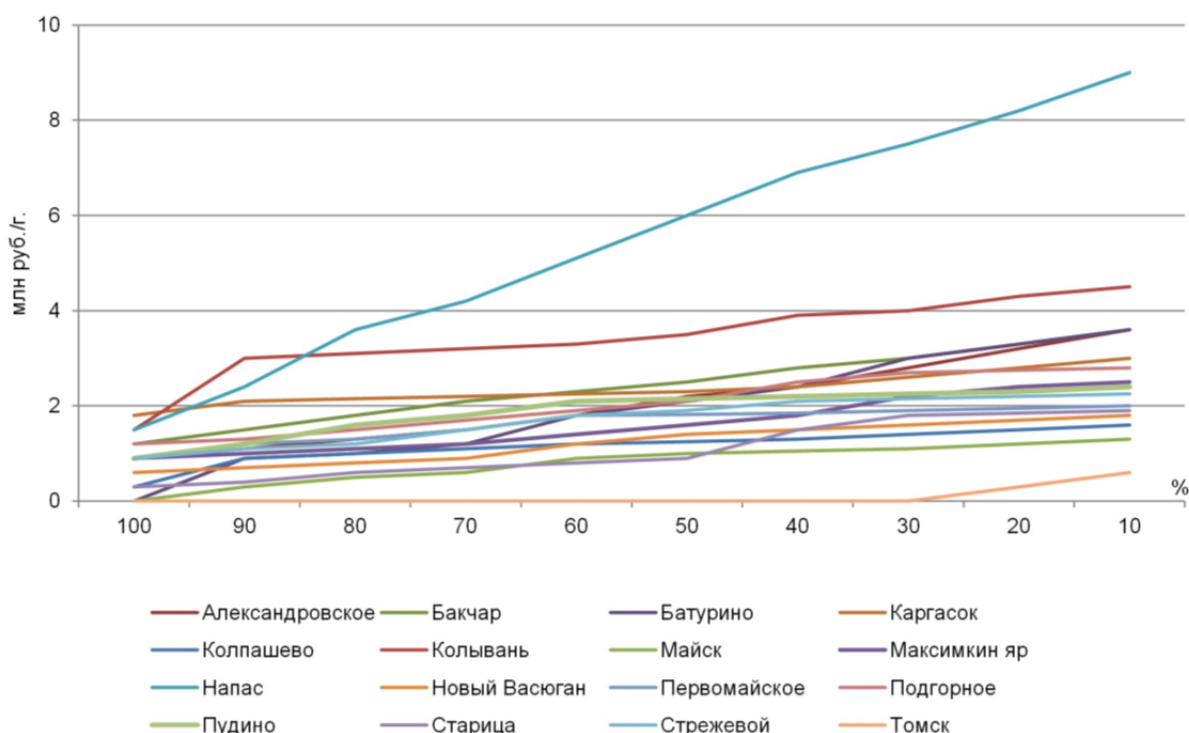


Рис. 3. Изменение величины недополученной прибыли от простоя лесозаготовительной техники в результате сильных ветров в зависимости от вероятности их наступления

Fig. 3. Variability of the lost profit resulting from the logging equipment downtime due to the probability of strong winds

Таблица 2

Распределения значений недополученной прибыли и рисков от простоя лесозаготовительной техники, вызванных сильными ветрами

Table 2

Distribution of lost profit and risks from the logging equipment downtime due to strong winds

Район	Вероятность, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Верхнекетский	Ущерб, тыс. руб./ год	900	1 000	1 100	1 200	1 400	1 600	1 800	2 200	2 400	2 500
	Риск, тыс. руб./ год	900	900	880	840	840	800	720	660	480	250
Первомайский	Ущерб, тыс. руб./ год	900	1 200	1 300	1 500	1 800	1 820	1 850	1 900	1 950	2 000
	Риск, тыс. руб./ год	900	1 080	1 040	1 050	1 080	910	740	570	390	200
Томский	Ущерб, тыс. руб./ год	—	—	—	—	—	—	—	—	300	600
	Риск, тыс. руб./ год	—	—	—	—	—	—	—	—	60	60

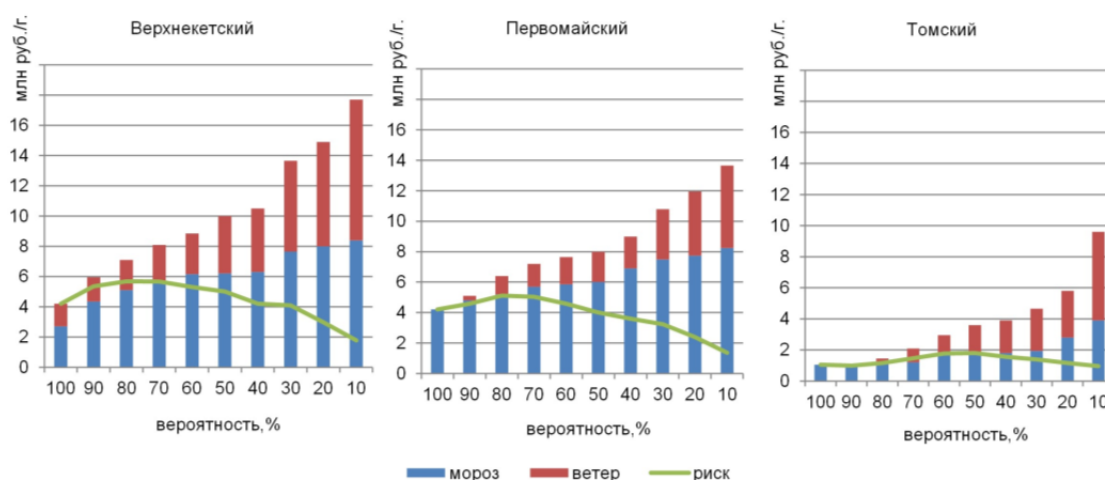


Рис. 4. Суммарные значения недополученной прибыли и рисков от простоя лесозаготовительной техники по трем районам Томской области с наиболее развитым лесодобывающим сектором

Fig. 4. Total amounts of lost profit and risks from the logging equipment downtime in three districts of Tomsk Oblast with the most developed forestry sector

На станции Томск вероятность возникновения данного неблагоприятного события в зимний сезон составляет лишь 20 %, что характеризует эту территорию по данному показателю как преимущественно благоприятную. Наибольшее число дней с порывами ветра более 15 м/с зафиксировано на территории, расположенной на границе с Новосибирской областью и находящейся в лесостепной зоне, здесь ежегодно наблюдается не менее пяти случаев. Высокая ветровая активность свойственна и северной части области (Александровскому и Каргасокскому районам), а также территориям, расположенным вдоль крупных рек области (Обь, Чулым). Данные представленного анализа по пространственному распределению ветровой активности согласуются с результатами коллег из Томского государственного университета, исследовавших наиболее опасные для области метеорологические явления [Евсеева, Ромашова, 2011].

Среди выделенных трех районов с наиболее развитой лесозаготовительной деятельностью примерно одинаковые ущербы от недополученной прибыли в результате воздействия сильных ветров приходится на Первомайский и Верхнекетский районы. Здесь ежегодно наблюдается не менее трех случаев, а наибольшее число дней в году с сильными ветрами почти идентично: в Верхнекетском районе – 11 дней, в Первомайском – 10. Однако риск в Первомайском районе (1,08 млн руб./год) незначительно, но выше, чем в Верхнекетском (0,9 млн руб./год), что объясняется большей частотой встречаемости – 4–5 случаев с ветром более 15 м/с в год (табл. 2).

Суммарные риски от простоя лесозаготовительной техники могут достигать 5,7 млн руб./год для Верхнекетского района, 5,1 млн руб./год для Первомайского и 1,8 млн руб./год – для Томского района. При этом максимальные значения рисков в Верхнекетском и Первомайском районах наблюдаются при

достаточно высокой вероятности, составляющей 80 %, в Томском районе – при 60 % (см. рис. 4). Из графиков видно, что ежегодный риск, случающийся при вероятности 100 %, соответствует наименьшему значению ущерба и составляет 4,2 млн руб./год для Верхнекетского и Первомайского районов и 1,05 млн руб./год – для Томского.

Заготовка древесины почти по всей области проводится на отдаленных и труднодоступных лесных территориях, и отсюда особо актуальным становится вопрос прокладки и содержания лесных дорог, зимников до лесозаготовительных деланок. Наиболее часто встречаемым на территории области негативным природным фактором, нарушающим их бесперебойное функционирование, являются метели. Согласно данным томских ученых о повторяемости метелей в Томской области [Журавлев и др., 2019] в среднем на территории региона ежегодно наблюдается до 30 дней с этим явлением. Вместе с тем авторы отмечают значительное снижение опасного природно-климатического явления – за указанный период число метелей уменьшилось в 3–5 раз. За 50-летний период наблюдений наибольшие среднеемноголетние значения числа дней с метелями варьируют от 20 до 30 дней в году и приходятся на станции Каргасок, Александровское, Колпашево, Первомайское и Тегульдэт. Для основных лесозаготовительных районов наиболее высокие значения рисков от воздействия метелей характерны для Первомайского района, затем идут Верхнекетский и Томский районы.

Немаловажным показателем природной опасности, ведущей к ущербам от дополнительных затрат на содержание лесовозных дорог, является также показатель дней с ветром с порывами более 10 м/с. Анализ повторяемости таких случаев показал, что на территории области в зимний период они происходят ежегодно от 7 до 26 случаев на юге области и от 44 до 98 случаев – на северо-востоке, в районе метеостанции Напас (рис. 5). Расчеты показали, что ежегодные дополнительные затраты на содержание лесных дорог на единицу длины колеблются по территории области довольно существенно: от 1,01 до 6,6 тыс. руб. Наиболее неблагоприятными в этом отношении являются не только северные (Александровский и Каргасокский районы), но и более южные территории (Бакчарский и Кожевниковский районы).

Результаты оценки ущербов и рисков по данному показателю в трех репрезентативных районах представлены в табл. 3. Видно, что значения по Верхнекетскому и Первомайскому району сопоставимы между собой и имеют незначительные отличия по максимальной величине рисков и составляют 4,08 и 4,32 тыс. руб./км соответственно. По Томскому району значения ниже, что объясняется в целом слабой ветровой активностью, фиксируемой на метеостанции Томск. Такие низкие показатели некоторые авторы объясняют влиянием увеличения защищенности ветроизмерительных приборов вследствие роста деревьев и высотной застройкой окружающей территории [Журавлев и др., 2019].

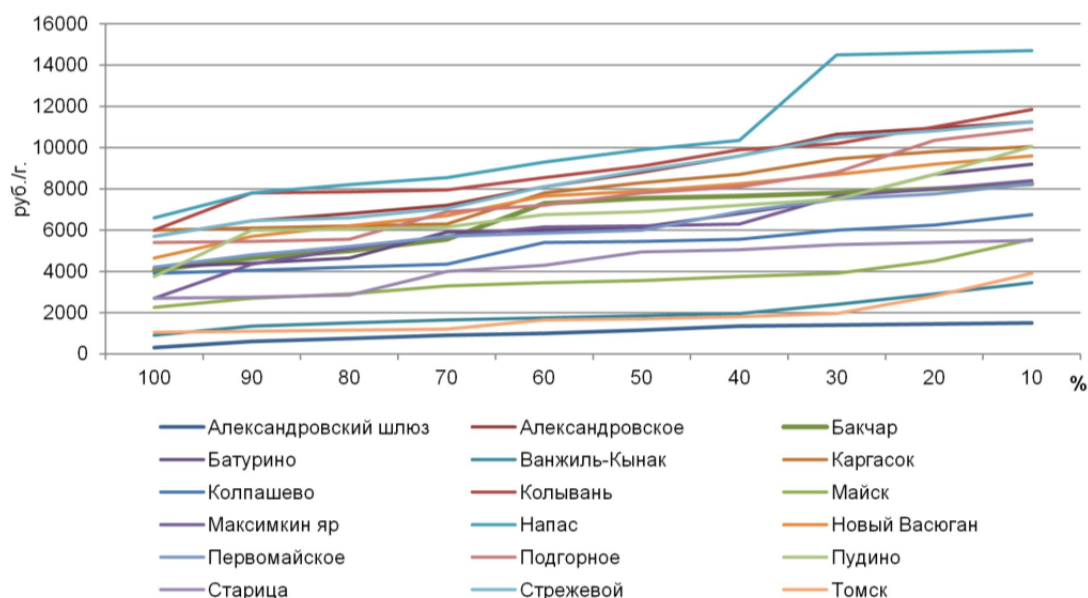


Рис. 5. Изменение величины дополнительных затрат на содержание лесовозных дорог при нарушении условий транспортировки в результате неблагоприятных погодных условий в зависимости от вероятности их наступления

Fig. 5. Variability of additional costs required for the hauling roads maintenance depending on the probability of adverse weather conditions

Таблица 3

Распределение величины ущерба и рисков от нарушений условий вывозки древесины, вызванных сильными порывистыми ветрами

Table 3

Distribution of material damage and risks arising from the disruption of timber hauling conditions caused by strong gusty winds

Район	Вероятность, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Верхнекетский	Ущерб, руб./год на км	2 700	4350	5 100	5 700	6 150	6 200	6 300	7 650	8 000	8 400
	Риск, руб./год на км	2 700	3 915	4 080	3 990	3 690	3 100	2 520	2 295	1 600	840
Первомайский	Ущерб, руб./год на км	4 200	4 800	5 200	5 700	5 850	6 000	6 900	7 500	7 750	8 250
	Риск, руб./год на км	4 200	4 320	4 160	3 990	3 510	3 000	2 760	2 250	1 550	825
Томский	Ущерб, руб./год на км	1 050	1 100	1 150	1 200	1 650	1 700	1 800	1 950	2 800	3 900
	Риск, руб./год на км	1 050	990	920	840	990	850	720	585	560	390

Анализ рисков лесопользования в зимний период года для Томской области включает в себя помимо расчетов по морозам, сильным ветрам и метелям такой показатель, как доступность к освоению лесоресурсной базы региона. Этот показатель включает в себя несколько составляющих: протяженность дорог с разным типом покрытия, количество мостов, зимние переправы, тип ландшафта, геоморфологические особенности и т.д. [Мельник, Волкова, 2017]. Для зимнего периода наиболее важным показателем выступает период продолжительности функционирования зимников и ледовых переправ. Степень рисков, связанных с ним, зависит от густоты речной сети и определяется погодными условиями. По данным МЧС, на территории Томской области ежегодно вводятся в эксплуатацию порядка 90 наплавных мостов и ледовых переправ, сроки их функционирования напрямую влияют на продолжительность ведения лесозаготовительных работ на делянках, расположенных на другом берегу многочисленных рек. Так, например, основная доля лесоресурсного потенциала Верхнекетского района находится на правом берегу р. Кеть, через которую ежегодно строится шесть ледовых переправ. В отдельных случаях для обеспечения доступности лесных делян требуется строительство нескольких ледовых переправ, что значительно увеличивает риски лесопользования.

Анализ функционирования зимников и ледовых переправ показал значительные колебания как по срокам их открытия и закрытия, так и по продолжительности действия. За последнее десятилетие самым неблагоприятным был зимний сезон 2013–2014 гг. – отсутствие низких температур, необходимых для строительства переправ, длилось до середины января 2014 г. В этот год на всей территории области наблюдалось сокращение действия зимников на 25–45 дней по сравнению со среднемноголетними

значениями. Такая ситуация способна увеличить недополученную прибыль лесозаготовительных предприятий в дополнение к основным видам ущерба на сумму от 7,5 до 13,5 млн руб. в год. Ситуация зимнего периода 2019–2020 гг. также была крайне неблагоприятной – ледовые переправы закрылись значительно раньше среднемноголетних сроков. Например, через переправы р. Кеть 15 марта уже был ограничен тоннаж и запрещено передвижение лесовозов, а в первых числах апреля переправы были полностью закрыты (рис. 6).

Комплексная оценка рисков зимнего лесопользования является заключительным пунктом процедуры риск-анализа и проводится по предлагаемой методике на основе развернутой подробной информации для фактического лесозаготовительного участка. При этом требуемыми дополнительными данными для расчетов выступают следующие показатели: ежегодный объем пользования, протяженность лесовозных дорог, количество ледовых переправ, тип используемой техники и т.д. Особо стоит подчеркнуть, что итоговая комплексная оценка не может быть получена как прямое суммирование всех ущерба и рисков, поскольку величина недополученной прибыли от простоя лесозаготовительной техники в результате неблагоприятных явлений рассчитывалась для всего зимнего сезона и измерялась в тыс. руб./год, а дополнительные затраты на вывозку вычислялись на 1 км дороги и измерялись в руб./год на километр. Каждый конкретный случай достаточно индивидуален. В связи с этим как пример показаны сводные значения ущерба и рисков, рассчитанные по предлагаемой методике для лесозаготовительных делянок, расположенных в разных районах Томской области, но условно равноудаленных от основных транспортных артерий на 50 км при работе одного лесопромышленного комплекса (табл. 4).



Рис. 6. Ледовые переправы через р. Кеть 04.04.2020 г.

Fig. 6. Ice-crossings over the River Ket 04.04.2020

Таблица 4

Распределения суммарных значений недополученной прибыли и рисков, вызванных опасными для лесозаготовительной деятельности природными процессами

Table 4

Distribution of total amounts of lost profit and risks from caused by natural hazards for the timber harvesting activities

Район	Вероятность, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Верхнекетский	Ущерб, тыс. руб./год	2 535	2 817,5	3 355	3 885	4 407,5	5 710	6 315	8 582,5	9 700	12 220
	Риск, тыс. руб./год	2 535	2 535,75	2 684	2 719,5	2 644,5	2 855	2 526	2 574,75	1 940	1 222
Первомайский	Ущерб, тыс. руб./год	1 110	1 740	2 760	3 285	3 892,5	4 120	4 295	5 575	6 537,5	7 812,5
	Риск, тыс. руб./год	1 110	1 566	2 208	2 299,5	2 335,5	2 060	1 718	1 672,5	1 307,5	7 81,25
Томский	Ущерб, тыс. руб./год	52,5	55	357,5	960	1 382,5	1 985	2 190	2 797,5	3 440	6 495
	Риск, тыс. руб./год	52,5	49,5	286	672	829,5	992,5	876	839,25	688	649,5

Результаты комплексной оценки выбранного для исследования действующего модельного участка – лесного квартала № 412 Верхнекетского лесничества Лисицинского участкового лесничества Лисицинского урочища, также хорошо демонстрируют структуру суммарных рисков. Лесной квартал № 412 располагается на правом берегу р. Кеть, в 45 км от железнодорожной станции Белый Яр, куда поступает заготовленная древесина для дальнейшей транспортировки. Дорога состоит из участков с разным дорожным полотном и геоморфологическими условиями местности: 9 км она идет по пойме, более 1 км – по болоту, 10 км приходится на зимник, 20 км на гравийную дорогу по лесному массиву и 5 км дороги имеет асфальтовое покрытие в окрестностях п. Белый Яр. Дорога пересекает русла рек Широковская Анга, Карбинская Анга и Кеть.

Расчет рисков лесопользования, связанный с дополнительными затратами на содержания дорог до лесного квартала, рассчитывается как произведение

протяженности дороги вне населенных пунктов (40 км) на ранее полученные значения соответствующего показателя рисков для Верхнекетского района (4 080 руб./км). Другая составляющая представлена величиной рисков от простоя лесозаготовительной техники. Так для района, где расположен модельный участок, она равна 4,2 млн руб. Поскольку дорога до квартала пересекает русла рек, это предопределяет наличие третьей компоненты в общей структуре рисков, которая отвечает за сокращение сроков действия ледовых переправ и, как следствие, вывозки древесины. В итоге суммарное значение рисков для данного лесного квартала будет составлять 9,36 млн руб./год. Из этой суммы основная доля приходится на риски, вызванные сокращением действия ледовых переправ и зимников, далее следуют риски, связанные с простоями техники и на последнем месте стоят риски, обусловленные дополнительными вложениями на содержание дорог.

Обсуждение

Региональная оценка распределения вероятностей рисков зимнего периода от воздействия каждого вида из представленных в данной работе опасных природных процессов дает основание говорить о том, что для многих лесодобывающих районов Томской области величина рисков довольно высока и может достигать нескольких миллионов рублей. При существующем низком уровне развития транспортной инфраструктуры, особенно в северных районах области, величина возможных материальных ущербов еще больше увеличивается. Соответственно, эффективность работы лесозаготовительных предприятий, деятельность которых происходит в отдаленных и труднодоступных районах, будет достаточно низкой.

Для территорий с высоким древесно-сырьевым потенциалом, даже при существовании ряда рискформирующих факторов, выбор возможных участков для лесозаготовки остается за самой компанией. И в этом случае наличие полной и достоверной информации о возможных природно-климатических опасностях и рисках способствует адекватному принятию наиболее эффективной стратегии их преодоления. Знание и анализ опасных и неблагоприятных процессов в их динамике позволяют заранее разрабатывать превентивные меры защиты, сокращая экономические потери в ходе эксплуатации лесных ресурсов.

Представленная в статье методика оценки рисков лесопользования в зимний период может быть применена как в региональном масштабе для сравнения условий лесозаготовительной деятельности по районам области, так и на локальном уровне, для оценки достоверной величины возможных потерь на конкретных участках. Выделенный в работе перечень опасных и неблагоприятных явлений для лесопользования в зимний период и разработанные для них региональная система критериев опасности и методика их оценки помогают просчитать возможные риски, а также составить рекомендации для уменьшения потерь в лесном секторе. Предлагаемые методологические подходы, выводы и рекомендации, апробированные на примере Томской области, на практике могут быть использованы для региональных и федеральных служб лесного хозяйства, представлять интерес для частного бизнеса лесозаготовительного сектора.

Заключение

Подводя итоги, можно отметить следующее:

1. Основная группа природных опасностей для сферы лесопользования в течение зимнего периода на территории Томской области связана с сильными морозами, метелями и сильными ветрами, сокраще-

нием периода эксплуатации ледовых переправ и зимников. Наибольшее влияние этих негативных факторов испытывает лесозаготовительная деятельность из-за простоя техники и нарушения условий вывоза древесины. В целом по области пространственное распределение степени природных рисков увеличивается с юга на север и северо-восток и зависит не только от природных факторов, но и от доступности древесных ресурсов. Отсюда ущербы при одних и тех же значениях вероятности могут отличаться почти в 2 раза.

2. От воздействия низких зимних температур ежегодные минимальные значения недополученной прибыли при расчетах только на один лесозаготовительный комплекс на севере и северо-востоке области с вероятностью 100 % составляют от 1,2 до 1,8 млн руб., максимально возможные размеры могут превышать 15 млн руб., при этом вероятность возникновения таких потерь составляет 10 %. В более южных районах эти показатели значительно ниже: минимальные ущербы здесь составляют 0,3 млн руб. и могут ожидаться с вероятностью менее 80 %, а максимальные достигают порядка 6 млн руб. с вероятностью 10 %.

3. Величина ущербов от недополученной прибыли от простоя лесозаготовительной техники, наносимых сильными ветрами более 15 м/с, несколько ниже, чем от морозов. Для основных лесозаготовительных районов примерно одинаковые значения ущербов приходится на Первомайский и Верхнекетский районы. При этом риск при вероятности 90 % в Первомайском районе (1,08 млн руб./год) незначительно, но выше, чем в Верхнекетском (0,9 млн руб./год), что объясняется большей частотой встречаемости случаев с сильными ветрами. Значения рисков от нарушений условий вывозки древесины по Верхнекетскому и Первомайскому районам сопоставимы между собой и имеют незначительные отличия по максимальной величине рисков и составляют 4,08 и 4,32 тыс. руб./км соответственно.

4. Для зимнего периода одним из важных дополнительных показателей при расчете рисков, в первую очередь для лесозаготовительной деятельности, выступает период продолжительности функционирования зимников и ледовых переправ. Следует отметить, что сроки функционирования ледовых переправ и зимников за последние 15 лет значительно варьируют из года в год. В целом отмечается сокращение длительности их эксплуатации, что главным образом связано с уменьшением значительной морозной фазы зимнего периода. Недополученная прибыль для лесозаготовительных предприятий, находящихся в отдаленных и труднодоступных районах, в дополнение к основным видам ущербов может исчисляться от 7,5 до 13,5 млн руб. в год.

5. Комплексная суммарная оценка рисков зимнего лесопользования проводится по предлагаемой методике на основе развернутой подробной информации для конкретного лесозаготовительного участка. Для полномасштабной картины рисков необходимо использовать дополнительную информацию, учитывая индивидуальные особенности

участка, такие, например, как ежегодный объем пользования, протяженность лесовозных дорог, число ледовых переправ, тип и количество используемой техники и т.д.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН № АААА-А17-117013050034-9.

ЛИТЕРАТУРА

- Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н.** Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. М. : Деловой экспресс, 2004. 352 с.
- Ваганов П.А.** Человек. Риск. Безопасность. СПб., 2002. 160 с.
- Ваганов П.А., Ман-Сунг Им.** Экологический риск. СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 2001. 152 с.
- Герасимов Ю.Ю., Сенькин В.А., Вяттайнен К.** Производительность харвестеров на сплошных рубках // Resources and Technology. 2012. № 9 (2). С. 82–93.
- Евсеева Н.С., Ромашова Т.В.** Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга томской области) // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 353. С. 199–204.
- Журавлев Г.Г., Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л.** Метели на территории Томской области // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 594. С. 137–151.
- Игнатьева А.В., Кнауб Р.В.** Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 66–77. DOI: 10.17223/25421379/14/5
- Каткова Т.Е.** Развитие теории и методов риск-менеджмента в лесном хозяйстве // Экономические науки. 2011. № 7(80). С. 68–72.
- Каткова Т.Е.** Риски в лесном хозяйстве: сущность и виды в современных условиях хозяйствования // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10, № 2. С. 30–37.
- Коршунов А.А., Шаймарданов М.З., Шаймарданова И.Л.** Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие экономики России для обслуживания потребителей: результаты статистического анализа опасных условий погоды // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 174. URL: <http://meteo.ru/publications/112-trudy-vniigmi/349-trudy-vniigmi-mts-vypusk-174-2010-g> (дата обращения: 15.02.2020).
- Кочуров Б.И.** Экодиагностика и сбалансированное развитие. М. : Смоленск: Маджента, 2003. 384 с.
- Лесной план** Томской области на 2019–2020 годы. Томск, 2018. 102 с. URL: <https://deples.tomsk.gov.ru/documents/front/view/id/11898> (дата обращения: 12.01.2020).
- Лукашевич В.М.** Обоснование периода работы лесосечных и лесотранспортных машин с учетом сезонности лесозаготовок. Петрозаводск : ПетрГУ, 2013. 105 с.
- Моисеев Н.А.** Экономическая оценка стихийных и техногенных воздействий на состояние и ресурсный потенциал лесных экосистем // Лесное хозяйство. 2009. № 6. С. 5–8.
- Мельник М.А., Волкова Е.С.** Комплексная характеристика факторов, лимитирующих транспортную доступность отдаленных и труднодоступных территорий Томской области // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. 2017. № 4. С. 48–53.
- Мельник М.А., Волкова Е.С., Биссирова Э.М., Кривец С.А.** Оценка эколого-экономического ущерба лесопользованию, вызванного инвазией уссурийского полиграфа в темнохвойные экосистемы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 225. С. 58–75. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.58-75
- Мельник М.А., Мельник С.А.** Сильный ветер как опасный фактор для лесопользования в южно-таежной зоне Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3, № 3. С. 105–109.
- Мохирев А.П., Горяева Е.В., Мохирев М.П., Ившина А.В.** Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных // Лесотехнический журнал. 2018. № 2 (30). DOI: 10.12737/article_5b2406187a0061.41499175
- Мохирев А.П., Позднякова М.О., Гудень Т.С.** Влияние природно-производственных факторов на транспортные затраты лесозаготовительного производства // Лесотехнический журнал. 2019. № 2. С. 107–117. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/12
- Осипов В.И.** Управление природными рисками // Вестник Российской Академии наук. 2010. Т. 80, № 4. С. 291–297.
- Перечень** и критерии опасных природных явлений, действующие на территории деятельности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115> (дата обращения: 12.02.2020).
- Петров А.П., Мелниш А., Талияров А., Наслунд Б.-А., Густафсон М.** Управление лесами в переходной экономике (опыт реформ в России и странах Балтии) : учеб. пособие. Пушкино : Техно-Лайт, 2001. 159 с.
- Петров В. Н.** Организация, планирование и управление в лесном хозяйстве : учеб. пособие. СПб. : Наука, 2010. 416 с.
- Сабиров А.А.** Проблемы страхования рисков в сельском и лесном хозяйствах от стихийных бедствий // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2014. Т. 9, № 4 (34). С. 51–52.
- Фарбер С.К., Соколов В.А., Баранчиков Ю.Н., Кондаков Ю.П.** Оценка потери древесины от вспышки сибирского шелкопряда в 90-х годах XX века // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1 (32). С. 138–142.
- Филандышева Л.Б., Сорока А.С.** Изучение ритмов зимнего сезона на юго-западе Западно-Сибирской равнины в свете глобальных изменений климата // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 2. С. 710–714.
- Шальнев А.С., Алексеев А.В., Хакимуллин А.Р., Леонтьев Э.В.** Экономические аспекты анализа рисков в лесном хозяйстве // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2016. № 1. С. 31–40. DOI: 10.21178/2079-6080.2016.3.28

Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 1. С. 21–29.

Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 344 с.

Aukema J.E., Leung B., Kovacs K., Chivers C., Britton K.O., Englin J., Frankel S.J., Haight R.G., Holmes T.P., Liebhold A.M., McCullough D.G., Von Holle B. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States // *PLoS one*. 2011. V. 6. Iss. 9. P. 1–7.

Blennow K., Andersson M., Sallnäs O., Olofsson E. Climate change and the probability of wind damage in two Swedish forests // *Forest Ecology and Management*. 2010. V. 259. Iss. 4. P. 818–830. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.07.004

Brunette M., Holec J., Sedliak M., Tucek J., Hanewinkel M. An actuarial model of forest insurance against multiple natural hazards in fir (*Abies Alba Mill.*) stands in Slovakia // *Forest Policy and Economics*. 2015. V. 55. P. 46–57.

Kenis M., Auger-Rosenberg M.-A., Roques A., Timms L., Péré C., Cock M.J.W., Setelle J., Augustin S., Lopez-Vaamonde C. Ecological effects of invasive alien insects // *Biological Invasions*. 2009. V. 11. Iss. 9. P. 21–45.

Naderpour M., Mojaddadi Rizeei H., Khakzad N., Pradhan B. Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. V. 106558. DOI: 10.1016/j.res.2019.106558

Neale T., Weir J.K., McGee T.K. Knowing wildfire risk: Scientific interactions with risk mitigation policy and practice in Victoria, Australia // *Geoforum*. 2016. V. 72. P. 16–25.

Nilsson C., Stjernquist I., Barring L., Schlyter P., Jönsson A.M., Samuelsson H. Recorded storm damage in Swedish forests 1901–2000 // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 199. Iss. 1. P. 165–173. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.07.031

Peltola H., Ikonen V. P., Gregow H., Strandman H., Kilpeläinen A., Venäläinen A., Kellomäki S. Impacts of climate change on timber production and regional risks of wind-induced damage to forests in Finland // *Forest Ecology and Management*. 2010. V. 260. Iss. 5. P. 833–845. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.06.001

Авторы:

Мельник Мария Алексеевна, кандидат географических наук, научный сотрудник, лаборатория самоорганизации геосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: melnik-m-a@yandex.ru

Волкова Елена Сергеевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория самоорганизации геосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: elevolko@yandex.ru

Мельник Сергей Андреевич, кандидат биологических наук, доцент, кафедра лесного хозяйства и ландшафтного строительства, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: melnik-sergej@yandex.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 68–83. DOI: 10.17223/25421379/17/6

M.A. Melnik¹, E.S. Volkova¹, S.A. Melnik²

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

RISKS IN FOREST MANAGEMENT DEPENDING ON HAZARDOUS NATURAL PROCESSES IN WINTER PERIOD

In recent years, natural hazards have been noted with increased frequency throughout Western Siberia, having direct and indirect impacts on all types of environmental management, including forest management. The main type of forest management activities is timber harvesting, which brings a substantial part of income to federal and regional budgets. It is usually conducted in hard-to-reach taiga areas and involves significant natural risks. *Environmental risks* can be defined as probabilities of hazardous natural events leading to significant material losses. Such probabilities are calculated based on the actual frequency of hazardous events related to the probability of their occurrence. Risk analysis, conducted in this work, includes feasibility studies for various types of hazards, their probability calculation, and assessment of the resulting possible material damage to the forest management activities during winter periods. The purpose of the study is to offer a method of risk assessment for the timber harvesting activities during winter periods, based on the analysis of meteorological data and normalized monetary losses resulting from the impact of natural hazards.

The frequency analysis of natural hazards was done based on the factors having the greatest influence on the forestry sector: frost, strong winds, windstorms, duration of ice-crossing periods. The approach was tested for the Tomsk Oblast, which presents a classic example of a region with a high wood-resource potential and intensive timber harvesting conducted in severe climatic conditions. Information and analytical base for the calculations is comprised of the data collected by 18 meteorological stations and 86 ice-road stations located on the region's territory. The material damage to forest management from hazardous natural events was calculated for the following two factors: the damage from the logging equipment downtime and the damage from additional costs required for the hauling roads maintenance. The possible risks values were calculated based on the probability of hazardous events and estimated amount of the resulting damage.

The study has shown that, as a rule, the risks for forest management are increasing during the winter periods. In such conditions, considering the present levels of the transportation infrastructure development, the amounts of possible material damage can be very large. The main types of risks include shortening of the ice-roads operation periods and large number of days with frost, snowstorms and strong winds. All of these factors can vary significantly from year to year. Territorial differences in the amount of risks are also significant and depend not only on natural factors, but also on the proximity of wood resources. The highest levels of risks are noted in the northern and north-eastern parts of the Tomsk Oblast.

The article outlines the results of risk assessment conducted for the areas with the most intensive timber production, which are located in the Verkhneketsky, Pervomaysky and Tomsk district territories. According to our calculation, the average annual damage from the logging equipment downtime as a result of adverse weather conditions during winter period is estimated as 5.7 mln, 5.1 mln, and 1.8 mln rubles, respectively. Additional annual costs for the hauling roads maintenance vary from 1 to 4.3 thous. rubles per a kilometer of the road.

Using the distinguished types of hazardous natural events for winter-time forest management, and applying the regional risks assessment criteria developed for them, we can predict possible risks and make relevant recommendations in order to reduce material losses in the forestry sector at the regional and local levels.

Keywords: risks in forest management, hazardous natural processes, timber harvesting, material damage, winter.

References

- Akimov V.A., Lesnykh V.V., Radaev N.N. *Riski v prirode, tekhnosfere, obshchestve i ekonomike* [Risks in nature, the technosphere, society and the economy]. Moscow: Delovoy Express, 2004. 352 p. In Russian
- Vaganov P.A. *Chelovek. Risk. Bezopasnost'* [Human. Risk. Safety.]. St. Petersburg, 2002. 160 p. In Russian
- Vaganov P.A., Man-Sung Im. *Ekologicheskiy risk* [Ecological risk] // St. Petersburg University Press, 2001. 152 p. In Russian
- Gerasimov Ju.Ju., Sen'kin V.A., Vajatajnen K. *Proizvoditel'nost' harvesterov na sploshnyh rubkah* [Productivity of harvesters in clear cuttings] // Resources and Technology. 2012. No 9(2). pp. 82–93. In Russian
- Evseeva N.S., Romashova T.V. *Opasnyye meteorologicheskiye yavleniya kak sostavnaya chast' prirodnogo riska (na primere yuga Tomskoy oblasti)* [Hazardous meteorological phenomena as an integral part of natural risk (for example, the south of the Tomsk region)] // Tomsk State University Bulletin. 2011. No 353. pp. 199–204. In Russian
- Zhuravlev G. G., Gorbatenko V. P., Tunaev E. L. *Meteli na territorii Tomskoy oblasti* [Snowstorms of the Tomsk region] // Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory. 2019. No 594. pp. 137–151. In Russian
- Ignat'eva A.V., Knaub R.V. *Prirodnye usloviya razvitiya chrezvychaynykh situatsiy na territorii Sibirskogo Federal'nogo okruga* [Natural conditions of development of emergency situations in the territory of the Siberian Federal District] // Geosphere Research. 2020. No 1. pp. 66–77. DOI: 10.17223/25421379/14/5. In Russian
- Katkova T.E. *Razvitie teorii i metodov risk-menedzhmenta v lesnom khozyaystve* [Development of the theory and methods of risk management in forestry] // Bulletin of the Mari State Technical University. Series "Economics and Management". 2011. No 7(80). pp. 68–72. In Russian
- Katkova T.E. *Riski v lesnom khozyaystve: sushchnost' i vidy v sovremennykh usloviyakh khozyaystvovaniya* [Risks in forestry sector: the essence and types in modern economic conditions] // Issues of risk analysis. 2013. V. 10. No 2. pp. 30–37. In Russian
- Kochurov B. I. *Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie* [Ecodiagnosics and balanced development] M.: Smolensk: Madzhenta, 2003. 384 p. In Russian
- Korshunov A.A., Shaymardanov M.Z., Shaymardanova I.L. *Gidrometeorologicheskaya bezopasnost' i ustoychivoe razvitie ekonomiki Rossii dlya obsluzhivaniya potrebiteley: rezul'taty statisticheskogo analiza opasnykh usloviy pogody* [Hydrometeorological safety and sustainable development of Russian economy for customer service: statistical analysis results of dangerous weather conditions] // Trudy VNIIGMI-MTsD. V. 174. URL: <http://meteo.ru/publications/112-trudy-vniigmi/349-trudy-vniigmi-mts-d-vypusk-174-2010-g>. Date accessed: 15.02.2020. In Russian
- Lesnoy plan Tomskoy oblasti na 2019–2020 gody* [Forest plan of the Tomsk region for 2019–2020]. Tomsk, 2018. 102 p. URL: <https://depl.tomsk.gov.ru/documents/front/view/id/11898>. Date accessed: 12.01.2020. In Russian
- Lukashevich V.M. *Obosnovanie perioda raboty lesosechnykh i lesotransportnykh mashin s uchetom sezonnosti lesozagotovok* [Justification of the period for operation of logging and forest transport machines seasonally adjusted of the timber harvesting]. Petrozavodsk: PetrGU, 2013. 105 p. In Russian
- Moiseev N.A. *Ekonomicheskaya otsenka stikhiynykh i tekhnogennykh vozdeystviy na sostoyanie i resursnyy potentsial lesnykh ekosistem* [Economic assessment of natural and technogenic impacts on the state and resource potential of forest ecosystems] // Forestry. 2009. No. 6. pp. 5–8. In Russian
- Mel'nik M.A., Volkova E.S. *Kompleksnaya kharakteristika faktorov, limitiruyushchikh transportnyuyu dostupnost' ot dalennykh i trudnodostupnykh territoriy Tomskoy oblasti* [Complex characteristic of factors limiting transport accessibility of distant and remote areas of the Tomsk region] // Bulletin of Kemerovo State University Series: Political, Sociological and Economic Sciences. 2017. No 4. pp. 48–53. In Russian
- Mel'nik M.A., Volkova E.S., Bissirova E.M., Krivets S.A. *Otsenka ekologo-ekonomicheskogo ushcherba lesopol'zovaniyu, vyzvanogo invaziei ussuriyskogo poligrafa v temnokhvoynye ekosistemy* [Assessment of the ecological and economic damage to forest use caused by the invasion of the four-eyed bark beetle into dark coniferous ecosystems in Siberia] // Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii. 2018. Is. 225. pp. 58–75. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.58-75. In Russian
- Mel'nik M.A., Mel'nik S.A. *Sil'nyy veter kak opasnyy faktor dlya lesopol'zovaniya v yuzhno-taеzhnoy zone Zapadnoy Sibiri* [Strong wind as factor of hazards for forest management in the southern taiga zone of Western Siberia] // Interekspo GEO-Sibir'-2016. Novosibirsk: SGUGiT. 2016. V. 3. No 3. pp. 105–109. In Russian
- Mokhirev A.P., Goryaeva E.V., Mokhirev M.P., Ivshina A.V. *Planirovaniye srokov ekspluatatsii zimnykh lesovoznykh dorog na osnove analiza statistiki klimaticheskikh dannykh* [Planning the operation period of winter logging road based on analysis of climate statistics data] // Forest Engineering Journal. 2018. No 2 (30). DOI: 10.12737/article_5b2406187a0061.41499175. In Russian
- Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Guden' T.S. *Vliyaniye prirodno-proizvodstvennykh faktorov na transportnye zatraty lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Influence of natural industrial factors on the transport costs of forestry production industry] // Forest Engineering Journal. 2019. No 2. pp. 107–117. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/12. In Russian
- Osipov V. I. *Upravleniye prirodnymi riskami* [Natural risk management] // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 80. No 4. pp. 291–297. In Russian
- Perechen' i kriterii opasnykh prirodnnykh yavleniy, deystvuyushchie na territorii deyatelnosti FGBU «Zapadno-Sibirskoe UGMS»* [The list and criteria of natural hazards phenomena on the West-Siberian territory UGMS]. URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115>. Date accessed: 12.02.2020. In Russian

Petrov A.P., Melnish A., Taliyarov A., Naslund B.-A., Gustafson M. *Upravlenie lesami v perekhodnoy ekonomike (opyt reform v Rossii i stranakh Baltii): Uchebnoe posobie* [Forest management in a transition economy (experience of reforms in Russia and the Baltic countries)] Pushkino: Tekhno-Layt, 2001. 159 p. In Russian

Petrov V.N. *Organizatsiya, planirovaniye i upravleniye v lesnom khozyaystve: Uchebnoe posobie* [Organization, Planning and Management in Forestry]. St. Petersburg: Nauka, 2010. p. 416. In Russian

Sabirov A.A. *Problemy strakhovaniya riskov v sel'skom i lesnom khozyaystvakh ot stikhiynykh bedstviy* [Problems of risk insurance in agriculture and forestry against natural disasters] // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2014. V. 9. No 4(34). pp. 51–52. In Russian

Farber S.K., Sokolov V.A., Baranchikov Yu.N., Kondakov Yu.P. *Otsenka poteri drevesiny ot vspyshki sibirskogo shelkopryada v 90-kh godakh XX veka* [Estimation of the wood loss from the outbreak of the Siberian silkworm since the 90s of the XX century] // Forest inventory and forest management. 2003. V. 1 (32). pp. 138–142. In Russian

Filandysheva L.B., Soroka A.S. *Izucheniye ritmov zimnego sezona na yugo-zapade Zapadno-Sibirskoy ravniny v svete global'nykh izmeneniy klimata* [Study of winter season periods on south-west of the West Siberian Plain within global climate changes] // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2013. V. 18. No 2. pp. 710–714. In Russian

Shal'nev A.S., Alekseev A.V., Khakimullin A.R., Leont'ev E.V. *Ekonomicheskie aspekty analiza riskov v lesnom khozyaystve* [Economic aspects of risk analysis in forestry] // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute. 2016. No 1. pp. 31–40. DOI: 10.21178/2079-6080.2016.3.28. In Russian

Shikhov A.N. *Otsenka posledstviy stikhiynykh prirodnykh yavleniy dlya lesnykh resursov Permskogo kraya po mnogoletnim ryadam dannykh kosmicheskoy s"emki* [Estimation of forest damage from natural disasters in Perm region using long-term series of space imagery] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. No 1. pp. 21–29. In Russian

Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. *Tekhnicheskoe osnashcheniye sovremennykh lesozagotovok* [Technical rigging of modern timber harvesting]. St. Petersburg: PROFI-INFORM, 2005. 344 p. In Russian

Aukema J.E., Leung B., Kovacs K., Chivers C., Britton K.O., Englin J., Frankel S.J., Haight R.G., Holmes T.P., Liebhold A.M., McCullough D.G., Von Holle B. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. PLoS ONE. 2011. V. 6. Iss. 9. pp. 1–7.

Blennow K., Andersson M., Sallnäs O., Olofsson E. Climate change and the probability of wind damage in two Swedish forests // Forest Ecology and Management. 2010. V. 259. Iss. 4. pp. 818–830. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.004>.

Brunette M., Holec J., Sedliak M., Tucek J., Hanewinkel M. An actuarial model of forest insurance against multiple natural hazards in fir (*Abies Alba* Mill.) stands in Slovakia // Forest Policy and Economics. 2015. V. 55. pp. 46–57.

Kenis M., Auger-Rosenberg M.-A., Roques A., Timms L., Péré C., Cock M.J.W., Setelle J., Augustin S., Lopez-Vaamonde C. Ecological effects of invasive alien insects // Biological Invasions. 2009, V. 11. Iss. 9. pp. 21–45.

Naderpour M., Mojaddadi Rizeei H., Khakzad N., Pradhan B. Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies // Reliability Engineering & System Safety. 2019. V. 106558. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106558>.

Neale T., Weir J.K., McGee T.K. Knowing wildfire risk: Scientific interactions with risk mitigation policy and practice in Victoria, Australia // Geoforum. 2016. V. 72. pp. 16–25.

Nilsson C., Stjernquist I., Barring L., Schlyter P., Jönsson A.M., Samuelsson H. Recorded storm damage in Swedish forests 1901–2000 // Forest Ecology and Management. 2004. V. 199. Iss. 1. pp. 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.031>

Peltola H., Ikonen V.P., Gregow H., Strandman H., Kilpeläinen A., Venäläinen A., Kellomäki S. Impacts of climate change on timber production and regional risks of wind-induced damage to forests in Finland // Forest Ecology and Management. 2010. V. 260. Iss. 5. pp. 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.001>.

Author's:

Melnik M.A., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Laboratory of Self-organizing Geosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: melnik-m-a@yandex.ru

Volkova E.S., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of Self-organizing Geosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: elevolko@yandex.ru

Melnik S.A., Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of Forestry and Landscape Construction National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: melnik-sergej@yandex.ru

УДК 911.9

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБРЕЖНЫМИ РЕКРЕАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИЯМИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Ю. Санин, В.А. Кулаковская



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Эффективное управление природопользованием в прибрежных рекреационных территориях невозможно без учета интересов как рекреантов, так и местных жителей. Особую важность представляют природные характеристики региона: климатические, геоморфологические и др., а также характерные неблагоприятные и опасные явления природы, «набор» которых индивидуален для каждой прибрежной территории. Для некоторых из них в статье перечислены и охарактеризованы неблагоприятные и опасные явления природы, предложены меры для противодействия им. Перечисленные выше факторы определяют величину рекреационного потенциала. Приводится его оценка в баллах для некоторых прибрежных территорий России. Величина рекомендованного потенциала должна учитываться в управлении природопользованием на прибрежных территориях. Те из них, которые обладают высоким рекреационным потенциалом, представляют наибольшую ценность для туризма, который в таком случае есть смысл рассматривать как приоритетный для них вид хозяйственной деятельности человека. Нерешенность ряда проблем природопользования в прибрежной зоне указывает на необходимость комплексного, системного подхода. Он находит отражение в так называемом морском пространственном планировании, а также в разработке комплексного управления прибрежной зоной для различных регионов, особенно для тех, на которых туризм и прочие виды хозяйственной деятельности человека характеризуются высокой интенсивностью.

Ключевые слова: прибрежные туристические территории, рекреационный потенциал территории, неблагоприятные и опасные явления природы, комплексное управление прибрежной зоной, морское пространственное планирование.

Введение

Российская Федерация обладает значительной по протяженности береговой линией. 22 субъекта РФ имеют выход к морю [Землянов и др., 2015], суммарная протяженность морских берегов составляет около 60 тыс. км [Айбулатов, 2005]. Однако лишь малый процент морских берегов используется для рекреационного природопользования.

В соответствии с Морской доктриной Российской Федерации, утвержденной Президентом Российской Федерации 26 июля 2015 г., выделяют четыре региональных направления морской политики (Морская доктрина..., 2015). Они ориентированы на различные моря, омывающие берега Российской Федерации, в прибрежной зоне которых расположены приморские субъекты РФ, в том числе и рекреационные территории:

1. Атлантическое направление (Краснодарский край, Республика Крым, Город федерального подчинения Севастополь, Ростовская область, Калининградская область, город Санкт-Петербург, Ленинградская область).

2. Каспийское направление (Астраханская область, Республика Калмыкия, Республика Дагестан).

3. Арктическое направление (Мурманская область, Республика Карелия, Архангельская область и др.).

4. Тихоокеанское направление (Сахалинская область, Приморский край, Камчатский край, Хабаров-

ский край, Магаданская область, Чукотский АО) [Ямкова, 2011].

Морская доктрина указывает на важность сохранения морских природных систем и рационального использования их ресурсов, что актуализирует рассмотренные в статье вопросы.

Существенным образом использование и морских берегов, и берегов внутренних водоемов ограничивают неразвитость рекреационной инфраструктуры и природные факторы, в частности рельеф. К геоморфологическим ограничениям рекреационного природопользования относится отсутствие пляжей на многих берегах и проблема доступа к водному объекту, обусловленные рельефом. Высокие, обрывистые берега нередко имеют значительную эстетическую ценность, однако купание в водоемах и принятие солнечных ванн здесь часто затруднено или вовсе невозможно [Бредихин, 2010; Игнатов и др., 2014]. Тем не менее во многих случаях обрывистый характер современного или древнего отмершего берегового уступа не является непреодолимым препятствием. Для таких участков берега обеспечивается возможность доступа к воде, в отдельных случаях отдыхающих транспортируют на судах. Примером берега с труднодоступными пляжами, которые характеризуются значительной эстетической ценностью, является мыс Фиолент, расположенный в пределах территории города федерального подчинения Севастополь в Крыму, а также так

называемые Серебряный и Золотой пляжи к востоку от Балаклавы (пригород Севастополя). До них возможно добраться рейсовыми катерами и частным морским транспортом, который выходит из Балаклавы.

В рамках управления морским природопользованием сочетаются или доминируют различные подходы в зависимости от временного характера самих управленческих решений [Землянов, 2015]. Для повышения эффективности управления прибрежными рекреационными территориями необходимо принимать во внимание их природные особенности. Важно учитывать интересы всех природопользователей, в том числе и рекреантов, как организованных, так и неорганизованных [Преображенский, 1975; Долотов, 1996 и др.]. Однако при этом нужно принимать во внимание и интересы местных жителей, и частного бизнеса, и государства, в частности региональных управленческих структур. Достижение баланса между интересами, часто противоречащими друг другу, всех перечисленных участников рекреационного природопользования – достаточно сложная задача.

В настоящее время для управления природопользованием прибрежными рекреационными территориями Российской Федерации характерно использование зарубежного опыта, концепций и разработок, например кластерного подхода [Дворцова, 2010; Дутова, 2010; Полянских, 2012; Шебзухова и др., 2014; Шильченко, 2015; Митина и др., 2018]. Однако в целом имеет место недостаточный учет природных характеристик территорий, «недостаточно комплексное и системное» управление природопользованием прибрежной зоны. В частности, слабо используются концепции комплексного управления прибрежными зонами [Сычев, 2006; Беликов и др., 2014; Фашук, 2015] и стратегии морского пространственного планирования [Фашук и др., 2015; Бакланов, 2018]. Они разработаны лишь для некоторых прибрежных приморских туристических территорий и практически не внедряются на практике. Применение зарубежного опыта в управлении прибрежными рекреационными территориями Российской Федерации сопровождается рядом трудностей. Они связаны с физико-географическими и экономико-географическими особенностями самих территорий. К ним относится огромная протяженность морского побережья и малый процент берегов, используемых для рекреации, а также широкое распространение неорганизованной рекреации, последствия недавнего перехода от социалистической к рыночной экономике и некоторые другие.

Необходимость применения зарубежного опыта особенно велика для российского побережья Черного моря, наиболее интенсивно используемого для пляжно-купальной рекреации. Здесь актуально и развитие новых направлений туризма, в частности экологического, что позволит снизить нагрузки на

природные ландшафты, и внедрение системного подхода в управлении природопользованием, и кластеризация региона, которая для отдельных прибрежных туристических регионов уже имеет место.

В последнее время актуальным направлением в экономике природопользования является количественная оценка геоэкологических услуг, оказываемых природными системами. Рекреационная услуга – одна из них, она оценивается достаточно часто.

Прибрежная зона (в ее узком понимании) занимает достаточно небольшой процент территории, что часто делает возможным ее использование исключительно в туристических целях без значительного ущерба для других видов хозяйственной деятельности. Понимание «приоритетности» использования подходящих для рекреации прибрежных территорий именно для рекреационных целей еще с конца XX в. возрастает как за рубежом, так и на территории России [Долотов, 1996]. В последние месяцы (лето 2020 г.) приоритетность использования прибрежной зоны для рекреации возрастает в связи с пандемией COVID-19, что повлекло активизацию внутреннего туризма, в частности пляжно-купальной рекреации в России. Так как морских побережий, благоприятных для развития приморского туризма, в России не так много, то рекреационный тип использования является для них одним из самых приоритетных.

Важным основанием для приоритетности рекреационной деятельности является ее мультипликативный эффект для экономики страны в целом и конкретных регионов в частности.

Мультипликативный эффект проявляется в формировании и функционировании туристических кластеров. Под кластером, по Монфорду, понимают группу туристских аттракций на ограниченной географической территории, обеспеченную высоким уровнем развития инфраструктуры и сервиса. Они имеют налаженные социальные и политические связи, а также отлаженное управление в компаниях, образующих сети по производству туристских услуг, обеспечивающих стратегические конкурентные и сравнительные преимущества. Так, Т.Н. Шильченко рассматривает туристский кластер как группу компаний и институтов, которые выпускают туристский продукт или группу продуктов [Шильченко, 2015]. Согласно другому определению, которое было сформировано Е.А. Полянских, под туристическим кластером понимают совокупность взаимосвязанных организаций, занимающихся разработкой, производством, продвижением и продажей туристического продукта, а также деятельностью, смежной с туризмом и рекреационными услугами [Полянских, 2012].

Рекреационная деятельность становится основной специализацией ряда небольших стран с населением до нескольких миллионов человек (Монако,

Кипр, Черногория, Доминиканская республика, Мальдивские острова и др.). В более крупных странах рекреационная специализация становится основной для некоторых природных регионов или административно-территориальных единиц. К ним относятся Лазурный берег во Франции, штат Гоа в Индии, острова Бали в Индонезии и Хайнань в Китае, город и остров Пхукет в Таиланде, острова Зеленого Мыса в Португалии, ряд греческих островов, например Крит, Родос, Кос и др., значительная часть Крыма и северокавказское побережье в России, Юрмала в Латвии и многие другие. Часто и для более крупных стран туристическая отрасль также играет существенную роль для экономики страны в целом (Тунис, Гамбия, Кения, Танзания, Таиланд, Куба, Испания, Греция, Грузия, Хорватия и т.д.). Разумеется, для крупных стран с большим абсолютным ВВП, к которым относится и Россия, туризм не может играть ключевую роль в экономике. Несмотря на свои необъятные пространства и разнообразные природные и историко-культурные достопримечательности, Россия получает только 2 % своего ВПП от туризма. Для сравнения, Хорватия зарабатывает на туризме почти 20 % ВВП, Испания – 18 %, а Австрия – 15 % [Шильченко, 2015]. В настоящее время (апрель–октябрь 2020 г.) в связи с пандемией коронавирусной инфекции в мире впервые со Второй мировой войны международные туристические перевозки практически полностью сошли на нет. Однако есть все основания ожидать, по крайней мере, частичного их восстановления через какое-то время.

Целью данного исследования является обзорная характеристика прибрежных рекреационных территорий Российской Федерации.

К задачам исследования относятся:

1. Выявление неблагоприятных и опасных явлений природы, свойственных таким территориям, изучение их влияния на туризм и их хозяйственную деятельность человека в целом.
2. Оценка рекреационного потенциала прибрежных туристических территорий.
3. Выявление проблем управления природопользованием в их пределах и поиск способов решения этих проблем.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются прибрежные туристические территории, на которых распространена массовая, так называемая пляжно-купальная рекреация.

К прибрежным территориям, которые массово посещаются туристами, относится меньшая часть прибрежных территорий Российской Федерации. В силу климатических условий и уровня развития туристической и прочей инфраструктуры большая

часть берегов не используется для массового туризма (как известно, отдельные рекреанты могут встретиться практически повсеместно, но в статье рассматривается массовая пляжно-купальная рекреация и регионы, для которых она характерна).

К прибрежным территориям, на которых в наибольшей степени развит пляжно-купальный туризм, в Российской Федерации относятся:

1. Черноморское побережье Кавказа.
2. Крым.
3. Восточное побережье Азовского моря.
4. Балтийское побережье в пределах Калининградской и Ленинградской областей.
5. Каспийское побережье (Лагерь и окрестности, побережье Дагестана).
6. Побережье Японского моря в пределах южной части Приморского края.
7. Берега рек, озер, водохранилищ, особенно в пределах крупных городов и их окрестностей [Санин, 2018].

Прибрежные туристические районы можно разделить на две категории.

1. Прибрежные морские туристические районы. Их в России не так много, ведь большая часть российских морских побережий в силу климатических условий, неразвитости инфраструктуры и по иным причинам слабо используется в туристических целях, в частности для прибрежно-морской рекреации. Прибрежные морские туристические районы можно разделить на две подгруппы.

Первая подгруппа включает наиболее популярные туристические районы, к числу которых относятся Южный берег и некоторые другие участки берега Крыма, побережье Японского моря в окрестностях Владивостока и Черноморское побережье Кавказа от Анапы до границы с Абхазией. Вторая подгруппа включает в себя курорты, которые имеют среднюю популярность среди рекреантов. Это азовское побережье в пределах Российской Федерации, Таманский полуостров, все остальные участки побережья Крыма, побережье (особенно в окрестностях Сестрорецка) Финского залива в пределах Ленинградской области, побережье Калининградской области (особенно в районе Светлогорска). Если ради отдыха на участках побережья первой подгруппы туристы едут и летят сотни и тысячи километров, то в регионах второй группы преобладают туристы из близлежащих населенных пунктов. Так, азовское побережье активно посещается жителями Ростова, побережье Финского залива – жителями Санкт-Петербурга и Ленинградской области, балтийское побережье в пределах Калининградской области – калининградцами.

Отдельно стоит выделить пока слабо используемое, но обладающее огромным потенциалом для пляжно-купальной рекреации побережье Каспийско-

го моря в пределах Астраханской области, Калмыкии и Дагестана. На территории последнего побережье активно использовалось в рекреационных целях в советские годы, но поток рекреантов сошел на нет из-за роста нестабильности и террористической угрозы в 1990-е гг. и в начале XXI в. К настоящему времени, несмотря на сравнительную нормализацию обстановки, туристов здесь пока еще немного. Ситуация может измениться в связи с намечающимся перераспределением туристических потоков под влиянием эпидемии COVID-19.

2. Прибрежные территории внутренних водных объектов: рек, озер, водохранилищ.

Имеют место существенные отличия этих регионов друг от друга по ряду характеристик, в частности климатических (моря оказывают на климат куда более существенное влияние, чем даже наиболее крупные озера или водохранилища), набору неблагоприятных и опасных воздействий природы, восприятию со стороны рекреантов и местных жителей и т.д.

Как правило, если речь идет о прибрежном туризме, сразу же возникает ассоциация с морскими побережьями, а во многих случаях только с двумя регионами: Крымом и северокавказским побережьем России. Действительно, эти районы принимают значительное количество рекреантов, как организованных, так и неорганизованных. Так в 2016 г. Крым посетило 6 млн человек, Северный Кавказ – 11,6 млн [Беликов и др., 2016]. Такая популярность во многом объясняется климатическими показателями: числом дней с температурой воды выше 20°, продолжительностью солнечного сияния, температурой воздуха и т.д. Важную роль играет и сравнительно развитая (особенно на многих участках кубанского побережья и на Южном берегу Крыма) рекреационная инфраструктура, и сложившиеся традиции отдыха, и сформировавшаяся репутация регионов.

Методы исследования

Для исследования популярных среди рекреантов прибрежных приморских территорий целесообразно применять сравнительно-описательный метод. В их физико-географической и экономико-географической характеристике можно выявить сходства и различия, что способствует их изучению и пониманию.

Динамика берегов изучается в ходе полевых работ с применением методов математического моделирования. Оно позволяет оценить потенциальные негативные последствия динамических процессов (аккумулятивных и особенно абразионных), собственных берегам. Методы математического моделирования для изучения динамики берегов применялись для некоторых прибрежных туристических территорий, в частности берегов Онежского озера, берега Крыма в районе Керчи и т.д.

Для оценки рекреационного потенциала территорий был применен метод балльной оценки. Это один из широкой группы оценочных методов, широко используемый в рекреационной географии. Оценка в методологическом плане представляет собой способ установления значимости чего-либо для действующего и познающего субъекта [География туризма..., 2014]. Балльная оценка предполагает определение частных оценок для разных параметров исследуемого объекта с последующим расчетом интегральной, обобщающей оценки для него (в нашем случае – для рекреационного региона). Для этого чаще всего применяется метод суммирования частных оценок с учетом коэффициентов их значимости, что было применено и в данной работе. Предварительно для облегчения процесса получения балльных оценок применялись социологические методы, в частности анкетирование. На примере Западного и Южного Крыма также были показаны внутрирегиональные различия в балльной оценке на качественном уровне.

Климатические показатели для приморских территорий, как правило, сравнительно однородные, если брать берег длиной десятки, а иногда даже первые сотни километров, хоть в некоторых случаях микроклиматические особенности могут вносить в рекреационный потенциал свои коррективы. Рельеф же, в частности степень изрезанности территории, средние уклоны, высота берегового уступа в случае его наличия и степень ограниченности доступа к воде, меняется даже в пределах небольшого участка берега, что определяет внутренние различия в рекреационном потенциале. Разнообразие рельефа его повышает, однако часто рельеф существенно снижает доступность рекреационного объекта и затрудняет его хозяйственное освоение, что, напротив, снижает его рекреационный потенциал.

Также был применен метод типологии и классификации (в том числе и выше, при описании объекта исследования). В учебнике [География туризма..., 2014] авторы поясняют, что классификация – это метод научного исследования и обобщения, суть которого заключается в том, что изучаемые объекты, явления или процессы упорядочиваются в определенные группы (классы) на основе каких-либо избранных признаков. Классификация и типология – два родственных понятия.

Результаты и их обсуждение

Неблагоприятные и опасные явления природы, характерные для прибрежных рекреационных территорий. Некоторые опасные явления природы являются особенностью именно прибрежных рекреационных территорий и свойственны исключительно им, например абразионные процессы. Другие опас-

ные явления природы характерны для горных (а некоторые и для равнинных) районов в целом например обвалы, землетрясения, лавины, сели. Они проявляются в том числе и в прибрежных туристических регионах с горным рельефом, существенно осложняя их хозяйственное освоение. Более того, их

воздействие приводит к значительному материальному ущербу, создает угрозу для здоровья и даже жизни как рекреантов, так и местных жителей.

Неблагоприятные и опасные явления природы, типичные для прибрежных туристических регионов России, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Неблагоприятные и опасные явления природы, свойственные прибрежным морским территориям России

Table 1

Adverse and dangerous natural phenomena peculiar to the coastal marine territories of Russia

Прибрежно-морской район России	Неблагоприятные и опасные явления, характерные для Региона	Возможные меры противодействия опасным явлениям природы для минимизации ущерба от них
Южный берег Крыма	Обвалы, оползни, сели, шторма, абразионные процессы	Минимизация хозяйственного использования участков берега с наиболее активным проявлением перечисленных процессов (в частности, избегание капитального строительства на нем), создание берегоукрепительных сооружений
Западный берег и все остальное побережье Крыма	Шторма, оползни, абразионные процессы	Минимизация хозяйственного использования участков берега с наиболее активным проявлением перечисленных процессов, создание искусственных пляжей для защиты берегов от воздействия волн
Черноморское побережье Кавказа	Сели, снежные лавины, оползни, абразионные процессы, ливневые осадки, смерчи, наводнения, нагоны в устьях крупных рек. Оползневые процессы особенно активно проявляются в южной части Большого Сочи, где пораженность склонов оползнями достигает 50–80 % [Мальнева, 2019]. Оползни и сели часто активизируются вследствие хозяйственной деятельности человека. К причинам их активизации относится вырубка лесов, «подрезка» склонов при строительных работах и т.д.	Ограничение строительства в долинах балок, для которых сели свойственны в наибольшей мере, информирование населения о мерах безопасности при лавинах и борьба с ними на тех участках, на которых они угрожают жизни и здоровью людей, зданиям и сооружениям
Азовское побережье	Сгонно-нагонные явления, абразионные процессы, штормовые явления	Соблюдение мер безопасности для избегания человеческих жертв во время штормов, минимизация использования наиболее опасных участков, укрепление берега, в том числе и при помощи создания искусственных пляжей
Каспийское побережье	Изменение уровня моря, штормовые ветра, абразия. Сгонно-нагонные явления, штормовые явления, колебания уровня моря. Размах колебаний уровня за последние 100 лет достиг нескольких метров [Айбулатов, 2005], что затрудняет строительство на берегу (вследствие колебаний уровня моря положение береговой линии существенно меняется)	Соблюдение мер безопасности для избегания человеческих жертв во время штормов, минимизация использования наиболее опасных участков, укрепление берега, в том числе и при помощи создания искусственных пляжей. Минимизация капитального строительства у уреза водоема в связи с изменчивостью положения береговой линии моря в средние и долгосрочном периоде
Балтийское побережье в Калининградской и Ленинградской области	Сгонно-нагонные явления, штормовые ветра, абразионные процессы	Создание защитных дамб для наиболее важных участков (что было сделано для акватории, примыкающей к Санкт-Петербургу), соблюдение мер безопасности для избегания человеческих жертв во время штормов, минимизация использования наиболее опасных участков, укрепление берега, в том числе и при помощи создания искусственных пляжей
Побережье Японского моря в районе Владивостока	Цунами, штормовые ветра, абразионные процессы	Поддержание в рабочем состоянии системы предупреждения населения о приближении цунами и информирование о порядке действий в этом случае, берегоукрепительные работы при необходимости, соблюдение мер безопасности для избегания человеческих жертв во время штормов, минимизация использования наиболее опасных участков

Необходимо отметить опасные явления природы, свойственные черноморскому побережью Кавказа и Крыму. Данные два региона посещаются 15–17 млн

организованных и неорганизованных туристов, из которых большинство все время своего отдыха или его часть проводят на море. Рельеф данного побере-

жья характеризуется высоким разнообразием. Значительная часть побережья относится к горным территориям, для которых характерно большее разнообразие неблагоприятных и опасных явлений природы (НОЯ). Наибольшую угрозу представляют абразионные процессы, оползни, обвалы, сели, наводнения. Сильные землетрясения случаются достаточно редко, но даже слабые, едва ощутимые землетрясения могут спровоцировать обвалы, оползни и лавины. Интенсивность опасных явлений природы на северокавказском побережье увеличивает и значительное количество осадков, до 3 000 мм, не характерное для любой другой прибрежно-рекреационной территории. Для региона типичны грозы, которые в некоторых случаях сопровождаются смерчами, в том числе и на пляжной зоне, что представляет непосредственную угрозу для здоровья и жизни отдыхающих и местных жителей. Следствием обильных осадков являются наводнения, во время которых вода затапливает жилые здания и сооружения, дороги, серьезно повреждая их, приводят как к человеческим жертвам, так и материальному ущербу. Сильные наводнения, как правило, бывают на реках каждые два-три года, раз в 7 лет они приобретают катастрофический характер.

Так, в результате сильного наводнения осенью 2018 г. южнее города Туапсе на участке побережья между железнодорожными станциями Шепси и разъезд Водопадный были повреждены железнодорожная и автомобильная дорога, вследствие чего город Сочи оказался отрезанным от остальной территории Краснодарского края.

Часть неблагоприятных и опасных явлений природы, например абразионные процессы, характерны для большинства прибрежных рекреационных территорий, есть НОЯ, которые встречаются только на некоторых участках берега, что во многом объясняется различным рельефом и климатом территорий. Для горных побережий характерны склоновые процессы, сели, в некоторых случаях – сейсмическая угроза, что не свойственно равнинным территориям. На перечень опасных явлений природы оказывают влияние климатические особенности, в частности сила и повторяемость ветров определенных направлений, а также конфигурация береговой линии. Перечисленные факторы являются причиной сгонно-нагонных явлений в Финском заливе, в Каспийском и Азовском морях. Особенность Дальневосточного региона – вероятность прихода цунами на берег.

Негативные последствия неблагоприятных и опасных явлений природы. Опасность неблагоприятных и опасных явлений состоит в нанесении как прямого, так и косвенного ущерба. Он включает следующие компоненты:

1. Гибель или причинение вреда рекреантам и местным жителям.

2. Материальный ущерб для инфраструктуры.

3. Ущерб для репутации региона. Это можно отнести к косвенному вреду от опасных явлений природы, который оказывает существенное влияние на репутацию рекреационного региона, и в определенных случаях значительно уменьшают поток рекреантов. Так, землетрясение и последующее цунами в Юго-Восточной Азии в 2004 г. весомо сократили поток рекреантов в данный регион, что ощущалось еще в течение как минимум нескольких лет.

4. Временное ухудшение транспортной доступности региона. В пример можно привести уже упомянутое выше наводнение в Туапсе в 2018 г., которое привело к разрушению как автомобильной, так и железной дороги, соединяющей Туапсе и Сочи. Еще один пример – так называемая Военно-Грузинская дорога, соединяющая Владикавказ и Тбилиси, которую часто перекрывают оползни, обвалы, лавины и снежные заносы, что приводит к ее закрытию для всех видов автотранспорта, иногда на несколько дней и более.

Меры по противодействию неблагоприятным и опасным явлениям природы. Для большинства рекреационных прибрежных районов меры противодействия неблагоприятным и опасным явлениям аналогичны или отчасти похожи. Многие из указанных мер актуальны для всех перечисленных выше регионов:

1. Минимизация (по возможности) хозяйственного использования участков побережья, для которых опасные процессы выражены лучше всего. К ним относятся, например, днища балок, особенно их устьевые части, выходящие к морскому побережью (именно в такой части Широкой балки случилась катастрофа в 2002 г.) или участки берега с активными абразионными процессами. К таким участкам можно отнести и оползневые склоны (активность оползней в прибрежной зоне даже проявляется в топонимике, например в Крыму есть село Оползневое на Южном берегу).

2. Информирование рекреантов и местных жителей об опасностях, связанных с неблагоприятными и опасными явлениями природы.

3. Противодействие опасным явлениям природы на самых привлекательных для рекреации участках берега: берегоукрепительные работы, противооползневые меры и т.д.

Результаты балльной оценки рекреационного потенциала прибрежных туристических территорий. Балльная оценка рекреационного потенциала приводится в табл. 2. Она осуществляется по четырем критериям: репутация в качестве морского курорта, степень опасности от неблагоприятных и опасных явлений природы, природный рекреационный потенциал и уровень развития рекреационной инфраструктуры.

В соответствии с принятой методикой, по каждому из этих критериев была получена частная

оценка. Для получения оценки использовались литературные сведения об изучаемых регионах, результаты опросов потенциальных туристов об их предпочтениях, анализировался личный опыт

авторов. На основании суммирования частных критериев с учетом коэффициента значимости для каждого из регионов была получена интегральная, итоговая оценка.

Таблица 2

Балльная оценка прибрежных рекреационных территорий (от 1 до 10 баллов)

Table 2

Score for coastal recreational areas (from 1 to 10 points)

Прибрежно-морской регион России	Репутация в качестве морского курорта (коэффициент значимости – 0,8)	Степень опасности от неблагоприятных и опасных явлений природы (коэффициент значимости – 0,7)	Природный рекреационный потенциал (коэффициент значимости – 1,2)	Уровень развития рекреационной инфраструктуры (коэффициент значимости – 1,4)	Итоговая оценка
Южный берег Крыма	7	–8	8	8	21
Западный берег и все остальное побережье Крыма	5	–7	5	5	13,9
Черноморское побережье Кавказа	8	–8	8	9	23
Азовское побережье	5	–6	4	4	10,2
Каспийское побережье	2	–5	6	2	8,1
Балтийское побережье в Калининградской и Ленинградской области	3	–5	4	6	12,1
Побережье Японского моря в районе Владивостока	4	–7	8	4	13,5

Для многих рекреантов, в том числе для значительной части неорганизованных туристов, наибольшую важность играет уровень развития рекреационной инфраструктуры: уровень комфорта мест размещения (даже в случае, если это комнаты в частных домах), экскурсии, развлечение, комфортность транспорта и т.д. Именно по причине низкого, по их мнению, уровня развития рекреационной инфраструктуры в российских прибрежных туристических территориях многие рекреанты предпочитают отдых за рубежом. Также очень важную роль, особенно для неорганизованных туристов, играет и природный рекреационный потенциал территории, в некоторых случаях они могут даже игнорировать остальные факторы, если он высокий. Определенную роль, безусловно, играет сложившаяся репутация региона, которая притягивает или, напротив, отталкивает. Что касается НОЯ, туристы, как правило, недооценивают связанные с ними угрозы, однако принимают во внимания те их них, которые снижают качество отдыха (сильная жара, шторма и т.д.).

Полученная оценка во многом представляется упрощенной. Она учитывает лишь важнейшие критерии, но не берет во внимание внутрорегиональные различия, которые для части параметров по некоторым регионам довольно существенны. Например, на Южном берегу Крыма уровень развития инфраструктуры на участке Форос-Алушта (главным обра-

зом, это территория Большой Ялты) существенно выше, чем на побережье между Алуштой и Феодосией, что влияет на суммарную балльную оценку (рис. 1). Что касается остального побережья Крыма (кроме Южного), то по уровню развития рекреационной инфраструктуры и репутации в качестве морского курорта здесь заметно выделяется Евпатория. Если говорить о природном потенциале побережья Балтийского моря, то здесь необходимо отметить Куршскую косу, которая внесена в перечень объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО (правда, не как природный, а как историко-культурный объект). Выполненная балльная оценка позволяет сравнить приморские территории по их ценности в качестве объектов рекреации и объяснить предпочтения рекреантов.

Для прибрежных рекреационных регионов характерны заметные внутренние различия балльной оценки рекреационного потенциала региона. Они вызваны различными значениями факторов, которые его определяют, как показано на примере Южного и Западного Крыма (см. рис. 1). Так, природный рекреационный потенциал в целом больше у Южного берега Крыма, чем у Западного. В свою очередь, внутри и Южного, и Западного берега Крыма уровень развития рекреационной инфраструктуры сильно различается. Это, естественно, определяет различия в значениях балльной оценки для названных побережий.

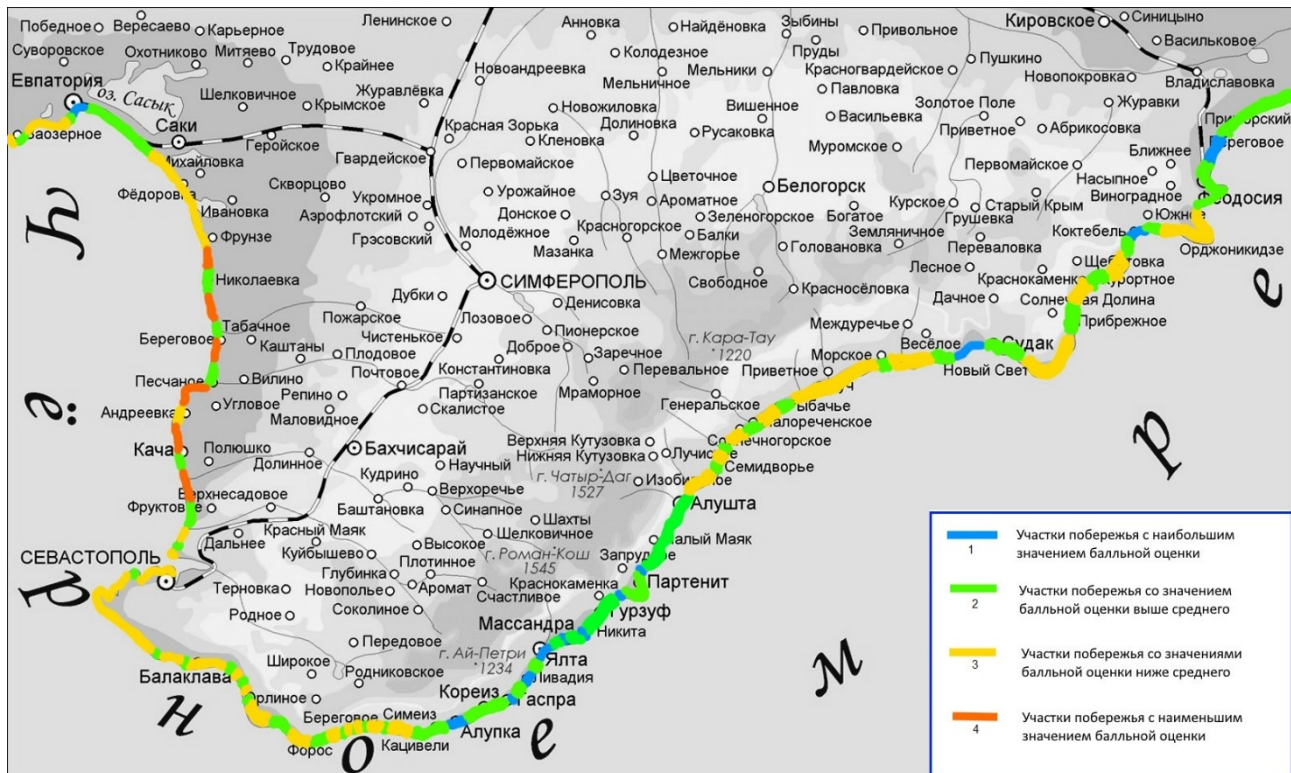


Рис. 1. Внутренние различия в балльной оценке Южного и Западного Крыма

1 – участки побережья с наибольшим значением балльной оценки; 2 – участки побережья со значением балльной оценки выше среднего; 3 – участки побережья со значением балльной оценки ниже среднего; 4 – участки побережья с наименьшим значением балльной оценки

Fig. 1. Internal differences in the scores of the Southern and Western Crimea

1 – sections of the coast with the highest score; 2 – sections of the coast with a score above the average; 3 – sections of the coast with a score below the average; 4 – sections of the coast with the lowest score

Балльная оценка рекреационных территорий прибрежных районов России отражает общую привлекательность территорий с горным рельефом для рекреантов, несмотря на большую активность неблагоприятных и опасных явлений природы в их пределах, что изначально объяснялось их большей привлекательностью для туристов, к которой добавилась и более высокий уровень развития рекреационной инфраструктуры. Исключением здесь является каспийское побережье, которое, как и побережья Крыма, в южной части характеризуется горным рельефом, но при этом сравнительно малопривлекательно для туристов, что объясняется сохраняющимися опасениями террористической угрозы и слабым уровнем развития рекреационной инфраструктуры.

Уровень рекреационного потенциала во многом также определяется уровнем развития инфраструктуры, который также зависит от природных факторов. В свою очередь, природные факторы, геоморфологические и климатические, определяют набор неблагоприятных и опасных явлений природы, свойственных для данного региона, их частоту повторяемости и интенсивность. Этим отчасти определяется

размер материального ущерба, а также количество погибших и пострадавших в случае реализации сценария возникновения тех или иных опасных явлений природы.

Для существующих рекреационных регионов перенос тех или иных объектов рекреационной инфраструктуры (зданий, путей сообщения и т.д.) на участки с наибольшим рекреационным потенциалом часто не имеет смысла. Затраты на этот перенос во многих случаях ожидаются заметно выше возможной прибыли от их использования. Однако при освоении новых рекреационных территорий в первую очередь следует осваивать те участки берега, рекреационный потенциал которых наибольший.

К прибрежным территориям, рекреационный потенциал которых в настоящее время используется слабо, можно отнести черноморское побережье Кавказа к северу от Туапсе, азовское побережье в пределах России, практически все каспийское побережье в пределах РФ, некоторые участки берега Крыма и др. Частичное перенаправление на эти регионы (а также на берега внутренних водоемов) имеющихся туристических потоков позволит не-

сколько уменьшить нагрузку на рекреационные ресурсы наиболее популярных для отдыха участков побережья, в частности Южного берега Крыма и северокавказского побережья от Туапсе до Адлера, даст мощный импульс развития новым рекреационным регионам, позволит повысить численность внутренних рекреантов за счет снижения стоимости их отдыха (при наличии большего числа рекреационных районов возможно выбрать для отдыха ближайший из них, что может снизить временные и материальные затраты на путь к месту отдыха).

В настоящее время для того, чтобы добраться до вышеуказанных рекреационных районов, туристы во многих случаях затрачивают более двух дней. Выбор авиационного транспорта часто подразумевает значительные финансовые затраты, что вынуждает рекреантов отказываться от их посещения или делать их более редкими или менее продолжительными по времени. Именно для новых, слабо освоенных и неосвоенных в рекреационном отношении приморских территорий важно выявить участки с наибольшим значением рекреационного потенциала для их первоочередного освоения, что позволит перераспределить туристические потоки.

Кластерный подход в управлении прибрежными рекреационными территориями и причины его актуальности. В настоящее время наметилась отчетливо выраженная кластеризация экономики прибрежных туристических регионов в мире в целом и в России в частности. К важнейшим характеристикам формирующихся кластеров можно отнести виды рекреации, которые имеют в них место, а также соотношение между организованной и неорганизованной рекреацией.

Кластерный подход в изучении прибрежных рекреационных территорий приобретает популярность по ряду причин, некоторые из них рассмотрены ниже.

Во-первых, в большинстве прибрежных рекреационных районах фактически сформировались структуры, полностью или частично подпадающие под определения туристических кластеров и обладающие их чертами. В частности, большинство экономических субъектов, прямо или косвенно связанных с рекреационным природопользованием, понимают ценность взаимовыгодного сотрудничества друг с другом и активно его развивают. В качестве примера можно привести организацию трансфера из аэропорта или железнодорожного вокзала в дом отдыха транспортной компанией для организованных туристов или заказ такси владельцем мини-отеля для самостоятельного туриста, расположение кафе и столовых на территории предприятий, оказывающих услуги по размещению туристов.

Во-вторых, создание кластерных структур на территории тех прибрежных туристических регионов, в которых в настоящее время они только

формируются, позволит достичь большей эффективности в использовании ресурсов территории и повысить уровень комфортности отдыха для рекреантов. Кластеризация регионов даст возможность увеличить туристический поток, при этом воздействие на туристическую инфраструктуру, связанное с его ростом, будет смягчено. Создание туристических кластеров облегчит задачу равномерного распределения потоков рекреантов по побережью. Необходимость этого обусловлена чрезмерным воздействием на природные ландшафты в случае большой плотности туристов, а также обеспечения высокого комфорта их отдыха. В последнее время становится актуальным и противодействие распространению COVID-19, для чего также следует избегать больших скоплений рекреантов на малой площади.

Только на территории Крыма в рамках Федеральной целевой программы «Социально-экономическое развитие Республики Крым и города Федерального значения Севастополя до 2020 года» планируется создание 11 туристических кластеров [Митина, 2018]. Они предполагаются на Южном берегу, Керченском полуострове и на Западном побережье. Появление и развитие имеющихся туристических кластеров имеет место во многих перечисленных выше прибрежных морских рекреационных регионах. Кроме Крыма и Кавказа к ним относятся побережья около Калининграда и Владивостока [Шильченко, 2015]. В двух последних случаях их формированию, безусловно, способствует режим свободных экономических зон. Впрочем, для некоторых регионов создание туристических кластеров сопряжено с большими трудностями. Например, для каспийского побережья в пределах Дагестана это связано с сильно преувеличенной в сознании потенциальных рекреантов угрозой терроризма, особенностями местной экономики, стереотипами по отношению к населению Дагестана и неразвитостью местной туристической инфраструктуры.

Системный подход в управлении природопользованием прибрежных рекреационных регионов

В настоящее время возрастает роль системного подхода в управлении природопользованием в прибрежной приморской зоне. Данный подход включает в себя:

1. Выделение для прибрежной зоны систем различных категорий, в частности береговых морфосистем (впервые выделенных Е.И. Игнатовым), рекреационно-геоморфологических систем (впервые выделенных А.В. Бредихиным), территориально-рекреационных систем (впервые выделенных В.С. Преображенским) и т.д. Выделение систем, которые представляют собой взаимосвязанные объекты и связи

между ними и обладают определенными пространственными границами, позволяет оценить их взаимоотношение с окружающей средой, друг с другом (как правило, прибрежная зона представляет собой совокупность различных систем, часто разных рангов). Системный подход дает возможность определить пространственные границы проявления того или иного воздействия человека на природу или наоборот. Разные системы фокусируют внимание исследователя и управленца на разные аспекты взаимоотношений природы и человека в природной зоне. Например, рекреационно-геоморфологические системы позволяют оценить все многообразие связей между характеристиками рельефа и рекреацией.

Другой тип систем – территориально-рекреационные – состоит из пяти взаимосвязанных компонентов: природные и культурные ресурсы территории, рекреанты, организаторы отдыха, рекреационная инфраструктура и орган управления [Преображенский, 1975]. На староосвоенных участках побережья территориально-рекреационные системы в виде, близком к современному, сформировались еще несколько десятилетий назад. Но они отличаются динамичностью, за это время большинство их компонентов претерпели значительные изменения, в частности орган управления или рекреанты. Для последних, как правило, неоднократно менялось соотношение между организованными и самостоятельными рекреантами, изменились география их прибытия, предпочтения, типы туризма, которые они выбирают. Некоторые типы туризма, например агротуризм, экотуризм и др., появляются лишь в последние десятилетия или сильно увеличили свою долю в туристическом потоке за это время. Заметные изменения претерпела и рекреационная инфраструктура, что во многом объясняется переходом от командно-административной к рыночной экономике и активным развитием малого и среднего бизнеса, а также проникновением крупного из других регионов России или из-за рубежа.

2. Внедрение системного, комплексного подхода непосредственно в процесс управления, что проявляется, в частности, в разработке и реализации концепций комплексного управления прибрежной зоной и во внедрении и реализации принципов Морского пространственного планирования. К 2004 г. около 120 стран разработали и использовали такую концепцию в управлении природопользованием для своих рекреационных и прочих прибрежных морских территорий [Дворцова, 2010]. Для некоторых прибрежных территорий России она также уже разработана, в частности для северокавказского побережья Черного моря [Сычев, 2006]. Здесь концепция особо актуальна в связи с высокой рекреационной нагрузкой на регион. Комплексное управление прибрежной зоной должно дополнить морское пространственное планирование.

Под последним понимают комплекс аналитических, расчетных и оценочных мероприятий, направленных на обоснование формирования и развития определенных видов хозяйственной деятельности и их сочетаний в том или ином районе (ареале) моря, океана [Бакланов, 2018].

Важную роль в мире в управлении природопользованием приморскими территориями играет и так называемая концепция больших морских экосистем. Большая морская экосистема – пространство, охватывающее морскую акваторию до бровки шельфов и внешней окраины водных масс, образуемых океаническими течениями, с площадью акватории от 200 тыс. км² и более. Большая морская экосистема характеризуется своими особенностями батиметрии, гидрографии, биогеографии, продуктивности, экологии и трофически взаимосвязанными популяциями. Данные системы выделяют для учета экосистемной динамики в крупных морских водных объектах и гармонизации различных видов морской деятельности. Концепция больших морских экосистем была разработана группой американских ученых под руководством К. Шермана в конце 1980-х гг. [Землянов И.В. и др., 2015]. Существуют карты, на которых весь шельф Мирового океана показан как совокупность больших морских экосистем, для мира их выделяют несколько десятков, в том числе и для российских морей.

Заключение

При управлении природопользованием в прибрежных рекреационных территориях должны быть учтены следующие факторы:

1. Физико-географические (климат, рельеф, ландшафты) и экономико-географическая характеристика района.
2. Неблагоприятные и опасные явления природы, их причины, характеристика и влияние на человека, статистика по ним за последние десятилетия и в районах с аналогичными физико-географическими условиями.
3. История развития берегов и их современная динамика, что необходимо для долгосрочного планирования рекреационной и иной деятельности на них.
4. Береговые морфосистемы и рекреационно-геоморфологические системы участка, а также территориально-рекреационные системы.
5. Структура природопользования района, его ключевые типы и взаимоотношения между ними.
6. Конфликты природопользования, характерные для изучаемой территории.
7. Сформированные или формирующиеся на этой территории туристические кластеры, их структура.
8. Соотношение организованной и неорганизованной рекреации в прибрежных туристических территориях.

Ключевыми мерами противодействия неблагоприятным и опасным явлениям природы для прибрежных рекреационных территорий являются информирование рекреантов и местных жителей о них, борьба с ними на наиболее ценных для рекреации и хозяйственного использования человеком в целом и избегание использования тех участков, на которых неблагоприятные и опасные явления природы проявляются наиболее интенсивно.

Актуальность перераспределения туристических потоков возрастает в связи с пандемией COVID-19, которая с большой долей вероятности спровоцирует рост внутреннего туризма, что прослеживается уже в текущем, 2020 г. Возможности для отдыха за рубежом резко уменьшаются из-за закрытия многих границ, отмены международных рейсов самолетов, поездов и автобусов, снижения дохода россиян, роста опасений за свое здоровье и здоровья близких, а также карантинных ограничений по возвращению и некоторых других причин. Однако отсутствие отдыха, особенно на морском побережье, негативно сказывается на работоспособности и здоровье людей; государство начало оказывать определенную поддержку внутреннему туризму. Все это может привести и уже приводит к интенсификации туристических потоков в прибрежные рекреационные территории. Увеличение количества туристов на побережье повлечет за собой как минимум три негативных последствия. Во-первых, это снижение комфортности отдыха из-за большого скопления туристов; во-вторых, угроза формирования новых очагов заболевания COVID-19 вследствие большого скопления людей, наконец, в-третьих, усиление воздействия на природные ландшафты и, тем самым, на рекреационный потенциал территории в целом.

Важным для управления природопользования представляется учет интересов всех участников рекреационной деятельности, в том числе самостоятельных рекреантов, процент которых после снятия ограничений, связанных с COVID-19, может увеличиться как в связи с ужесточением требований к от-

дыху организованных туристов, так и в связи со снижением доходов населения вследствие экономического кризиса, обусловленного пандемией.

Из зарубежного опыта в управлении природопользованием на прибрежных территориях наибольший интерес вызывают кластерный подход, системный подход, количественные оценки геоэкологических услуг, предоставляемых геосистемами (особенно морскими), приоритетность рекреационного природопользования для приморских территорий с высоким туристическим потенциалом. Представляется необходимым также применение наработок по морскому пространственному планированию и комплексному управлению прибрежными зонами в случаях, если они уже есть, и их разработка для тех приморских туристических территорий, для которых они еще не созданы.

Успешный опыт использования рекреационной отрасли для повышения благосостояния местных жителей и достижения роста в экономике за рубежом подталкивает к осознанию необходимости его внедрения в Российской Федерации. Проще всего это может быть реализовано для территорий, обладающих наиболее высоким рекреационным потенциалом; для них это представляется и наиболее актуальным. В свою очередь, на величину рекреационного потенциала важное влияние оказывают природные факторы (геоморфологический, климатический, ландшафтный и т.д.). Отдельные компоненты этих факторов, например уровень разнообразия ландшафтов, уклон берегового уступа, число солнечных дней в году, могут как повышать, так и снижать общий уровень рекреационного потенциала. Рекреационный потенциал складывается из многих составляющих, среди которых можно выделить репутацию территории в качестве места отдыха, уровень развития инфраструктуры, природный потенциал территории (ее природных ресурсов), интенсивность проявления неблагоприятных и опасных явлений и некоторые другие.

ЛИТЕРАТУРА

- Айбулатов Н.А.** Деятельность России в прибрежной зоне моря. М. : Наука, 2005. 363 с.
- Бакланов П.Я.** Морское пространственное планирование: теоретические аспекты // Балтийский регион. 2018. Т. 10, № 2. С. 76–85.
- Беликов М.Ю., Приходько А.В., Филобок А.А.** Приморские курортные центры юга России: взаимосвязь стратегий развития и комплексного управления прибрежными зонами // Материалы 25-й Международной конференции «Береговая зона – взгляд в будущее». Сочи, 2014. 224 с.
- Бредихин А.В.** Рекреационные-геоморфологические системы. Смоленск : Ойкумена, 2010. 328 с.
- География туризма : учебник / В.И. Кружалин, Н.С. Мироненко, Н.В. Зигерн-Корн, Н.В. Шабалина.** М. : Федеральное агентство по туризму, 2014. 336 с.
- Дворцова Е.Н.** Прибрежные территории: зарубежный опыт хозяйственного освоения и управления // Российский внешне-экономический вестник. 2010. № 7. С. 13–18.
- Долотов Ю.С.** Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей Мирового океана. М. : Научный мир, 1996. 304 с.
- Дутова Т.И.** Формирование современного туристско-рекреационного кластера как способ повышения конкурентоспособности российской экономики и ее ресурсов // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. 2010. Т. 10, № 1. С. 98–106.
- Землянов И.В., Фашук Д.Я., Кочемасов Ю.В., Зацепя С.Н.** Морское природопользование: концепция, современные проблемы и пути их решения // Известия РАН. Серия географическая. 2015. № 1. С. 21–34.

Игнатов Е.И., Орлова М.С., Санин А.Ю. Береговые морфосистемы Крыма. Севастополь : ЭКОСИ Гидрофизика, 2014. 267 с.

Мальнева И.В. Активность селей и оползней на Черноморском побережье Кавказа и прилегающих горных районах в начале 21 века. URL: <https://docplayer.ru/31661558-Aktivnost-seley-i-opolznei-na-chernomorskom-poberezhe-kavkaza-i-prileg-yushchih-gornyh-rayonah-v-nachale-xxi-veka.html> (дата обращения: 14.03.2019).

Митина Н.Н., Паранина Т.О., Бруснигина С.Г. Развитие туристско-рекреационного потенциала республики Крым: новые вызовы и пути решения // Государственное управление. Электронный вестник. 2018. № 68. С. 172–194.

«**Морская** доктрина Российской Федерации», утверждена Президентом Российской Федерации 26.07.2015. URL: <https://ovmf2.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=130702150805643796311275326&cacheid=E44DB106F2DEC042137466DB95E26920&mode=splus&base=LAW&n=208427&rnd=51035D093765A98D86258442A59A229C#1jsmqm2ngh4> (дата обращения: 20.03.2020).

Полянских Е.А. Развитие туристической отрасли на основе кластерного подхода // Экономика и менеджмент: прошлое, настоящее, будущее : материалы междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск : Сибирская ассоциация консультантов, 2012. С. 166–170.

Преображенский В.С. Теоретические основы рекреационной географии. М. : Наука, 1975. 192 с.

Санин А.Ю. К вопросу об управлении рекреационным природопользованием в прибрежных туристических территориях Российской Федерации // Современные проблемы сервиса и туризма. 2018. № 12 (2). С. 45–58.

Сафарян А.А. Подходы к оценке туристического потенциала территории // Географический вестник. 2015. № 1 (32). С. 89–102.

Сычев С.Л. Комплексное освоение прибрежной зоны Черного моря – важнейший фактор ее устойчивого развития // Научная мысль Кавказа. Приложение. 2006. № 12. С. 40–55.

Фащук Д.Я., Землянов И.В., Кочемасов Ю.В., Зацепя С.Н. Морское природопользование: концепция, современные проблемы и пути их решения // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 1. С. 21–34.

Шебзухова Т.А., Киселева Н.Н., Санкин А.В. Формирование и развитие туристического кластера Северокавказского федерального округа // Сервис plus. 2014. № 1, т. 8. С. 101–107.

Шильченко Т.Н. Перспективы развития туристских кластеров РФ // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2015. № 1. С. 65–70.

Ямкова М.В. Анализ рекреационной деятельности на морских побережьях российской федерации // Ученые записки. Океанология. № 20. 2011. С. 162–171.

Авторы:

Санин Александр Юрьевич, кандидат географических наук, докторант, факультет государственного управления, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

E-mail: eather86@mail.ru

Кулаковская Валентина Андреевна, аспирант, факультет государственного управления, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

E-mail: ivanenko.valy@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 84–97. DOI: 10.17223/25421379/17/7

A.Yu. Sanin, V.A. Kulakovskaya

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ON THE ISSUE OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF COASTAL RECREATION TERRITORIES OF THE RUSSIAN FEDERATION

The literary and cartographic material gives an idea of the structure of human activity on coastal territories and its adverse and dangerous natural processes. However, general recommendations on environmental management needed, taking into account natural and other factors that affect economic use, the interests of tourists and local residents, as well as those of the state and business. The purpose of the study is to define a framework for these recommendations and to identify their factors that should be taken into account.

The following characteristics of coastal territories also should be considered:

1. Recreational potential, which determined by climatic characteristics, landscape diversity as well as the level of the development of recreational infrastructure.

2. Recreational resources defining types of rest

3. Adverse and dangerous natural processes. They are especially evident for the mountain regions: the North Caucasus coast of the Black sea, the southern coast of the Crimea, the coast of the Sea of Japan.

Some dangerous natural processes are a feature of coastal recreational areas, for example, abrasive processes. Others are typical for mountain areas in general – landslides, earthquakes, avalanches, mudslides, etc.

For the majority of recreational seaside areas the measures of counteraction to adverse and dangerous processes are similar. These are:

1. Minimization of economic use of coastal areas where dangerous processes are most pronounced.

2. Informing recreationists about the dangers associated with adverse and dangerous natural processes.

3. Fighting for the most attractive areas of the shoreline for economic activity with dangerous natural processes: coastal protection, landslide measures, and so on.

Using foreign experience in environmental management to Russian coastal territories has become more urgent. In particular, in the development and implementation of the concept of integrated coastal zone management, and in the implementation of the principles of Marine spatial planning (MPP).

Effective management of natural resources in the coastal area is possible only on a scientific basis, taking into account economic, social and environmental characteristics of the territory. It is also particularly important to take into account physical and geographical characteristics of territories that affect the value of its recreational potential. The following factors should also be taken into account in environmental management:

- Adverse and dangerous natural processes, their causes, characteristics and impact on people, statistics on them for the past years.
- Typification of the coasts.
- History of development of coasts and their modern dynamics.
- Nature management structure of the area, its most important types and relationships between them.
- Conflicts between different types of human activities.

Keywords: *environmental management, coastal areas, recreational potential of the territory, integrated coastal zone management, marine spatial planning.*

References

- Aybulatov N.A. *Deyatel'nost' Rossii v pribrezhnoy zone moray* [Russia's activities in the coastal zone of the sea]. Moscow : Nauka, 2005, 363 p. In Russian
- Baklanov P.Ya. *Morskoe prostranstvennoe planirovanie: teoreticheskie aspekty* [Marine spatial planning: theoretical aspects] // *Baltiyskiy region*. 2018. V. 10, No 2. pp. 76–85. In Russian
- Belikov M.Yu., Prikhod'ko A.V., Filobok A.A. *Primorskie kurortnye tsentry yuga Rossii: vzaimosvyaz' strategiy razvitiya i kompleksnogo upravleniya pribrezhnymi zonami* [Seaside resort centers in southern Russia: the relationship between development strategies and integrated coastal zone management] // *Materialy 25-oy mezhdunarodnoy konferentsii «Beregovaya zona – vzglyad v budushchee»*, Sochi, 2014, 224 p. In Russian
- Bredikhin A. V. *Rekreatsionno-geomorfologicheskie sistemy* [Recreational-geomorphological systems]. Smolensk: Oykumena, 2010, 328 p. In Russian
- Geografiya turizma: uchebnik* [Geography of tourism: textbook] / V.I. Kruzhalin, N.S. Mironenko, N.V. Zigern-Korn, N.V. Shabalina. Moscow : Federal'noe agentstvo po turizmu, 2014. 336 p. In Russian
- Dvortsova E.N. *Pribrezhnye territorii: zarubezhnyy opyt khozyaystvennogo osvoeniya i upravleniya* [Coastal Territories: Foreign Experience of Economic Development and Management] // *Rossiyskiy vneshneekonomicheskiy vestnik* = Russian Foreign Economic Journal. 2010. No 7. pp. 13–18. In Russian
- Dolotov Yu.S. *Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany pribrezhnykh oblastey Mirovogo okeana* [Problems of rational use and protection of coastal areas of the World Ocean]. Moscow: Nauchnyy mir, 1996, 304 p. In Russian
- Dutova T.I. *Formirovanie sovremennogo turistko-rekreatsionnogo klastera kak sposob povysheniya konkurentnospobnosti rossiyskoy ekonomiki i ee resursov* [Formation of a modern tourist and recreational cluster as a way to increase the competitiveness of the Russian economy and its resources] // *Vestnik NGU. Seriya: Sotsial'no-ekonomicheskie nauki*. 2010. V. 10, No 1. pp. 98–106. In Russian
- Zemlyanov I.V., Fashchuk D.Ya., Kochemasov Yu.V., Zatsapa S.N. Marine nature management: concept, modern problems and ways to solve them // *Izvestiya RAS, geographical series*. 2015. No 1. pp. 21–34. In Russian
- Ignatov E.I., Orlova M.S., Sanin A.Yu. *Beregovye morfosistemy Kryma* [Coastal morphosystems of Crimea]. Sevastopol': NPTs «EKOSI Gidrofizika», 2014, 267 p. In Russian
- Mal'neva I.V. *Aktivnost' seley i opolzney na Chernomorskom poberezh'e Kavkaza i privileyushchikh gornyykh rayonakh v nachale 21 veka* [The activity of mudflows and landslides on the Black Sea coast of the Caucasus and adjacent mountainous regions at the beginning of the 21st century.]. Access mode: <https://docplayer.ru/31661558-Aktivnost-seley-i-opolzney-na-chernomorskom-poberezhie-kavkaza-i-privileyushchikh-gornyyh-rayonah-v-nachale-xxi-veka.html>. Date accessed: 14.03.2019. In Russian
- Mitina N.N., Paranova T.O., Brusnigina S.G. *Razvitie turistko – rekreatsionnogo potentsiala respubliki Krym: novye vyzovy i puti resheniya* [Development of the tourist and recreational potential of the Republic of Crimea: new challenges and solutions] // *Gosudarstvennoe upravlenie, Elektronnyy vestnik*. 2018. No 68. pp. 172–194. In Russian
- «*Morskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii*», utverzhdena Prezidentom Rossiyskoy Federatsii 26.07.2015. ["Marine Doctrine of the Russian Federation", approved by the President of the Russian Federation on July 26, 2015] Electronic resource. URL: <https://ovmf2.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=130702150805643796311275326&cacheid=E44DB106F2DEC042137466DB95E26920&mode=splus&base=LAW&n=208427&rnd=51035D093765A98D86258442A59A229C#1jsqmq2ngh4>. Date accessed: 20.03.2020. In Russian
- Polyanskikh E. A. *Razvitie turisticheskoy otrasli na osnove klaster'nogo podkhoda* [Development of the tourism industry based on a cluster approach] // *Ekonomika i menedzhment: proshloe, nastoyashchee, budushchee: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Novosibirsk: Sibirskaya assotsiatsiya konsultantov*, 2012. pp. 166–170. In Russian
- Preobrazhenskiy V.S. *Teoreticheskie osnovy rekreatsionnoy geografii* [Theoretical foundations of recreational geography]. Moscow : Nauka, 1975, 192 p. In Russian
- Sanin A.Yu. *K voprosu ob upravlenii rekreatsionnym prirodopol'zovaniem v pribrezhnykh turisticheskikh territoriyakh Rossiyskoy Federatsii* [On the question of the managing recreational nature-use in coastal tourism areas of the Russian Federation] // *Sovremennye problemy servisa i turizma*. 2018. No 12(2) pp. 45–58. In Russian
- Sychev S.L. *Kompleksnoe osvoenie pribrezhnoy zony Chernogo morya – vazhneyshiy faktor ee ustoychivogo razvitiya* [Integrated development of the Black Sea coastal zone is the most important factor in its sustainable development] // *Nauchnaya mysl' Kavkaza. Prilozhenie. Rostov-on-Don*. 2006. No 12 pp. 40–55. In Russian
- Fashchuk D.Ya., Zemlyanov I.V., Kochemasov Yu.V., Zatsapa S.N. *Morskoe prirodopol'zovanie: kontseptsiya, sovremennye problemy i puti ikh resheniya* [Marine environmental management: formation of the concept, modern problems and ways of their decision within ecosystem approach] // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2015. No 1. pp. 21–34. In Russian
- Shebzukhova T.A., Kiseleva N.N., Sankin A.V. *Formirovanie i razvitie turisticheskogo klastera Severokavkazskogo federal'nogo okruga* [On creation and development of the north Caucasian Federal District tourist cluster] // *Servis plus*. 2014. No 1. V. 8. pp. 101–107. In Russian

Shil'chenko T.N. *Perspektivy razvitiya turistskikh klasterov RF* [Prospects for the development of tourist clusters in the Russian Federation] // Vestnik Taganrofskogo instituta upravleniya i ekonomiki. 2015. No 1. pp. 65–70. In Russian

Yamkovaya M.V. Analiz rekreatsionnoy deyatel'nosti na morskikh poberezh'yakh rossiyskoy federatsii // Uchenye zapiski, Okeanologiya. 2010. No 20. pp. 162–171. In Russian

Author's:

Sanin Alexander Yur., Cand. Sci. (Geography), Doctoral student, Faculty of public administration, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

E-mail: eather86@mail.ru

Kulakovskaya Valentina And., postgraduate student, Faculty of public administration, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

E-mail: ivanenko.valy@mail.ru

УДК 550.424.4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ ГОРНОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Л.П. Чечель

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия



Представлены результаты исследования особенностей распределения лития, рубидия и цезия в техногенно-трансформированных водах вольфрамовых, молибденовых и полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья. Показан закономерный рост содержаний элементов в водах по мере увеличения солености и кислотности растворов, наиболее ярко проявленный в районах сульфидных месторождений.

Ключевые слова: литий, рубидий, цезий, месторождения, техногенно-трансформированные воды, концентрация.

Введение

С разработкой новых высокочувствительных методов анализа появилась возможность исследования свойств и распределения в разных средах широкого спектра химических элементов, в том числе редких, что ранее было невозможно в связи с их малой распространенностью и рассеянностью. Особый интерес проявляется к изучению миграции редких элементов в техногенно-трансформированных водах, формирующихся в горнодобывающих регионах [Крайнов, 1973; Удачин и др., 2008; Хаустов, 2012; Гурбанов и др., 2015; Protano, 2002; Wolkersdorfer, 2002; Li, Wu, 2017]. Наряду с чисто научным интересом, связанным с изучением природных процессов и закономерностей миграции и накопления элементов, эти исследования позволяют решать практические задачи, касающиеся разработки и усовершенствования геохимических методов поисков месторождений, а также возможности использования их в качестве комплексных промышленных вод. Не менее важно изучение вопросов геохимической экологии, изучающей влияние геохимических факторов среды на живые организмы, и в связи с этим вопросов охраны водных ресурсов.

Цель работы и современное состояние вопроса

Целью работы явилось изучение распространенности лития, рубидия и цезия в техногенно-трансформированных водах вольфрамовых, молибденовых и полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья.

Редкие щелочные элементы литий, рубидий и цезий являются типичными литофильными элементами, ценность и значимость которых определяются в первую очередь их применением. Традиционными областями использования лития являются военная техника, стекольная и керамическая отрасли про-

мышленности, производство флюсов, припоев, смазок, щелочных аккумуляторов, приборов для кондиционирования воздуха; Li^6 – единственный источник получения радиоактивного изотопа водорода-третия. Освоенные области применения рубидия и цезия – радиотехника и электроника, ракетно-космическая техника, электроэнергетика, атомная и военная техника, стекло и керамика, химическая промышленность.

Среднее содержание редких щелочных элементов в земной коре составляет (%): $\text{Li} - 0,0032$; $\text{Rb} - 0,015$; $\text{Cs} - 0,00037$; их абсолютное количество увеличивается к кислым породам, повышенные содержания связаны с гранитными пегматитами, в первую очередь редкометалльными. Для всех магматических пород характерен тип отношения, при котором по массе: $\text{Rb} > \text{Li} > \text{Cs}$, при этом рубидия больше лития в 3–5 раз, а рубидия больше цезия в 20–40 раз [Арсанова, 2009, 2013].

Среди минералов, содержащих литий, рубидий и цезий, преобладают силикаты. В числе наиболее важных минералов лития – сподумен, лепидолит, циннвальдит, петалит и другие, образующие промышленные месторождения в пегматитах и грейзенизированных гранитах. В качестве изоморфной примеси литий входит во многие порообразующие минералы, высокие содержания обнаружены в слюдах и амфиболах [Гавриленко, Сахоненко, 1986]. Рубидий по своим свойствам близок к калию и рассеивается в его минералах, крупных концентраций, как правило, не образует. Наиболее высокие его содержания обнаруживаются в микроклинах, мусковитах, лепидолитах, циннвальдитах и биотитах [Гавриленко, Сахоненко, 1986; Иванов, 1994]. Цезий не образует собственных месторождений, накапливается в наиболее кислых породах – цезий-пегматитах, околорегматитовых редкометалльных метасоматитах, кислых вулканических стеклах. Основная цезиевая руда – минерал поллуцит, повышенные содер-

жания установлены в лепидолитах и протолитнионитах редкометалльных плюмазитовых гранитов, а также литиевом мусковите [Иванов, 1994; Семенов, 2007; Арсанова, 2013].

Малая распространенность в природе и низкая миграционная способность редких щелочных элементов определяют низкие концентрации в речных водах (мг/л): Li и Rb $\sim 2 \times 10^{-3}$, Cs $\sim 3 \times 10^{-5}$ [Арсанова, 2009]. Существует несколько геохимических типов подземных вод, содержащих максимальные концентрации редких щелочных элементов и представляющих, в связи с этим, наибольший практический интерес: 1) пластовые воды Cl Ca-Mg и Cl Ca-Na состава с минерализацией до 600 г/л и более; именно этим водам присущи максимальные содержания щелочных элементов (мг/л): Li – 700, Rb – 960, Cs – 20,0; 2) рассолы артезианских бассейнов краевых прогибов и межгорных впадин Cl Na и Cl Na-Ca состава с минерализацией от 50 до 340 г/л и содержанием щелочных элементов в пределах (мг/л): Li 80,0–210; Rb 10,0–50,0; Cs 1,00–4,00; 3) углекислые термальные воды горноскладчатых областей с минерализацией в пределах 20,0–80,0 г/л и концентрациями (мг/л): Li 2,91–18,5; Rb 0,20–1,50; Cs 0,27–2,64; 4) термальные Cl Na воды современных вулканических зон, характеризующиеся относительно невысокой минерализацией 1,30–4,60 г/л и содержаниями Li до 5,70; Rb до 2,19 и Cs до 1,80 мг/л [Балашов и др., 1977; Крайнов и др., 2004; Арсанова, 2009, 2013].

Изучение распространения редких щелочных элементов в водах редкометалльных месторождений разных генетических типов показало, что содержания их в ореольных водах достигают (мкг/л): Li 200; Rb 26,0; Cs 16,0, тогда как в фоновых водах не превышают (мкг/л): Li 70,0; Rb 5,00; Cs 1,00 [Крайнов, 1973]. В кислых водах карьерных озер Маканское и Куль-Юрт-Тау (Башкирия, Россия), сформировавшихся после отработки колчеданных месторождений, содержания металлов составили (мкг/л): Li 13,5–47,1; Rb 0,10–15,1; Cs 0,16–1,90 [Удачин и др., 2008]. Более высокие их концентрации зафиксированы в слабощелочных дренажных стоках Тырныаузского вольфрам-молибденового месторождения (мг/л): Li 1,40; Rb 0,50; Cs 0,60 [Хаустов, 2012]. Воды ручья, дренирующего отвалы карьера этого же месторождения, содержат до 146,6 мкг/л лития и 244,6 мкг/л рубидия, что превышает ПДК для питьевых вод соответственно в 4 921 и 2 446 раз [Гурбанов и др., 2015].

Объекты и методы исследований

Восточное Забайкалье – старейший горнорудный регион России, освоение рудных месторождений в нем начато с разработки серебряно-

свинцовых руд и относится к XVII в. Здесь впервые в России были добыты серебро, свинец, цинк, молибден, вольфрам, олово и флюорит. Отходы горного производства, складированные на прилегающих к рудникам территориях в виде отвалов пустых пород и хвостов обогатительных фабрик, дренажные стоки горных выработок и фильтрация из заброшенных карьеров, на протяжении многих десятилетий являются источниками загрязнения окружающей среды и одновременно с этим – перспективным объектом для получения ценных элементов, в том числе редких металлов.

В период с 2012 по 2015 г. было проведено гидрогеохимическое опробование в районах отработки Букуинского, Спокойнинского и Бом-Горхонского вольфрамовых, Шахтаминского и Бугдаинского молибденовых, а также Благодатского и Акатуевского свинцово-цинковых месторождений (рис. 1).

Спокойнинское и Бом-Горхонское месторождения отрабатываются до настоящего времени, на Бугдаинском велась только опытная добыча, остальные месторождения в разное время были законсервированы, запасы их полностью не выбраны. Переработка руды, как на закрытых, так и действующих рудниках, осуществлялась на местных обогатительных фабриках, отходы складировались на местах, рекультивация нарушенных территорий не проводилась.

В числе основных особенностей геологического строения вольфрамовых и молибденовых месторождений выделяется их пространственная ассоциация с гранитными и гранитоидными породами, а также наличие либо отсутствие сульфидной минерализации. Вольфрамовые месторождения тяготеют к участкам развития песчано-сланцевых отложений протерозойского, палеозойского и мезозойского возрастов, прорванных мезозойскими гранитоидными интрузиями [Иванова, 1972; Гребенников, 1995; Сизых, 1995]. Для руд жильных кварц-вольфрамит-сульфидного Букуинского и кварц-гюбнерит-сульфидного Бом-Горхонского месторождений характерно повышенное содержание сульфидов. На Спокойнинском грейзеново-вольфрамитовом месторождении сульфидная минерализация имеет значительно меньшее распространение и носит рассеянный характер. Главными рудными минералами на Букуке являются вольфрамит, гюбнерит, сфалерит, пирит, на Бом-Горхоне – пирит, гюбнерит, молибденит, сфалерит, на Спокойнинском месторождении – вольфрамит, берилл, бисмутит, танталониобаты, касситерит.

Молибденовые месторождения локализованы в гранитоидах мезозойского и каменноугольного возраста [Сотников и др., 1995; Коваленкер и др., 2011]. Жильное Шахтаминское и штокверковое Бугдаинское месторождения относятся к молибденит-галенит-сфалеритовой рудной формации.



Рис. 1. Местоположение объектов гидрогеохимических исследований

Вольфрамовые месторождения: 1 – Бом-Горхонское, 2 – Спокойнинское, 3 – Букукинское; молибденовые месторождения: 4 – Шахтаминское, 5 – Бугдаинское; свинцово-цинковые месторождения: 6 – Акатуевское, 7 – Благодатское

Fig. 1. Location of hydrogeochemical research facilities

Tungsten deposits: 1 – Bom-Gorkhonsky, 2 – Spokoininsky, 3 – Bukukinsky; molybdenum deposits: 4 – Shakhtaminsky, 5 – Bugdainsky; lead-zinc deposits: 6 – Akutuevsky, 7 – Blagodatsky

Наиболее распространенные жильные минералы на Шахте – кварц, карбонаты, полевые шпаты, слюда и флюорит; рудные – молибденит, пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, антимонит, арсенопирит. Главные рудные минералы на Бугдаинском месторождении представлены молибденитом, галенитом, сфалеритом, пиритом, халькопиритом, шеелитом.

Особенностью свинцово-цинковых месторождений является локализация их в пределах карбонатных толщ нижнего палеозоя, выходы которых разобщены крупными массивами гранитов каледонского и варисского возрастов [Добровольская, Гордеев, 1995]. Месторождения приурочены, как правило, к контактам доломитов со сланцами или известняковым прослоям, заключенным в толще сланцев. Рудные тела в основном жильные и в виде трубообразных залежей. На Акатуевском месторождении рудные минералы представлены галенитом, сфалеритом, пирротинитом, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом и др. Жильные минералы наряду с кварцем и доломитом включают кальцит, мангананкерит, олигонит, анкерит и флюорит. Благодатское месторождение относится к Нерзаводской группе. Главными рудными минералами здесь являются пирит, сфалерит, арсенопирит, галенит, буланжерит, в подчиненном количестве отмечаются блеклая руда, станнин, касситерит. Жильные минералы представлены кварцем, доломитом, кальцитом.

Гидрогеохимическое опробование площадей месторождений осуществлялось в летнюю межень, всего было отобрано 46 водных проб, химико-аналитические исследования которых проводились общепринятыми методами в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита): турбидиметрией (SO_4^{2-}), потенциметрией (HCO_3^- , Cl^- , F^-), колориметрией (Si , $\text{P}_{\text{общ.}}$, NO_3^- , NH_4^+). Основные катионы и металлы определялись атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6. Дополнительно выполнялся отбор водных проб для их анализа методом ICP-MS: на месте отбора пробы воды, предварительно отфильтрованные через мембранный фильтр (размер пор 0,45 мкм), отбирались в пластиковые пробирки (15 мл), затем консервировались добавлением особо чистой концентрированной азотной кислоты. Анализ методом ICP-MS выполнялся в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на приборе высокого разрешения ELEMENT 2 фирмы Finnigan MAT (США) по методике HСAM № 480Х.

Полученные результаты и их обсуждение

В районах месторождений были исследованы воды техногенных водоемов (карьеры, пруды шламохранилищ), дренажи штолен, отвалов хвостов обогащения и пустых пород. Воды вольфрамовых

Букуинского, Бом-Горхонского и молибденового Бугдаинского месторождений преимущественно кислые и слабокислые сульфатные, фторидно-сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные с кальциевым и магниевым-кальциевым катионным составом (рис. 2) [Замана, Чечель, 2014; Чечель, 2017].

Формулы среднего ионно-солевого состава их вод приведены в таблице. К особенностям техногенных вод

этих месторождений следует отнести также значительный рост минерализации (до 3 г/л и более) и концентраций металлов, максимальные значения которых достигали миллиграммовых значений: Al – 403,0; Fe – 100,3; Zn – 293,0; Mn – 859,6; Cu – 54,9; Ni – 1,15; Sr – 2,96; Cd – 2,76 мг/л. Им же свойственны аномальные концентрации редкоземельных элементов, максимальные суммарные содержания которых составили 1,07–3,59 мг/л.

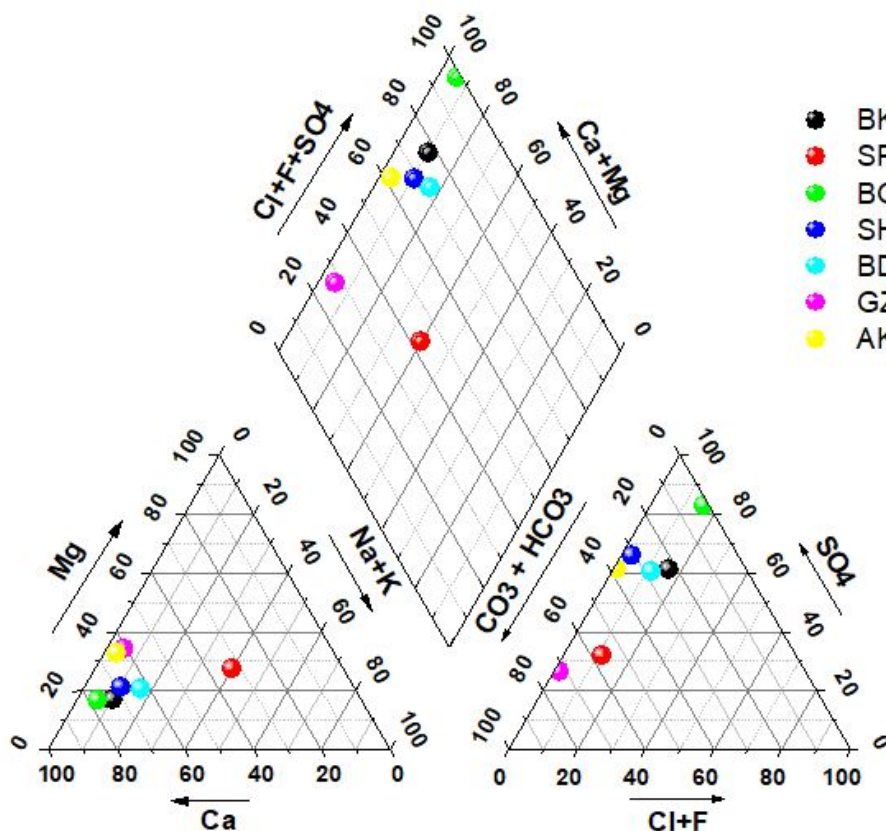


Рис. 2. Пайпер-диаграмма состава вод месторождений

БК – Букуинского, SP – Спокойнинского, BG – Бом-Горхонского вольфрамовых, SH – Шахтаминского, BD – Бугдаинского молибденовых, GZ – Благодатского, АК – Акатуевского свинцово-цинковых месторождений

Fig. 2. Piper-diagram of the water composition of deposits

BK – Bukukinsky, SP – Spokoyninsky, BG – Bom-Gorkhonsky tungsten, SH – Shakhtaminsky, BD – Bugdainsky molybdenum, GZ – Blagodat'sky, AK – Akatuevsky lead-zinc deposits

Техногенно-трансформированные воды Спокойнинского и Шахтаминского месторождений характеризуются повышенными значениями pH (таблица). В районе Спокойнинского месторождения развиты преимущественно околонеутральные и слабощелочные, пресные (0,32–1,07 г/л) воды, их химический состав сульфатный и сульфатно-гидрокарбонатный магниевым-кальциевым и гидрокарбонатный кальциевый (см. рис. 2, таблицу). Аномальные концентрации свойственны (мг/л): Fe – 4,63; Mn – 5,70; W – 1,54; U – 1,86. Воды на Шахтаминском месторождении преимущественно ультрапресные (< 0,2 г/л) сульфатного и гидрокарбонатно-сульфатного магниевым-кальциевого типа (рис. 2, таблица). Миллиграм-

мовых значений достигают концентрации: Mn – 10,3 и Zn – 6,54 мг/л [Чечель, 2017].

Районы полиметаллических месторождений, несмотря на преимущественно сульфидный состав руд, характеризуются нейтральными и слабощелочными значениями pH вод (таблица), что обусловлено высоким нейтрализующим потенциалом вмещающих карбонатных пород и минералов, присутствующих в рудах [Замана, Чечель, 2015; Чечель, Замана, 2019]. По степени минерализации воды в основном пресные. Химический тип вод сульфатно-гидрокарбонатный магниевым-кальциевым на Благодатском и гидрокарбонатно-сульфатный магниевым-кальциевым на Акатуевском месторождениях (см. рис. 2, таблицу).

Распределение Li, Rb и Cs в техногенно-трансформированных водах месторождений, мкг/л

Distribution of Li, Rb and Cs in technogenic waters of deposits, µg/L

Месторождение	Средний химический состав вод	Li	Rb	Cs
Букуинское (W)	$M1,24 \frac{SO_4 81 F16 HCO_3 2 Cl 1}{Ca65 Mg28 Na6 K1} pH4,42$	$\frac{46-589,0}{258,0}$	$\frac{2,67-45,0}{15,1}$	$\frac{2,38-49,0}{12,0}$
Бом-Горхонское (W)	$M0,93 \frac{SO_4 86 F11 HCO_3 2 Cl 1}{Ca77 Mg17 Na4 K2} pH4,69$	$\frac{18,0-1062}{249,0}$	$\frac{2,07-55,0}{16,3}$	$\frac{0,04-3,67}{1,25}$
Спокойнинское (W)	$M0,55 \frac{HCO_3 52 SO_4 40 Cl6 F2}{Ca49 Mg30 Na17 K4} pH7,42$	$\frac{21,0-125,0}{71,0}$	$\frac{0,57-84,0}{41,0}$	$\frac{0,009-9,90}{2,50}$
Бугдаинское (Mo)	$M1,05 \frac{SO_4 87 HCO_3 9 F3 Cl 1}{Ca56 Mg35 Na7 K2} pH4,32$	$\frac{2,40-718,0}{185,0}$	$\frac{0,90-74,9}{43,0}$	$\frac{0,04-8,10}{4,00}$
Шахтаминское (Mo)	$M0,17 \frac{SO_4 66 HCO_3 31 Cl3 F1}{Ca 68 Mg 22 Na 9 K1} pH 7,21$	$\frac{0,21-8,50}{3,50}$	$\frac{3,54-12,4}{6,83}$	$\frac{0,06-0,55}{0,22}$
Благодатское (Pb-Zn)	$M0,456 \frac{HCO_3 72 SO_4 27 Cl1 F0,2}{Ca61 Mg34 Na4 K0,4} pH8,08$	$\frac{6,7-10,1}{7,8}$	$\frac{0,50-1,37}{0,80}$	$\frac{0,019-0,10}{0,05}$
Акатуевское (Pb-Zn)	$M0,831 \frac{SO_4 61 HCO_3 38 Cl 0,4 F 0,2}{Ca64 Mg33 Na3 K0,4} pH7,40$	$\frac{11,5-11,9}{11,7}$	$\frac{2,70-3,11}{2,88}$	$\frac{0,14-0,73}{0,43}$
Среднее содержание в поземных водах зоны выщелачивания [Шварцев, 1998]		6,2	1,81	0,18

Примечание. В числителе – минимальное и максимальное, в знаменателе – среднее значения.

Note. In the numerator – the minimum and maximum, in the denominator – the average values.

Миграция тяжелых металлов ограничена низкой растворимостью их гидроксидов, концентрации составляют, как правило, первые десятки, единицы и менее мкг/л. Максимальные содержания компонентов, достигающие миллиграммовых значений, фиксируются в редких случаях, поднимаясь до (мг/л): Mn – 2,36; Fe – 8,44; Zn – 2,11; As – 1,10; Sr – 1,14.

Распределение компонентов исследованных вод нормированных относительно среднего состава вод выщелачивания [Шварцев, 1998] в порядке убывания имеет следующий вид:

на Букуинском – Cd>Cu>Zn>Co>Al>Be>Th>Mn>Ni>La>Pb>U>Cs>Sc>Li>Fe>Sr>W>Mo>Rb;

Бом-Горхонском – Cd>Th>Zn>Mn>Al>Co>La>Be>U>Sc>Cu>Fe>W>Li>Ni>Sr>Rb>Cs>Ti>Cr>Pb;

Бугдаинском – Mn>Al>Zn>Cu>Fe>Cd>La>Sr>Co>Li>U>Ni>Mo>Rb>Th>Ba>Pb>Sc>Be>Cr>Ag>Cs>As;

Спокойнинском – W>U>As>Mn>Rb>Mo>Cs>Co>Li>Sr>Se>Ni;

Шахтаминском – Mn>Zn>Sr>Fe>Al>Mo>Ba>Cu>U>Cd>Ni>Rb>Pb>Sb>Li>Ag>Cr>As>Cs>Th>Sn;

Благодатском – As>Pb>Sb>Zn>Cd>Mn>Mo>Al>La>Sr>Cu>U>Li>Co>V>Fe>Ni>Sc>Se>Rb>Ti>Cs;

Акатуевском – As>Zn>Mn>Fe>Sr>Cd>U>Pb>Sb>Mo>Cs>Li>Se>Co>Rb>Ni>Cu>Sc месторождениях [Чечель, 2017; Чечель, Замана, 2019].

Приведенные ряды распределения компонентов свидетельствуют о накоплении редких щелочных элементов в исследованных водах рассматриваемых месторождений. Причем последовательность в рядах

подвижности щелочных элементов в относительных содержаниях не совпадает с таковой в абсолютных значениях их концентраций, которая, как правило, имеет вид Li>Rb>Cs (таблица). Такая последовательность объясняется слабой миграцией рубидия и цезия в природных водах, обладающих большей интенсивностью осаждения по сравнению с литием, тогда как последний может концентрироваться в растворе [Крайнов, 1973; Арсанова, 2013].

Исключением являются воды Шахтаминского месторождения, которым свойственна последовательность в рядах подвижности щелочных элементов Rb>Li>Cs (таблица), что является вероятнее всего отражением широко проявленной в Шахтаминском рудном поле калишпатизации [Сотников и др., 1995].

Содержания лития, рубидия и цезия в значительной мере контролируются щелочно-кислотными условиями вод. Эта зависимость имеет обратный характер и наиболее ярко проявлена в техногенно-трансформированных водах вольфрамовых и молибденовых месторождений (рис. 3, а). Коэффициенты парной корреляции, рассчитанные в программе Excel (критическое значение коэффициента при уровне значимости 0,05 равно 0,30), следующие: Li – 0,67; Rb – 0,39; Cs – 0,42.

Интенсивность гипергенного разложения силикатов, содержащих редкие щелочные элементы, резко усиливается в районах сульфидных месторождений [Крайнов, 1973], где одним из ведущих является процесс сернокислотного выщелачивания, причиной чему служит окисление сульфидов, в первую очередь пири-

та. Как следствие кислым высокоминерализованным водам месторождений присущи максимальные содержания рассматриваемых компонентов (таблица, рис. 3, *a*, *b*). Концентрирование их в водах по мере роста ее солёности в наибольшей степени свойственно литию и рубидию, коэффициенты парной корреляции которых с величиной минерализации составляют, соответственно, 0,89 и 0,52. Значимая связь между содержаниями цезия и минерализацией вод отсутствует.

При этом расчет относительных содержаний редких щелочных элементов (% к минерализации) показал заметные различия в степени их концентрирования в водах по мере роста солёности (рис. 4). Так, если для лития характерно постоянное увеличение относительных концентраций, то для рубидия, напротив, понижение. Заметное увеличение относительных содержаний цезия в водах происходит при возрастании минерализации примерно до 1 г/л, после чего они начинают снижаться. Причина такого поведения элементов связана, вероятно, с большей интенсивностью осаждения цезия и рубидия по сравнению с литием [Крайнов, 1973].

При рассмотрении конкретных объектов опробования в исследованных районах также можно видеть не-

которые отличия в накоплении и распределении редких щелочных элементов. Увеличение вплоть до максимальных значений концентраций лития зачастую фиксировалось в водах после фильтрации через отходы обогатительных фабрик (в выходе по промоине в переложенных песках обогащения на Букуинском месторождении, из разгрузок вод под нижними дамбами хвостохранилищ на Бом-Горхонском, Благодатском и Акатуевском месторождениях), тогда как содержания рубидия и цезия при этом заметно понижались, их максимальные концентрации отмечались в водах выше хвостохранилищ. Такая закономерность объясняется интенсивной сорбцией цезия и рубидия на глинистых частицах [Крайнов, 1973] и, напротив, активным выщелачиванием лития при прохождении вод сквозь пески обогащения. В районе Спокойнинского вольфрамового месторождения максимальные содержания рассматриваемых элементов зафиксированы в водоеме на дне действующего карьера, воды которого имеют SO_4 Mg-Ca состав и минерализацию 1,07 г/л. На Бугдаинском молибденовом месторождении наиболее высокие содержания лития, рубидия и цезия определены в кислых ($\text{pH} < 3,50$) SO_4 Mg-Ca соленоватых (минерализация до 2,19 г/л) водах, дренирующих породные отвалы.

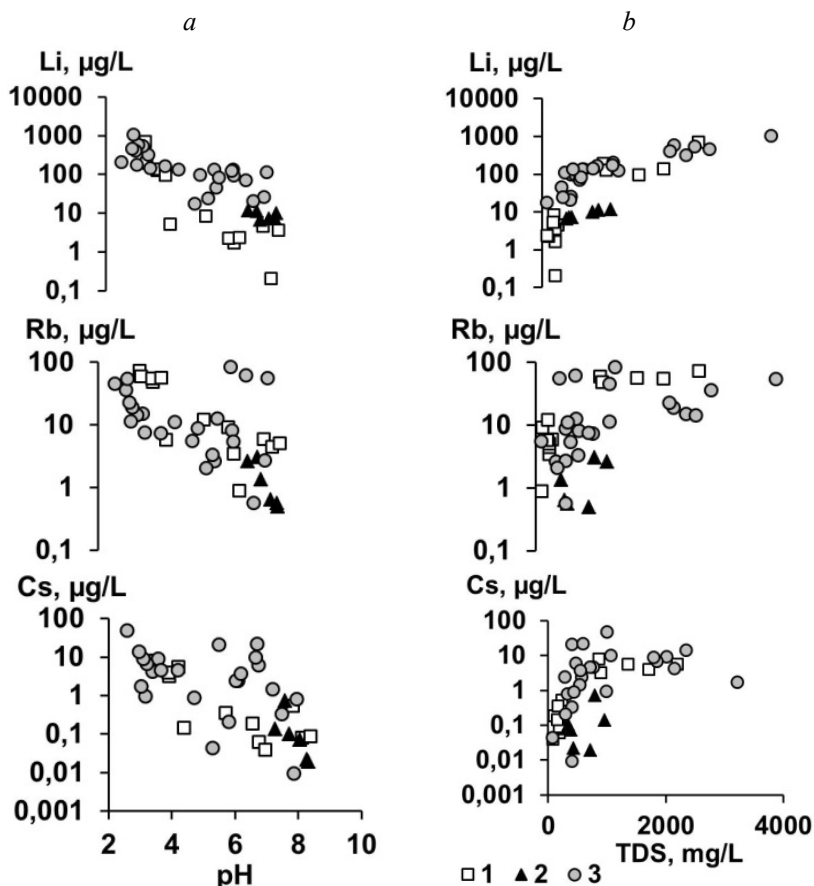


Рис. 3. Зависимость содержаний Li, Rb и Cs от pH (*a*) и минерализации (*b*) вод месторождений
1 – Mo, 2 – Pb-Zn, 3 – W

Fig. 3. The dependence of the Li, Rb and Cs contents on the pH (*a*) and salinity (*b*) of the deposits waters
1 – Mo, 2 – Pb-Zn, 3 – W

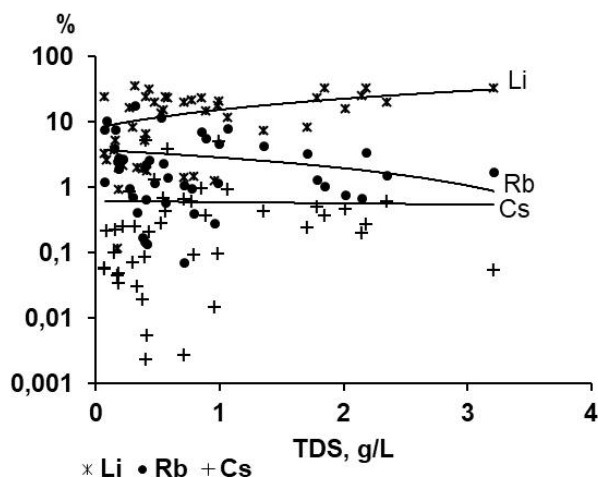


Рис. 4. Зависимость относительных (% к минерализации) концентраций редких щелочных элементов от минерализации вод

Fig. 4. The dependence of rare alkaline elements relative (% to mineralization) concentrations on mineralization of waters

Расчеты коэффициентов парной корреляции показали наличие положительных связей редких щелочных элементов с SO_4 -ионом ($r_{\text{Li-SO}_4} = 0,86$; $r_{\text{Rb-SO}_4} = 0,55$), что является отражением их активной миграции и концентрирования в сульфатных водах месторождений. Наличие положительных корреляций с алюминием ($r_{\text{Li-Al}} = 0,88$; $r_{\text{Rb-Al}} = 0,59$) и кремнием ($r_{\text{Li-Si}} = 0,59$; $r_{\text{Rb-Si}} = 0,53$; $r_{\text{Cs-Si}} = 0,45$) можно истолковать связью с источниками их поступления в воды (силикатные минералы) либо с предпочтительной миграцией рассматриваемых элементов в составе мелкодисперсной взвеси [Крайнов, 1973]. Значимая корреляционная связь рубидия с калием ($r_{\text{Rb-K}} = 0,57$) также, вероятнее всего, указывает на источник его поступления в воды (калий-содержащие минералы горных пород).

Заключение

В результате проведенных исследований установлена способность лития, рубидия и цезия к концентрированию в техногенно-трансформированных водах вольфрамовых Букуинского, Бом-Горхонского и Спокойнинского, молибденовых Шахтаминского и Бугдаинского, а также полиметаллических Благодатского и Акатуевского месторождений, рас-

положенных в Восточном Забайкалье. Последовательность в рядах подвижности редких щелочных элементов в водах месторождений, как правило, имеет вид $\text{Li} > \text{Rb} > \text{Cs}$ и только на Шахтаминском месторождении – $\text{Rb} > \text{Li} > \text{Cs}$.

Выявлено увеличение содержаний элементов в водах по мере роста солёности и кислотности растворов, наиболее ярко проявленное в районах сульфидных Букуинского, Бом-Горхонского и Бугдаинского месторождений, где максимальные их концентрации достигали значений (мкг/л): Li – 589,0–1062; Rb – 45,0–74,9; Cs – 3,67–49,0.

Основными факторами, контролирующими распределение и концентрации редких щелочных элементов в водах месторождений, являются состав горных пород и руд, а также сорбционные процессы, оказывающие сдерживающее влияние на миграцию, в первую очередь, цезия и рубидия.

Работа подготовлена в рамках выполнения темы государственного задания № 0386-2015-0006 (IX.137.1.2) «Геохимия редких и редкоземельных элементов в природных и геотехногенных ландшафтах и гидрогеохимических системах».

ЛИТЕРАТУРА

- Арсанова Г.И. Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск : Наука, 2009. URL: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1181535>
- Арсанова Г.И. К геохимии цезия: источник цезия в термальных водах и кислых вулканитах // Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 4, № 1. С. 4.
- Балашов Л.С., Галицин М.С., Ефремочкин Е.В. Методические рекомендации по геохимической оценке и картированию подземных редкометалльных вод. М. : ВСЕГИНГЕО, 1977. 87 с.
- Гавриленко В.В., Сахоненко В.В. Основы геохимии редких литофильных металлов. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. 172 с.

- Гребенников А.М.** Спокойнинское вольфрамовое месторождение // Месторождения Забайкалья : в 2 кн. / под ред. акад. Н.П. Лаврова. М. : Геоинформмарк, 1995. Т. I, кн. I. С. 106–116.
- Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Винокуров С.Ф., Карамурзов Б.С., Газеев В.М., Лексин А.Б., Шевченко А.В., Долов С.М., Дударов З.И.** Геохимическая оценка экологической обстановки в районе деятельности Тырныаузского вольфрамомолибденового комбината (Кабардино-Балкарская республика, Северный Кавказ): источники загрязнения окружающей среды, влияние на соседние территории и меры по реабилитации // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464, № 3. С. 328–333.
- Добровольская М.Г., Гордеев В.И.** Свинцово-цинковые месторождения // Месторождения Забайкалья : в 2 кн. / под ред. акад. Н.П. Лаврова. М. : Геоинформмарк, 1995. Т. I, кн. I. С. 70–92.
- Замана Л.В., Чечель Л.П.** Геохимия дренажных вод горнорудных объектов вольфрамового месторождения Бом-Горхон (Забайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22, № 3. С. 267–273.
- Замана Л.В., Чечель Л.П.** Гидрогеохимические особенности зоны техногенеза полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. 2015. № 1–1. С. 33–38.
- Иванов В.В.** Экологическая энциклопедия элементов: Справочник : в 6 кн. Кн. 1: s-элементы. М. : Недра, 1994. 304 с.
- Иванова Г.Ф.** Геохимические условия образования вольфрамитовых месторождений. М. : Наука, 1972. 149 с.
- Коваленкер В.А., Кисилева Г.Д., Крылова Т.Л., Андреева О.В.** Минералогия и условия формирования золотоносного W-Mo порфиорового Бугдаинского месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53, № 2. С. 107–142.
- Крайнов С.Р.** Геохимия редких элементов в подземных водах (в связи с геохимическими поисками месторождений). М. : Наука, 1973. 296 с.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швецов В.М.** Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М. : Наука, 2004. 677 с.
- Семенов Е.И.** Оруденение и минерализация щелочных пород. М. : Геокарт. ГЕОС, 2007. 196 с.
- Сизых В.И.** Бом-Горхонское вольфрамовое месторождение // Месторождения Забайкалья : в 2 кн. / под ред. акад. Н.П. Лаврова. М. : Геоинформмарк, 1995. Т. I, кн. I. С. 134–138.
- Сотников В.И., Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О.** Шахтаминское молибденовое месторождение / Месторождения Забайкалья : в 2 кн. / под ред. акад. Н.П. Лаврова. М. : Геоинформмарк, 1995. Т. I, кн. I. С. 187–192.
- Удачин В.Н., Аминов П.Г., Дерягин В.В.** Химический состав техногенных вод в карьерных озерах Башкортостана // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15, № 4. С. 64–69.
- Хаустов В.В.** Формирование дренажного стока месторождения Тырныауз // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 3. С. 140–146.
- Чечель Л.П.** Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 52–63.
- Чечель Л.П., Замана Л.В.** Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 4. С. 17–25.
- Шварцев С.Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М. : Недра, 1998. 366 с.
- Li X., Wu P.** Geochemical characteristics of dissolved rare earth elements in acid mine drainage from abandoned high-As coal mining area, southwestern China // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2017. V. 24. P. 20540–20555.
- Protano G.** High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area // Environmental pollution. 2002. V. 117. P. 499–514.
- Wolkersdorfer C.** Rare earth elements (REEs) as natural tracers in mine waters / In: Merkel B.J., Planer-Friedrich B., Wolkersdorfer C. (eds) Uranium in the Aquatic Environment // Proceedings of the International Conference Uranium Mining and Hydrogeology III and the International Mine Water Association Symposium Freiberg, Germany (15–21 September 2002). Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. P. 951–958.

Автор:

Чечель Лариса Павловна, научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.
E-mail: lpchechel@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 98–107. DOI: 10.17223/25421379/17/8

L.P. Chechel

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

DISTRIBUTION OF RARE ALKALINE ELEMENTS IN WATER MINING OBJECTS OF THE EASTERN TRANSBAIKALIA

The article presents the results of a study of the distribution of lithium, rubidium, and cesium in technogenic waters of tungsten deposits - Bukukinsky, Spokoininsky, Bom-Gorkhonsky, molybdenum deposits - Shakhtaminsky, Bugdainsky and lead-zinc deposits - Blagodatsky, Akatuevsky. Hydrogeochemical testing of the deposits areas in the period from 2013 to 2015 was carried out, 46 water samples were taken. Chemical and analytical studies of waters by common methods at the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS (Chita) were carried out. The main cations and metals by the atomic adsorption method on a SOLAAR M6 spectrophotometer were determined. Additionally, analyzes of waters by the ICP-MS method at the Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk) on a high-resolution device ELEMENT 2 were carried out.

Acid sulfate waters with increased salinity and abnormally high concentrations of metals, especially Cd, Zn, Th, Mn and Al, are common in areas of the Bukukinsky, Bom-Gorkhonsky and Bugdainsky deposits. Weakly alkaline and alkaline waters of a hydrocarbonate anionic composition with high contents of W, Mo, U and As are prevalent in the regions of the Spokoininsky and Shakhtaminsky

deposits. Neutral and slightly alkaline, bicarbonate, sulfate-bicarbonate and bicarbonate-sulfate magnesium-calcium drainage waters are common in areas of the lead-zinc deposits. They are characterized by high content of As, Zn, Cd, Pb, and Mn. The ability of lithium, rubidium and cesium to concentrate in technogenic waters of deposits has been established. Mobility series of rare alkaline elements in waters, as a rule, has the form $\text{Li} > \text{Rb} > \text{Cs}$, which is explained by a weak migration of rubidium and cesium in natural waters. Rubidium and cesium have a higher sorption rate compared to lithium, while lithium can be accumulated in solution. An exception is the waters of the Shakhtaminsky deposit, which is characterized by a sequence in the series of mobility of alkaline elements $\text{Rb} > \text{Li} > \text{Cs}$, which is explained by the wide manifestation of potassium feldspathic in the Shakhtaminsky ore field. An increase in the content of rare elements in waters was fixed together with increasing salinity and acidity of solutions, most pronounced in the areas of sulfide deposits – Bukukinsky, Bom-Gorkhonsky and Bugdainsky, where maximum concentrations of elements reached values ($\mu\text{g/L}$): Li – 589.0–1062; Rb – 45.0–74.9; Cs – 3.67–49.0. At the same time, the calculation of the relative contents of rare alkaline elements (% to mineralization) showed noticeable differences in the degree of their accumulation in waters as salinity increases. So, if lithium is characterized by a constant increase in relative concentrations, then for rubidium, on the contrary, a decrease. A noticeable increase in the relative cesium content in the waters occurs with an increase in mineralization to about 1 g/L, after which they begin to decrease.

Keywords: lithium, rubidium, cesium, concentration in waters.

References

- Arsanova G.I. *Redkie shchelochi v termal'nykh vodakh vulkanicheskikh oblastey* [Rare alkalis in the thermal waters of volcanic regions]. Novosibirsk: Nauka, 2009. [Electronic resource]. Access mode: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1181535>. In Russian
- Arsanova G.I. *K geohimii cезия: istochnik cезия v termal'nykh vodakh i kislykh vulkanitakh* [To the Cesium Geochemistry: Cesium Source in the Thermal Waters and Acidic Volcanites] // *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh Prostranstvo i Vremya*. 2013. V. 4. No 1. pp. 4. In Russian
- Balashov L.S., Galicin M.S., Efremochkin E.V. *Metodicheskie rekomendatsii po geohimicheskoy oцenke i kartirovaniyu podzemnykh redkometal'nykh vod* [Guidelines for geochemical assessment and mapping of rare-metal underground waters]. Moscow: VSEGINGEO, 1977. 87 p. In Russian
- Gavrilenko V.V., Sahonenok V.V. *Osnovy geohimii redkikh litofil'nykh metallov* [Fundamentals of the geochemistry of rare lithophilic metals]. Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta, 1986. 172 p. In Russian
- Grebennikov A.M. *Spokojninskoe vol'framovoe mestorozhdenie* [Spokoininskoye tungsten deposit] / *Mestorozhdeniya Zabajkal'ya* // Pod red. akad. N.P. Laverova. (v 2 knigah). Moscow: Geoinformmark, 1995. V. I.1 pp. 106–116. In Russian
- Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Vinokurov S.F., Karamurзов B.S., Gazeev V.M., Leksin A.B., Shevchenko A.V., Dolov S.M., Dudarov Z.I. *Geohimicheskaya oцenka ekologicheskoy obstanovki v rajone deyatel'nosti Tyrnyauzskogo vol'framomolibdenovogo kombinata (Kabardino-Balkarskaya respublika, Severnyy Kavkaz): istochniki zagryazneniya okruzhayushchej sredy, vliyaniye na sosednie territorii i mery po reabilitatsii* [Geochemical assessment of the environmental situation in the area of the Tyrnyauz Tungsten-Molybdenum Combine (Kabardino-Balkar Republic, Northern Caucasus) activity: sources of environmental pollution, impact on neighboring territories and rehabilitation measures] // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 464. No 3. pp. 328–333. In Russian
- Dobrovolskaya M.G., Gordeev V.I. *Svincovo-cinkovye mestorozhdeniya* [Lead-zinc deposits] / *Mestorozhdeniya Zabajkal'ya* // Pod red. akad. N.P. Laverova. (v 2 knigah). Moscow: Geoinformmark, 1995. V. I.1. pp. 70–92. In Russian
- Zamana L.V., Chechel L.P. *Geohimiya drenaznykh vod gornorudnykh ob'ektov vol'framovogo mestorozhdeniya Bom-Gorhon (Zabajkal'e)* [Geochemistry mining drainage of the tungsten deposit Bom-Gorkhon (Transbaikalia)] // *Himiya v interesakh ustojchivogo razvitiya*. 2014. V. 22. No 3. pp. 267–273. In Russian
- Zamana L.V., Chechel L.P. *Gidrogeohimicheskie osobennosti zony tekhnogeneza polimetallicheskih mestorozhdenij Yugo-Vostochnogo Zabajkal'ya* [Hydrogeochemical features of the zone technogenesis polymetallic deposits South-Eastern Transbaikalia] // *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*. 2015. No 1–I. pp. 33–38. In Russian
- Ivanov V.V. *Ekologicheskaya enciklopediya elementov: Spravochnik v 6 knigah. Kn. 1: s-elementy*. [Environmental Encyclopedia of the Chemical Elements. A Handbook of 6 Books. B. 1: s-elements]. Moscow: Nedra, 1994. 304 p. In Russian
- Ivanova G.F. *Geohimicheskie usloviya obrazovaniya vol'framitovykh mestorozhdenij* [Geochemical conditions for the formation of tungsten deposits]. Moscow: Nauka, 1972. 149 p. In Russian
- Kovalenker V.A., Kisileva G.D., Krylova T.L., Andreeva O.V. *Mineralogiya i usloviya formirovaniya zolotonosnogo W-Mo porfirovogo Bugdainskogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabajkal'e, Rossiya)* [Mineralogy and conditions for the formation of gold-bearing W-Mo porphyritic Bugdainsky deposit (East Transbaikalia, Russia)] // *Geology of Ore Deposits*. 2011. V. 53. No 2. pp. 107–142. In Russian
- Krajnov S.R. *Geohimiya redkikh elementov v podzemnykh vodakh (v svyazi s geohimicheskimi poiskami mestorozhdenij)* [Geochemistry of rare elements in groundwater (in connection with the geochemical search for deposits)]. Moscow: Nauka, 1973. 296 p. In Russian
- Krajnov S.R., Ryzhenko B.N., Shvec V.M. *Geohimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Groundwater geochemistry. Theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow: Nauka, 2004. 677 p. In Russian
- Semenov E.I. *Orudnenie i mineralizatsiya shchelochnykh porod* [Mineralization of alkaline rocks]. Moscow: Geokart. GEOS, 2007. 196 p. In Russian
- Sizyh V.I. *Bom-Gorhonskoe vol'framovoe mestorozhdenie* [Bom-Gorkhonsky tungsten deposit] / *Mestorozhdeniya Zabajkal'ya* // Pod red. akad. N.P. Laverova. (v 2 knigah). Moscow: Geoinformmark, 1995. V. I.1. pp. 134–138. In Russian
- Sotnikov V.I., Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O. *Shakhtaminskoe molibdenovoe mestorozhdenie* [Shakhtaminsk molybdenum deposit] / *Mestorozhdeniya Zabajkal'ya* // Pod red. akad. N.P. Laverova. (v 2 knigah). Moscow: Geoinformmark, 1995. V. I.1. pp. 187–192. In Russian
- Udachin V.N., Aminov P.G., Deryagin V.V. *Himicheskij sostav tekhnogennykh vod v kar'ernykh ozerakh Bashkortostana* [The chemical composition of technogenic waters in the pit lakes of Bashkortostan] // *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2008. V. 15. No 4. pp. 64–69. In Russian
- Haustov V.V. *Formirovanie drenazhnogo stoka mestorozhdeniya Tyrnyauz* [Formation of drainage flow of Tyrnyauz deposit] // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012. No 3. pp. 140–146. In Russian
- Chechel L.P. *Ekologo-gidrogeohimicheskie posledstviya otrabotki vol'framovykh i molibdenovykh mestorozhdenij Vostochnogo Zabajkal'ya* [Ecological and hydrochemical consequences of mining tungsten and molybdenum deposits of the Eastern Transbaikalia] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2017. No 6. pp. 52–63. In Russian

Chechel L.P., Zamana L.V. *Geohimicheskie tipy vod hvostohranilishch svincovo-cinkovyh mestorozhdenij Vostochnogo Zabajkal'ya* [The geochemical types of waters of the tailings of lead-zinc deposits at the Eastern Transbaikalia] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2019. No 4. pp. 17–25. In Russian

Shvarcev S.L. *Gidrogeohimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow : Nedra, 1998. 366 p. In Russian

Li X., Wu P. Geochemical characteristics of dissolved rare earth elements in acid mine drainage from abandoned high-As coal mining area, southwestern China // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2017. V. 24. pp. 20540–20555.

Protano G. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area // Environmental pollution. 2002. V. 117. pp. 499–514.

Wolkersdorfer C. Rare earth elements (REEs) as natural tracers in mine waters / In: Merkel B.J., Planer-Friedrich B., Wolkersdorfer C. (eds) *Uranium in the Aquatic Environment* // Proceedings of the International Conference Uranium Mining and Hydrogeology III and the International Mine Water Association Symposium Freiberg, Germany (15–21 September 2002). Springer, Berlin, Heidelberg. 2002. pp. 951–958.

Author:

Chechel Larisa P., Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: lpchechel@mail.ru

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.048

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФОВ СТОКА АРКТИЧЕСКИХ РЕК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ПРОГРАММЕ HBV-LIGHT ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ПОВОДОДЬЯ



С.Г. Копысов¹, В.А. Земцов¹, Х. Мацуяма², А.О. Елисеев¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Столичный университет Токио, Токио, Япония

Исследованы возможности предвычисления гидрографов стока арктических рек и максимумов заданной вероятности превышения на основе концептуальной модели HBV-light. Расчеты выполнены для рек Полуй, Надым, Пур, Таз и др. Проведена калибровка и обобщение параметров модели. Точность расчета гидрографов при небольшом объеме данных стандартных наблюдений не уступает точности более сложных детерминированных моделей, требующих больший объем и лучшее качество исходных данных.

Ключевые слова: Западная Сибирь, арктические реки, моделирование гидрографа, максимальный расход воды, модель HBV-light.

Введение

В настоящее время активизируется деятельность по освоению и использованию природных ресурсов Арктических регионов, в нашей стране выполняется государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации». Проблемы обеспечения и развития гидрологических расчетов в арктической зоне России и сопредельных районов становятся все более актуальными [Макарьева и др., 2018; Магрицкий и др., 2019].

Возрастает и роль гидрологических прогнозов на северных реках. Решение гидрологических задач затрудняется тем, что для всего региона характерно весьма слабое развитие стационарной сети гидрометеорологических наблюдений, что относится и к северу Западной Сибири, где крайне ограничены многолетние данные по режиму речного стока. В процессе климатических изменений, наиболее интенсивно происходящих в Арктике, и соответствующей трансформации природной среды [Второй оценочный доклад, 2014], решение задач гидрологических расчетов и прогнозов еще более осложняется вследствие неполноты данных и нестационарности ранее накопленных рядов гидрометеорологических наблюдений. Паводки и вызываемые ими наводнения в силу неопределенности прогнозов представляют собой наиболее распространенные и опасные природные явления, формируемые метеорологическими факторами в контексте изменений климата, определяя важность оценки их величины и риска [Alfieri et al., 2017].

В таких условиях возрастает роль гидрологических моделей для оценки и прогноза гидрографов

стока и его экстремальных характеристик в бассейнах, отличающихся разной степенью гидрологической изученности, в том числе и неизученных рек. Актуальность работы обусловлена наличием пропусков в гидрологических наблюдениях, необходимых для мониторинга климатических изменений, строительства и рационального природопользования на заболоченных нефтегазоносных территориях. Важнейшей гидрологической задачей является оценка режима паводков и наводнений. Также важен прогноз изменений гидрологического режима территории при ожидаемых изменениях климата и ландшафтов.

Принимая во внимание слабое развитие сетей гидрологических наблюдений, недостаточное количество и статистическую неоднородность многолетних рядов наблюдений на многих реках мира, Международная ассоциация гидрологических наук (IAHS) организовала две десятилетние программы скоординированных исследований, нацеленные на получение гидрологической информации, необходимой для изучения и комплексного управления водными ресурсами. Первая из них посвящена расчетам стока неизученных рек – «Prediction on Ungauged Basins, PUB», 2003–2012 [Hrachowitz et al., 2013], вторая – «Panta Rhei» (от слов философа Гераклита «Все течет»), 2013–2022, ориентирована на исследование влияния изменений климата и трансформации ландшафтов водосбора на сток рек [Montanari et al., 2013; Thirel et al., 2015]. Основными задачами здесь являются оценка показателей стока неизученных рек, а затем – влияния на него изменений климата и характера землепользования в бассейнах.

С точки зрения моделирования гидрографов стока рек, прежде всего с суточным (или часовым) разрешением, наибольший интерес для решения практических задач представляют достаточно простые концептуальные полураспределенные модели резервуарного типа, такие, например, как Tank Model [Sugawara et al., 1974], разработанная в Национальном исследовательском центре по предотвращению стихийных бедствий в Токио (Япония) и модель HBV Шведского института метеорологии и гидрологии, впервые представленная в 1972 г. С. Бергстремом [Bergström, Forsman, 1973]. После испытаний эффективности на разных реках мира программы HBV и Tank Model включены в фонд алгоритмов и программ Гидрологической оперативной многоцелевой системы ГОМС (http://www.wmo.int/pages/prog/hwtr/homs/homs_ru.html) Всемирной метеорологической организации, соответственно, как компоненты J04.2.02 и J04.1.01, предлагаемые для использования в гидрологических прогнозах [Руководство..., 2012; Романов, 2018]. Для включения в фонд ГОМС, который обновляется недостаточно оперативно, программы должны быть доступными и строго документированными. Отечественных программ в указанном фонде пока нет.

Концептуальная модель HBV существует в разных версиях и нашла широкое применение в разнообразных физико-географических условиях различных стран. С этой точки зрения она достаточно универсальна и стала прототипом для разработки поздней модели HBV-light [Seibert, 2005; Seibert, Vis, 2012]. В настоящее время программа применяется в ряде университетов мира для обучения студентов и выполнения исследовательских проектов. Основные концепции модели хорошо известны в профессиональном гидрологическом сообществе.

Более сложные детерминированные модели применяются в слабоизученных районах, в том числе на севере Западной Сибири, менее широко – в силу отсутствия исходных данных для их использования. В частности, Е.М. Гусев и соавт. [2015] исследовали формирование стока рек Таз, Пур, Надым и снежного покрова в бассейне Таза на основе детерминированной модели тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информацией глобальных баз данных по характеру подстилающей поверхности (топография, почвы, растительность) и материалов наблюдений на метеостанциях региона. Калибровка параметров выполнялась по данным о речном стоке. Расчеты гидрографов стока рек с суточным разрешением показали обнадеживающие результаты.

Цель настоящей работы – определение возможности воспроизведения гидрографов стока ряда северных рек (включая максимальные расходы половодья и паводков) на основе относительно простой

концептуальной модели HBV-light, определения и географического обобщения параметров модели и вычисления максимальных расходов воды заданной вероятности превышения. При положительных результатах это сделает возможным также оптимизировать систему гидрологического мониторинга в труднодоступных районах и решать другие задачи, в том числе оценивать реакции гидрологических систем на задаваемые сценарии изменения климата.

Территория исследований и формирование стока рек

Исследуемый регион расположен на севере Западно-Сибирской равнины и объединяет как разные по размерам бассейны собственно арктических рек Таз, Пур, Пяку-Пур, Правая Хетта, Надым и Полуй, текущих к северу от Сибирских Увалов (в официальных границах Арктической зоны Российской Федерации [Макарьева и др., 2018]), и субарктических рек Аган и Вах, течение которых направлено к долине реки Обь в юго-западном направлении (рис. 1). Общая площадь бассейнов до створов, для которых моделировался сток воды, составляет более 330 тыс. км². Наиболее контрастный рельеф наблюдается в верховьях рек Таза, Пура и Ваха, к северу поверхность становится относительно ровной с небольшим уклоном в северном направлении.

Климат большей части территории умеренно континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким летом. Атмосферное увлажнение избыточное. Хорошо выражена широтная зональность и сезонность гидроклиматических показателей. Приустьевые участки крупных северных рек находятся в зоне тундры и лесотундры, которая южнее переходит в подзону северной тайги. В бассейне Ваха распространены северо-таежные ландшафты на севере и среднетаежные – на юге.

Основным гидрологическим сезоном на реках является хорошо выраженное весеннее половодье, в течение которого на северных реках проходит около половины объема годового стока. Половодье отличается достаточно резким подъемом и спадом расходов и уровней воды. Впервые подробный гидрологический анализ половодья в Западной Сибири выполнен Д.А. Бураковым [1978], который показал, что основная роль в формировании половодья северных рек принадлежит запасам воды в снеге перед началом таяния и осадкам периода снеготаяния. Они формируют сток талых вод, который составляет в среднем от 75 до 80 % стока половодья на реках Надым, Пур и Таз соответственно. Второе место по величине притока воды в половодье составляет подземный сток (12–18 %). Именно межгодовая изменчивость талого стока, в основном, и определяет высоту максимумов половодья в разные годы. В летне-осенний период наблюдаются дождевые паводки.

Зима, в течение которой реки переходят на подземное питание, продолжается более полугода.

В более поздней работе по гидрологии севера Западной Сибири [Zakharova et al., 2009] с привлечением данных спутникового зондирования показано, что на фоне возрастания температуры воздуха и атмосферных осадков происходит снижение стока рек Полуй и Пур. На Надыме существенно снизилась доля талого стока в годовом – до 29 % в среднем за 2000–2008 гг. (за счет увеличения базового стока) – по сравнению с 49 % талого стока на р. Пур. В [Zakharova et al., 2011] исследована зависимость стока половодья от определенных по спутниковым данным максимальных запасов воды в снежном покрове. Обнаружен рост потерь талого стока примерно на 50 мм/год в бассейне Полуя, Надыма, Пура и Таза в 1988–2006 гг. При этом максимальный расход половодья на реках Полуй, Надым и Пур в 7 раз превышает средний годовой расход воды, а на р. Таз – в 3,5 раза [Zakharova et al., 2011].

Арктические реки протекают в области распространения многолетней мерзлоты. С севера на юг сменяются зоны сплошной, прерывистой и островной многолетней мерзлоты. Бассейны Агана и Ваха расположены большей частью в пределах зоны островной мерзлоты. В связи с потеплением, особенно интенсивно проявляющимся на севере в последние годы, наблюдается таяние и деградация мерзлоты, что наряду с некоторым ростом атмосферного увлажнения способствует увеличению притока как подземных, так и поверхностных вод в реки. Параллельно в связи с замедленным отводом воды с плоских междуречных заболоченных и заозеренных пространств происходит еще большее увлажнение территории бассейнов северных арктических рек.

Исходные данные и методы исследования

На территории Сибири сеть метеостанций и гидрометрических постов крайне редкая – расстояния между пунктами наблюдений измеряются десятками или сотнями километров. Северная половина Западной Сибири относится к наименее изученным в гидрометеорологическом отношении областям континента [Гидрология..., 2009]. Всего моделировались процессы формирования стока с девяти бассейнов. Площадь самого малого бассейна р. Правая Хетта до п. Пангоды равна 1 200, а самого крупного бассейна р. Таз до п. Сидоровск – 100 тыс. км² (табл. 1).

Ежедневные расходы воды для имитационного моделирования водного цикла в замыкающих створах модельных бассейнов получены из открытых источников Государственного водного кадастра (гидрологических ежегодников), а за последние годы – из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [АИС ГМВО]. Данные по ежедневным осадкам и температурам воздуха с 1937 по 2017 г. для ближайших ме-

теорологических станций получены из базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [ВНИГМИ-МЦД].

Наряду с разреженностью пунктов гидрометеорологической сети качество гидрологических данных невысокое, так как ряды наблюдений за 1990–2000-е гг. содержат значительное количество пропусков, а сами измеренные расходы воды – значительные погрешности в результате затопления обширных речных пойм и ледовых явлений во время прохождения высоких вод половодья, а также наличия ледового покрова и внутриводного льда в реках зимой. Таким образом, при моделировании гидрографов мы вынуждены сталкиваться с результатами воздействия механических факторов собственно в руслах рек.

Гидрологическая модель

Для решения поставленных задач использована модель HBV-light в базовой простой Windows-версии, позволяющей оперировать имеющимися в регионе данными сетевых наблюдений за атмосферными осадками и температурой воздуха с суточным разрешением и в интерактивном режиме выполнять калибровку параметров и анализировать результаты расчетов [Seibert, 2005; Seibert, Vis, 2012].

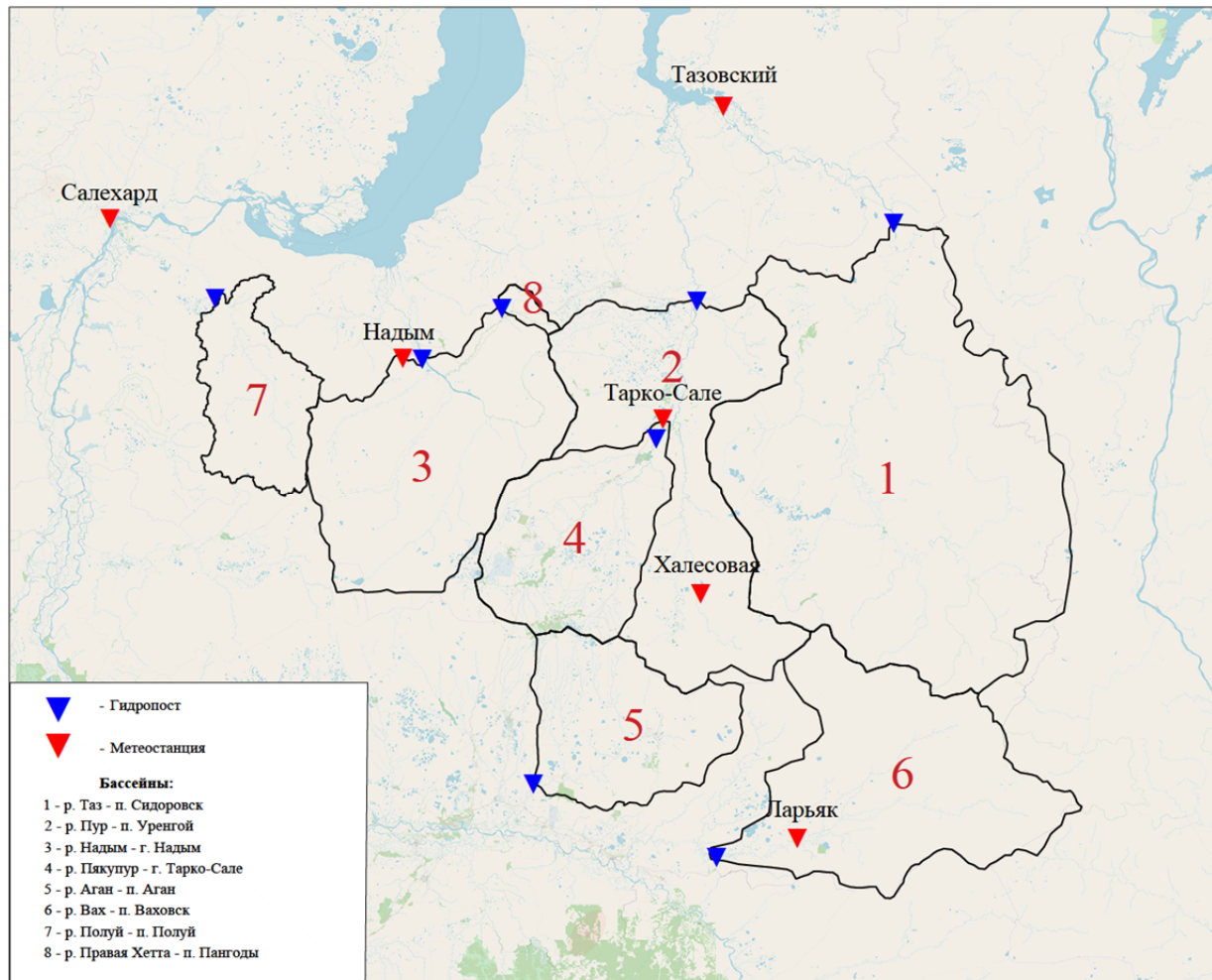
Модель HBV описывает общий баланс воды в бассейне следующим образом:

$$P = E + Q + \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + VL), \quad (1)$$

где P – осадки, E – суммарное испарение, Q – сток, SP – снежный покров, SM – влажность почвы, UZ – запас воды в верхней зоне подземных вод, LZ – в нижней зоне подземных вод и VL – объем озер (все составляющие выражены в миллиметрах слоя воды).

Исследуемый географически неоднородный водосбор может быть разделен на подбассейны, а также более или менее однородные зоны растительности или землепользования. HBV-light преобразовывает суточный приток воды, осадки, температуру воздуха и среднесуточный месячный слой потенциального испарения в снеготаяние, водоотдачу и затем сток воды. Осадки моделируются как снег или дождь в зависимости от температуры: выше или ниже пороговой.

Основные модули программы включают: 1) накопление и таяние снега (последнее – по температурным коэффициентам стаивания), водоотдачу талых вод; 2) расчет влажности почвы и формирование испарения, просачивания воды в почву и стока в верхнем и нижнем слое почвогрунта; 3) расчет гидрографа стока воды в замыкающем створе. Параметры модели определяются путем их калибровки, исходя из критерия качества модели, обеспечивающего как можно лучшее соответствие рассчитанных модельных ежедневных расходов воды в замыкающем створе бассейна наблюдаемым расходам.

**Рис. 1. Территория исследований**

Бассейны: 1 – р. Таз – п. Сидорск; 2 – р. Пур – п. Уренгой; 3 – р. Надым – г. Надым; 4 – р. Пякупур – г. Тарко-Сале; 5 – р. Аган – п. Аган; 6 – р. Вах – п. Ваховск; 7 – р. Полуй – п. Полуй; 8 – р. Правая Хетта – п. Пангоды

Fig. 1. The study area

Numbers indicate the model river basins: 1 – Taz River – Sidorovsk; 2 – Pur River – Urengoy; 3 – Nadym River – Nadym; 4 – Pyaku-Pur River – Tarko-Sale; 5 – Agan River – Agan; 6 – Vakh River – Vakhovsk; 7 – Poluy River – Poluy; 8 – Prevaya Hetta River – Pangody. Gauge Stations are indicated by blue triangles, Meteorological Stations – by red triangles

Таблица 1

Сведения о модельных бассейнах, метеостанциях и весовых коэффициентах к осадкам на метеостанциях для определения осадков на водосборе, показатели точности

Table 1

Information about model basins, meteorological stations and weights to precipitation depths at meteorological stations to determine precipitation in the catchment, model performance statistics

Река – пост	$A, \text{ км}^2$ / $H_{\text{ср}}, \text{ м}$	Метеостанции (высота, м над у. м.)	Координаты центра водосбора	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели $Reff$	Коэффициент эффективности $Reff$ за половодье
Вах – Ваховск	56 200 /100	0,85Ларьяк (57) +0,15Александровское (48)	N61°37' E81°37'	2008–2015	0,91	0,90	0,93
Вах – Лобчинское	56 400 /100	0,85Ларьяк (57) +0,15Александровское (48)	N61°37' E81°37'	1962–1973	0,88	0,88	0,89
Аган – Аган	29 700 /95	0,5Ларьяк (57) +0,5Халесовая (67)	N62°14' E76°15'	1971–1976	0,85	0,85	0,87

Река – пост	А, км ² / Н _{ср} , м	Метеостанции (высота, м над у. м.)	Координаты центра водосбора	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели R_{eff}	Коэффициент эффективности R_{eff} за половодье
Пяку-Пур – Тарко-Сале	32 900 /80	0,5Тарко-Сале (25) +0,5Халесовая (67)	N64°06' E75°47'	2008–2017	0,81	0,78	0,86
Надым – Надым	48 000 /50	0,7Надым (19) +0,3Тарко-Сале (25)	N64°37' E73°11'	2012–2016	0,67	0,42	0,63
Пур – Уренгой	80 400 /90	0,7Тарко-Сале (25) +0,3Халесовая (67)	N64°18' E76°48'	2008–2018	0,78	0,72	0,85
Таз – Сидоровск	100 000 /90	0,5Толька (33) +0,5Тарко-Сале (25)	N64°28' E82°23'	1987–1990	0,86	0,85	0,85
Правая Хетта – Пангоды	1 200 /70	0,5Надым (19) +0,5Тарко-Сале (25)	N65°53' E74°52'	1983–1990	0,72	0,71	0,80
Полуй – Полуй	15 100 /70	0,3Салехард (16) +0,7Надым (19)	N65°12' E69°25'	2008–2018	0,86	0,85	0,90

Примечание. А – площадь водосбора; Н_{ср} – средняя высота водосбора.

Note. A – watershed area; Н_{ср} – mean basin altitude.

Ежедневные слои осадков на водосборе определялись по данным наблюдений на метеостанциях, расположенных в пределах его площади либо на метеостанциях, ближайших к нему. Названия метеостанций, выбранных для каждого модельного водосбора, и весовые коэффициенты к слою осадков каждой станции указаны в третьем столбце табл. 1. Величина осадков принималась одинаковой на всей площади соответствующего модельного бассейна.

В программе HBV-light потенциальное испарение (испаряемость) задается среднегодовыми месячными значениями на метеостанции, поэтому межгодовая изменчивость испаряемости не учитывается. На наш взгляд, это один из основных недостатков данной программы, в которой отдельным файлом задаются среднегодовые значения испаряемости за каждый месяц (мм/сут).

Величина испаряемости, согласно рекомендациям И.В. Карнацевича и др. [2007], вычислялась нами по сумме месячных температур выше 0 °C с учетом затрат тепла на таяние снежного покрова и сезонной мерзлоты, а затем распределялась пропорционально дефициту влажности. За расчетный период принят современный (1986–2015 гг.) период оценки составляющих водного баланса суши [Паромов и др., 2017].

Калибровка модели

В результате калибровки требуется определить значения ряда параметров, показанных в табл. 2. Калибровка, т.е. подбор значений модельных параметров, выполнялась вручную, с пошаговым контролем результатов. В качестве критериев качества модели мы использовали: 1) коэффициент детерминации R^2 , равный квадрату коэффициента линейной корреляции связи между рассчитанными и наблюдаемыми ежедневными расходами воды в замыкающем створе модельного бассейна, а также 2) коэффициент эффективности R_{eff} Нэша–Сатклиффа, рассчитываемый по формуле:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (2)$$

где Q_{sim} – смоделированный расход воды, мм/сут; Q_{obs} – наблюдаемый расход, мм/сут; t – время, сут. Так как критерий R_{eff} более чувствителен к пиковым расходам [Seibert, Vis, 2012; Wijayarathne, Coulibaly, 2020], он вычислялся для всего калибровочного периода и отдельно – для периода половодья. Коэффициент детерминации характеризует сходимость модельных расходов воды с наблюдаемыми во всем диапазоне их колебаний. Промежутки времени для калибровки параметров на разных реках не совпадают по той причине, что многие ряды, как сказано

выше, содержат значительное количество пропусков наблюдений.

Качество аппроксимации гидрографов стока достаточно высокое, о чем говорят близкие к единице значения всех трех критериев качества аппроксимации у большинства модельных водосборов. Эффективность моделей для периода половодья несколько выше, чем для всего массива данных по каждому бассейну. Моделирование стока р. Надым у пос. Надым показало несколько худшие результаты. Нужно отметить, что для бассейнов Надыма, Пура и Таза точность воспроизведения гидрографов с суточным разрешением почти не отличается от таковой, полученной Е.М. Гусевым и др. [2015] с помощью намного более сложной детерминированной модели SWAP.

В результате калибровочных расчетов параметры модели удалось разделить на две группы: индивидуальные и общие. Параметры первой группы подбирались индивидуально для каждого бассейна, значения параметров второй группы оказались общими для всех модельных водосборов, учитывая относительное сходство ландшафтных условий на всей исследуемой территории (см. табл. 3). Основным определяемым для каждого водосбора параметром является пороговая температура начала снеготаяния TT , зависящая от расположения метеостанций от-

носительно центра водосбора расчетной реки. От размера, т.е. площади водосбора, и других условий стока, влияющих на скорость добегания, зависит параметр $MAXBAS$, он отражает количество дней, на которые распределяется генерируемый суточный сток на каждом временном шаге, с учетом весовых коэффициентов. Также для каждого водосбора подбирались коэффициенты сработки вод нижнего и верхнего яруса – таким образом, чтобы точнее описать меженный (базовый) сток в зависимости от гидрогеологических условий в конкретном бассейне. Подбирался и параметр FC (характеризует запас воды в деятельном слое водосбора), он интегрально учитывает мощность деятельного слоя и его гранулометрический состав (пески, глины, торф). Параметр LP определяет часть максимального запаса воды в почве, при которой фактическое испарение достигает величины потенциального испарения. Все остальные параметры для всей исследуемой территории подобраны одинаковыми, т.е. имеют региональное значение. Региональные значения параметров использовались, например, одним из авторов для моделирования стока неизученных рек региона в работе [Pokrovsky et al., 2020]. В любом случае важно, чтобы данные для калибровки включали в себя разные по водности годы, обычно для этого бывает достаточно нескольких лет [Seibert, Vis, 2012].

Таблица 2

Параметры модели, определяемые калибровкой

Table 2

Model parameters to be defined by means of calibration

Параметр	Описание	Единицы измерения
TT	Пороговая температура начала снеготаяния (зависит от расположения метеостанций)	$^{\circ}C$
$CFMAX$	Коэффициент стаивания, смещает пик половодья во времени	$мм/(^{\circ}C \cdot сут)$
$SFCF$	Поправочный коэффициент к твердым осадкам	–
SP	Сезонная изменчивость коэффициента стаивания	–
CFR	Коэффициент повторного замерзания талой воды	–
CWH	Водоудерживающая способность снега в долях от запаса воды в снежном покрове	–
FC	Максимальный запас воды в почве	мм
LP	Влагосодержание почвы, при котором испарение с нее достигает величины потенциального испарения	мм
$Beta$	Коэффициент, определяющий распределение дождевой или талой воды между пополнением запаса воды в почве и пополнением подземных вод	–
$K0$	Коэффициент истощения вод деятельного слоя	1/сут
$K1$	Коэффициент истощения верхнего горизонта подземных вод	1/сут
$K2$	Коэффициент истощения нижнего горизонта подземных вод	1/сут
UZL	Глубина воды в верхнем горизонте подземных вод (влияет на максимум гидрографа)	мм
$PERC$	Максимальная интенсивность просачивания из верхнего горизонта в нижний	мм/сут
$MAXBAS$	Параметр, определяющий количество дней, на которые распределяется генерируемый суточный сток на каждом временном шаге с учетом весовых коэффициентов (зависит от площади водосбора и скорости добегания)	сут

Таблица 3

Значения параметров модели HBV-light для северных рек, ориентированные на оценку максимумов половодья

Table 3

Model HBV-light parameter values for northern rivers selected for flood peaks prediction

Условное обозначение	Единица измерения	Правая Хетта – Пангоды	Полуй – Полуй	Надым – Надым	Пур – Уренгой	Пяку-Пур – Тарко-Сале	Таз – Сидоровск	Вах – Ваховск	Вах – Лобчинское	Аган – Аган
ТТ	°С	–0,5	–1,9	–1,4	–1,2	–1,0	–1,0	0,5		–1,5
CFMAX	мм/(°С*сут)	2,5								
SFCF	–	1								
SP		1								
CFR	–	0,05								
CWH	–	0,1								
FC	мм	200	300	200	180	200	150	300	150	250
LP	–	0,8	0,5	0,1	0,6	1,0	0,3	0,5		0,5
Beta	–	1,0								
K ₀	1/сут	0,1								
K ₁		0,2	0,95	0,5	0,7	0,5	0,2	0,5		0,7
K ₂		0,02	0,006	0,005	0,006	0,01	0,009	0,05		0,007
UZL	мм	10								
PERC	мм/сут	2								
MAXBAS	сут	4	30	50	42	36	45	80		60

Результаты и обсуждение

Воспроизведение гидрографов стока в модели HBV-light, реализованной в виде программного продукта [Seibert, Vis, 2012], заключается в подготовке исходных данных и подборе модельных параметров, позволяющих рассчитывать суточный слой стока по температуре и осадкам с ближайших метеостанций. В данной работе разделение водосборов на высотные и ландшафтные зоны не производилось, чтобы не создавать избыточную информативность, не подтвержденную исходной метеорологической информацией. Была выбрана стандартная структура модели без учета специфики землепользования в бассейне. Параметры получены целиком для всей площади каждого модельного бассейна, без ее фрагментации. Основной проблемой для моделирования стока является недостаточная метеорологическая изученность территории.

Для визуальной проверки результатов моделирования за период калибровки приведен рис. 2, откуда видно, что фактические и модельные гидрографы стока практически наложены друг на друга, а пики максимального стока наблюдаются в одни и те же промежутки времени на обоих гидрографах, прослеживается синхронность колебаний. Критерий качества за период калибровки высокий, и модели после дальнейшей проверки могут быть использованы для оценки изменения речного стока в усло-

виях современного изменения климата, а также на более отдаленную перспективу.

При моделировании для створа р. Вах – п. Ваховск было выявлено, что если для калибровки использовать данные за 2008–2015 гг., то пики на модельных гидрографах до 1990 г. всегда ниже наблюдаемых. Данных за период 1991–2007 гг. в свободном доступе нет. Переносом поста из Лобчинского в Ваховск такое снижение качества моделирования с 0,90 до 0,77 объяснить невозможно. Поэтому были подобраны параметры за 1962–1973 гг., когда пост находился в п. Лобчинский. При этом качество моделирования возросло с 0,77 до 0,89 после уменьшения всего лишь одного параметра FC, отражающего максимальный запас воды в деятельном слое водосбора с 300 до 150 мм. Подобное можно объяснить климатическими изменениями, приведшими к уменьшению глубины промерзания и увеличению мощности деятельного слоя в период между 1990 и 2008 гг.

Пик половодья, обусловленный снеготаянием, хорошо моделируется и может хорошо прогнозироваться. Это объясняется тем, что величина осадков, фиксируемая на метеостанциях, является случайной величиной, но за период снегонакопления случайные колебания взаимно компенсируются, что позволяет смоделировать максимальный снеговой запас на водосборе и его таяние. Если же на снеговое половодье накладывается случайная величина дождевых

осадков, не отражающих ситуацию в целом на водосборе, то качество моделирования падает. Такая же ситуация имеет место при моделировании паводков, обусловленных локальным выпадением жидких осадков. Известно, что наибольшие отличия смоделированного и измеренного стока возникают из-за несоответствия измеренных на одной-двух метеостанциях осадков, используемых для моделирования, усредненному по всей водосборной площади увлажнению.

Для проверки эффективности полученных моделей осуществлена их валидация на независимом материале, т.е. с использованием данных гидрометеорологических наблюдений, которые не принимались в расчет при определении модельных параметров (табл. 4). При этом модели прогонялись с параметрами из табл. 3. За некоторыми исключениями, согласно принятым в Росгидромете критериям оценки качества методики прогноза [Георгиевский, Шаноч-

кин, 2007] по R^2 или по отношению стандартной погрешности оценки суточных расходов воды по модели к среднему квадратическому отклонению наблюдаемых данных, модель дает удовлетворительные результаты даже для р. Надым у п. Надым, а для р. Вах – хорошие результаты.

В заключение, по аналогии с работой [Nesterova et al., 2019], покажем возможность оценки максимумов половодья заданной вероятности превышения, опираясь на модельные данные. Для этого выбраны бассейны р. Вах до п. Лобчинское и р. Пяку-Пур до п. Тарко-Сале, для которых получено достаточно высокое качество моделирования как по результатам калибровки, так и на этапе валидации модели. Сравнение эмпирических кривых обеспеченности, построенных отдельно для наблюдаемых и смоделированных значений максимальных расходов половодья показывает их хорошее соответствие (рис. 3, 4).

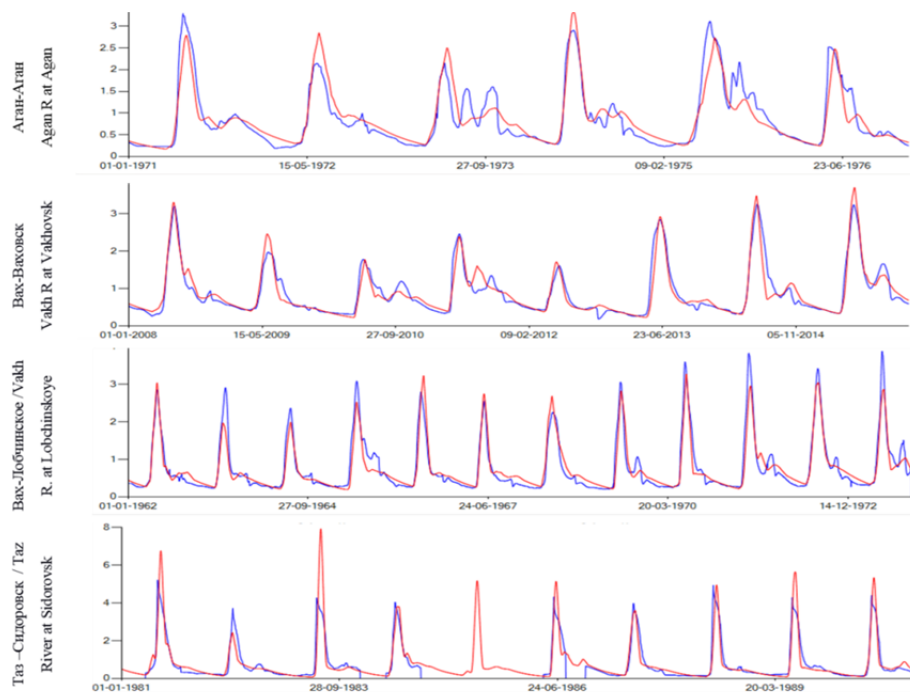


Рис. 2. Наблюдаемые (линии синего цвета) и смоделированные в HBV-light (красные линии) гидрографы стока (мм/сут) за период подбора модельных параметров для оценки максимальных расходов воды

Fig. 2. Observed (blue lines) and simulated (red lines) in the HBV-light model water flow hydrographs (mm day⁻¹) over the period of parameter calibration for maximum water discharges prediction

Таблица 4

Результаты проверки качества моделирования на независимых данных

Table 4

Results of the simulation quality testing based on independent data

Река – пост	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели R_{eff}	Эффективность моделирования половодья R_{eff}
Вах – Ваховск	2017–2018	0,86	0,70	0,78
Вах – Лобчинское	1955–1961	0,81	0,78	0,78
	1982–1990	0,80	0,78	0,84
Аган – Аган	05.1966–1968	0,75	0,75	0,77

Река – пост	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели R_{eff}	Эффективность моделирования половодья R_{eff}
	1978–1979	0,75	0,56	0,56
Пяку-Пур – Тарко-Сале	2018	0,77	0,22	0,19
Надым – Надым	07.2017–2018	0,64	0,53	0,61
Таз – Сидоровск	05.1981–1983	0,76	0,59	0,54
Правая Хетта – Пангоды	1981–04.1982	0,76	0,73	0,72

Примечание. Полужирным шрифтом показаны низкие показатели качества.

Note. Low values of the model performance criteria are shown in Bold.

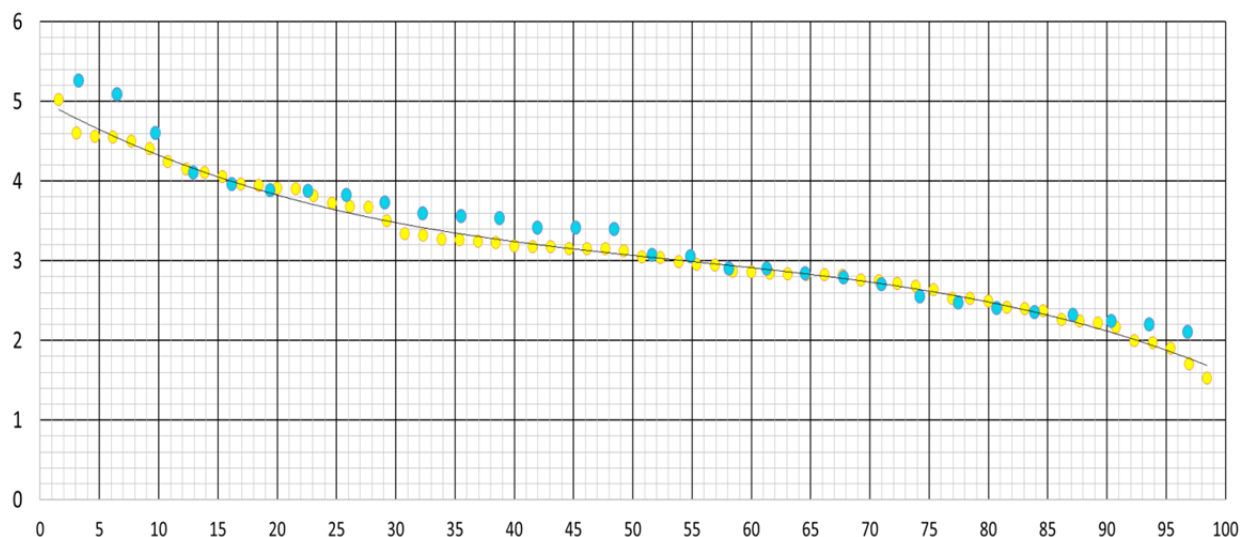


Рис. 3. Кривые обеспеченности наблюдаемых и смоделированных максимальных суточных слоев стока воды (мм/сут), р. Вах – п. Лобчинское

Голубые значки – данные наблюдений за 1956–1990 гг.; желтые значки – модельные данные за 1956–2019 гг.

Fig. 3. Probability of exceedance functions for observed and simulated maximum daily runoff depths (mm/day), the Vakh River at Lobchinskoye

Light blue marks – data observed in 1956–1990; yellow marks – data modeled for 1956–2019

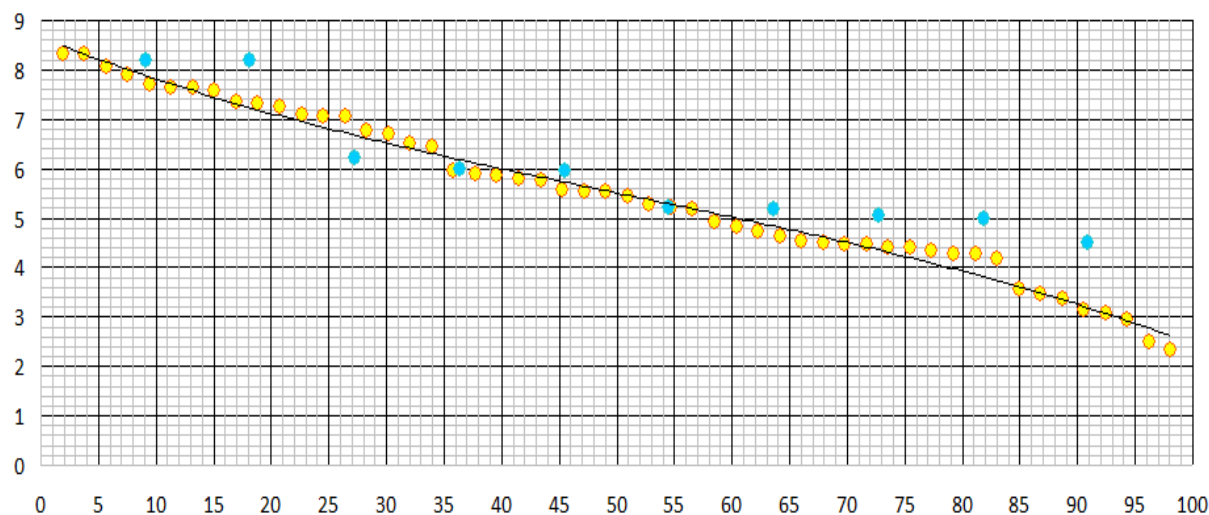


Рис. 4. Кривые обеспеченности наблюдаемых и смоделированных максимальных суточных слоев стока воды (мм/сут), р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале

Голубые значки – данные наблюдений за 2008–2018 гг.; желтые значки – модельные данные за 1967–2018 гг.

Fig. 4. Probability of exceedance functions for observed and simulated maximum daily runoff depths (mm/day), the Pyaku-Pur River at Tarko-Sale

Light blue marks – data observed in 2008–2018, yellow marks – data modeled for 1967–2018

Заключение

По данным наблюдений за температурой воздуха и суммой атмосферных осадков с суточным разрешением на метеостанциях севера Западно-Сибирской равнины и ежедневным расходом воды, получены значения параметров концептуальной модели HBV-light [Seibert, Vis, 2012] для вычисления гидрографов стока арктических рек Полуй, Надым, Малая Хетта, Пяку-Пур, Пур и Таз, а также рек субарктики Вах и Аган. Площадь самого малого бассейна р. Правая Хетта до п. Пангоды равна 1 200, а самого крупного бассейна р. Таз до п. Сидоровск составляет 100 тыс. км².

Воспроизведение гидрографов стока в модели HBV-light заключается в подготовке исходных данных и подборе модельных параметров, позволяющих рассчитывать суточный слой стока по температуре и атмосферным осадкам на ближайших метеостанциях. В данной работе разделение водосборов на высотные и ландшафтные зоны не производилось, чтобы не создавать избыточную информативность, не подтвержденную наличием исходной метеорологической информацией. Была выбрана стандартная структура модели без учета специфики землепользования в бассейне. Параметры получены целиком для всей площади каждого модельного бассейна, без ее детализации.

Калибровка модельных параметров для рек показывает, что относительно простая концептуальная модель HBV-light хорошо воспроизводит внутригодовую динамику стока, в том числе расходы воды в период половодья. Точность воспроизведения гидрографов стока северных рек не уступает точности более сложных детерминированных моделей в связи с отсутствием достаточно густой сети гидрометеорологических наблюдений и необходимостью определения многочисленных параметров сложных моделей.

Ручная калибровка модельных параметров позволяет осмысленно использовать модель HBV-light для регионального моделирования элементов водного цикла и гидрографов стока. При этом определяются

шесть индивидуальных для каждого бассейна параметров и девять общих региональных, отражающих сходство ландшафтных условий на всей исследуемой территории. К индивидуальным параметрам отнесены: пороговая температура начала снеготаяния TT, параметр MAXBAS, коэффициенты истощения вод нижнего и верхнего яруса модели, максимальное влагосодержание деятельного слоя FC и параметр LP. Показано, что значения каждого из остальных девяти параметров модели могут задаваться одинаковыми для всей исследуемой территории, т.е. имеют региональный характер, что позволяет вычислять гидрографы стока, в том числе максимальные расходы воды неизученных и слабо изученных рек.

В целом полученные критерии качества за период калибровки и валидации моделей достаточно высоки, и модель может быть при определенных условиях использована для оценки изменения речного стока в условиях современного изменения климата, а также на более отдаленную перспективу. Пик половодья, обусловленный снеготаянием, моделируется лучше, чем пики, вызванные дождевыми паводками. Фиксируемая на метеостанциях величина осадков принимает случайные значения, но за период снегонакопления – случайные колебания взаимно компенсируются. Поэтому для бассейнов с высоким качеством моделирования сравнение эмпирических кривых обеспеченности показывает хорошее соответствие наблюдаемых и смоделированных значений максимальных расходов половодья по всей амплитуде их изменения.

Для южной части исследуемой территории – бассейна р. Вах, результаты моделирования показывают увеличение мощности деятельного слоя в конце XX – начале XXI в., в результате уменьшения глубины промерзания из-за потепления климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП RFMEFI61419X0002. X. Мацуяма поддержан грантом JST/SICORP номер JPMJSC1901 (Япония).

ЛИТЕРАТУРА

- Автоматизированная** информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 27.04.2019).
- Базы данных** Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИГМИ-МЦД). URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 27.04.2019).
- Бураков Д.А.** Гидрологический анализ весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. 1978. Вып. 10. С. 69–89.
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. С. 1004.
- Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В.** Гидрологические прогнозы. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. 436 с.
- Гидрология** заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / ред. С.М. Новиков. СПб. : ВВМ, 2009. 536 с.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В.** Моделирование формирования стока рек и снежного покрова на севере Западной Сибири // Водные ресурсы. 2015. Т. 42 (4). С. 387–395.
- Карнацевич И.В., Мезенцева О.В., Тусупбеков Ж.А., Бикбулатова Г.Г.** Возобновляемые ресурсы тепловлагообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик. Омск : Изд-во Омского аграрного ун-та, 2007. 268 с.
- Магрицкий Д.В., Поваляшишкова Е.С., Фролова Н.Л.** История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96.

Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Бельдман И.Н., Лебедева Л.С. Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64 (1). С. 101–118.

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 Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328 (1). С. 62–74.

Романов А.В. Развитие системы прогнозирования наводнений в Российской Федерации. Часть 2. Специфика изменений // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367). С. 39–63.

Руководство по гидрологической практике. Т. II: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. СПб.: Изд-во ВМО, 2012. № 168. 321 с.

Alfieri L., Bisselink B., Dottori F., Naumann G., de Roo A., Salamon P., Wyser K., Feyen L. Global projections of river flood risk in a warmer world // *Earth's Future*. 2017. V. 5. P. 171–182.

Bergström S., Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall–runoff model // *Nordic Hydrology*. 1973. V. 4 (3). P. 147–170.

Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Arheimer B., Blume T., Clark M.P., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hughes D.A., Hut R.W., Montanari A., Pande S., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe E., Cudennec C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58 (6). P. 1198–1255.

Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D.A., Wagener T., Ren L.L., Koutsoyiannis D., Cudennec C., Toth E., Grimaldi S., Blöschl G., Sivapalan M., Beven K., Gupta H., Hipsey M.R., Schaefl B., Arheimer B., Boegh E., Schymanski S.J., Di Baldassarre G., Yu B., Hubert P., Huang Y., Schumann A., Post D.A., Srinivasan V., Harman C.J., Thompson S., Rogger M., Viglione A., McMillan H., Characklis G.W., Pang Z., Belyaev V. “PantaRhei – Everything Flows”: Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022 // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58 (6). P. 1256–1275.

Nesterova N., Makarieva O., Post D. Methods of mathematical modelling for calculating flow characteristics of ungauged rivers in engineering design tasks (by the example of the Khemchik River, Tyva Republic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. 381 012068. 9 p.

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in western siberia // *Water*. 2020. V. 12 (6). P. 1817.

Seibert J. HBV light version 2. User's Manual. Stockholm University, 2005. 32 p.

Seibert J., Vis M. J.P. Teaching hydrological modeling with a user–friendly catchment–runoff–model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 3315–3325.

Sugawara M. et al. Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune // *Research note of the National Research Center for Disaster Prevention*. 1974. No 11. P. 1–64.

Thirel G., Andréassian V., Perrin C., Audouy J.-N., Berthet L., Edwards P., Foltin N., Furusho C., Kuentz A., Lerat J., Lindström G., Martin E., Mathevet T., Merz R., Parajka J., Ruelland D., Vaze J. Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments // *Hydrological Sciences Journal*. 2015. V. 60 (7–8). P. 1184–1199.

Wijayarathne D.B., Coulibaly P. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. No 27. P. 100646. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100646

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Biancamaria S., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Decharme B. Snow Cover and Spring Flood Flow in the Northern Part of Western Siberia (the Poluy, Nadym, Pur, and Taz Rivers) // *J. Hydrometeorol.* 2011. V. 12. P. 1498–1511.

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. The modern hydrological regime of the northern part of Western Siberia from in situ and satellite observations // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. V. 66 (4). P. 447–463.

Авторы:

Копысов Сергей Геннадьевич, кандидат географических наук, доцент, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: wosypok@mail.ru

Земцов Валерий Алексеевич, доктор географических наук, заведующий кафедрой, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: zemtsov_v@mail.ru

Мацуяма Хироши, профессор, департамент географии, столичный университет Токио, Токио, Япония.

E-mail: yamahoshi@mv.biglobe.ne.jp

Елисеев Артем Олегович, инженер, проблемная научно-исследовательская лаборатория гляциоклиматологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: kuzoller@gmail.com

Geosphere Research, 2020, 4, 108–120. DOI: 10.17223/25421379/17/9

S.G. Kopysov¹, V.A. Zemtsov¹, H. Matsuyama², A.O. Eliseev¹

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan

RIVER FLOW HYDROGRAPH SIMULATION IN THE WESTERN SIBERIA LOWLAND NORTH FOR THE EXTREME FLOOD FLOW PREDICTION BASED ON THE HBV-LIGHT MODEL

The purpose of this work is to study the possibility of predicting the flow hydrographs of the Arctic rivers (including maximum discharges of snowmelt and rain floods) and estimating the maximum water discharges of a given probability of exceedance on a basis of

the conceptual model HBV-light. The calculations were performed for the rivers Poluy, Nadym, Pur, Taz, etc. In total, the processes of runoff formation from nine basins were modeled. The area of the smallest river basin of the Pravaya Hetta River at Pangody is 1200, and the largest basin of the Taz River at the settlement of Sidorovsk is 100,000 km² in area.

Prediction of runoff hydrographs in the HBV-light model consists of the preparation of initial data and the selection of model parameters that allow calculating the daily runoff depth based on daily air temperature and precipitation at the nearest weather stations. In this work, the division of catchments into altitude and landscape zones was not carried out. A standard model structure was chosen without taking into account the specifics of land use in the basin. The parameters were obtained for a whole area of each model catchment, without its detailing.

Calibration of model parameters for rivers shows that the relatively simple conceptual model HBV-light reproduces well the intra-annual dynamics of runoff, including water discharge during the flood period. The accuracy of reproducing the hydrographs of the northern rivers runoff is not inferior to the accuracy of more complex deterministic models due to the lack of a sufficiently dense network of hydrometeorological observations and the need to determine the numerous parameters of more complex deterministic models.

Manual calibration of the model parameters makes it possible to meaningfully use the HBV-light model for regional modeling of the elements of the water cycle and flow hydrographs. In this case, six individual parameters for each basin and nine general regional parameters are determined, reflecting the similarity of landscape conditions throughout the study area. The individual parameters include: TT, FC, LP, K1, K2, MAXBAS. It is shown that the values of each of the other nine parameters of the model can be set the same for the entire study area, that is, they have a regional character, which makes it possible to calculate runoff hydrographs, including the maximum water discharge of ungauged and poorly studied rivers.

In general, the obtained model quality criteria for the period of calibration and validation of the models are quite high, and some models could, under certain conditions, be used to assess the change in river runoff induced by the climate change, as well as in the longer time period. Peak flood due to snowmelt is modeled better than peaks due to rainfall floods. Therefore, for basins with high model performance, a comparison of empirical probability distribution functions shows a good agreement between the observed and modeled values of the maximum flood flow rates over the entire amplitude of their fluctuations.

Keywords: *Western Siberia, Arctic rivers, flow hydrograph simulation, maximum water discharge, the HBV-light model*

This study was supported by the Russian Federal Target Program Grant RFMEFI61419X0002. H. Matsuyama was supported by the JST/SICORP Grant Number JPMJSC1901 (Japan).

References

- Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'yektov* [Automated information system for state monitoring of water bodies]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> Date accessed: 27.04.2019. In Russian
- Burakov D.A. *Gidrologicheskiy analiz vesennego polovoda v lesnoy zone Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Hydrological analysis of spring floods in the forest zone of the West Siberian Plain] // *Voprosy geografii Sibiri*. 1978. No 10. pp. 69–89. In Russian
- Databases of Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC) <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> Date accessed: 27.04.2019. In Russian
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1004 p. In Russian
- Georgiyevskiy Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskiye prognozy*. [Hydrological forecasts] St. Petersburg.: Izd. RGGMU, 2007. 436 p. In Russian
- Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia] / Ed. CM. Novikov. 2009. St. Petersburg: VVM. 536 p. In Russian
- Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Y., Ayzel G.V. Simulating the formation of river runoff and snow cover in the northern West Siberia // *Water Resources*. 2015. V. 42. pp. 460–467.
- Karnatsevich I.V., Mezentseva O.V., Tusupbekov G.A., Bikbula-tova G.G. *Vozobnovlyayemye resursy teplovлагообеспеченности Zapadno-Sibirskoy ravniny i dinamika ikh kharakteristik* [Study of dynamics and mapping of elements of energy and water balance and characteristics of energy and water availability]. Omsk, Omsk State Agricultural University Press, 2007. 268 p. In Russian
- Magritskii D.V., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. *Istoriya izucheniya stoka vody i vodnogo rezhima rek Arkticheskoy zony Rossii v XX v. i nachale XXI v.* [History of the study of water flow and water regime of rivers of the Arctic zone of Russia in the XX century and the beginning of the XXI century] // *Arktika i Antarktika*. 2019. No 3. pp. 61–96. In Russian
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Beldiman I.N., Lebedeva L.S. *Aktual'nyye problemy gidrologicheskikh raschetov v arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii i sopredel'nykh territoriyakh rasprostraneniya mnogoletney merzloty* [Actual Problems of Hydrological Assessments in the Arctic Zone of Russian Federation and Adjacent Permafrost Territories] // *Problemy Arktiki i Antarkтики*. 2018. V. 64 (1). pp. 101–118. In Russian
- Romanov A.V. *Razvitiye sistemy prognozirovaniya navodneniy v Rossiyskoy Federatsii. Chast' 2. Spetsifika izmeneniy* [Development of a flood forecasting system in the Russian Federation. Part 2. Specificity of changes] // *Hydrometeorological studies and forecasts (Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy)*. 2018. No 1 (367). pp. 39–63. In Russian
- Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. Tom II. Upravleniye vodnymi resursami i praktika primeneniya gidrologicheskikh metodov*. [Guide to Hydrological Practices. V. II. Management of Water Resources and Applications of Hydrological Practices WMO]. No 168. 2009. 302 p. In Russian
- Alfieri L., Bisselink B., Dottori F., Naumann G., de Roo A., Salamon P., Wyser K., Feyen L. Global projections of river flood risk in a warmer world // *Earth's Future*. 2017. V.5. pp. 171–182.
- Bergström S., Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall–runoff model // *Nordic Hydrology*. 1973. V. 4 (3). pp. 147–170.
- Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Arheimer B., Blume T., Clark M.P., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hughes D.A., Hut R.W., Montanari A., Pande S., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe E., Cudennec C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58(6). pp. 1198–1255.

Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D.A., Wagener T., Ren L.L., Koutsoyiannis D., Cudennec C., Toth E., Grimaldi S., Blöschl G., Sivapalan M., Beven K., Gupta H., Hipsey M.R., Schaeff B., Arheimer B., Boegh E., Schymanski S.J., Di Baldassarre G., Yu B., Hubert P., Huang Y., Schumann A., Post D.A., Srinivasan V., Harman C.J., Thompson S., Rogger M., Viglione A., McMillan H., Characklis G.W., Pang Z., Belyaev V. "PantaRhei – Everything Flows": Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022 // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58(6). pp. 1256–1275.

Nesterova N., Makarieva O., Post D. Methods of mathematical modelling for calculating flow characteristics of ungauged rivers in engineering design tasks (by the example of the Khemchik River, Tyva Republic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. 381 012068. 9 p.

Paromov V.V., Zemtsov V.A., Kopysov S.G. Climate of West Siberia during the slowing phase of warming (1986–2015) and prediction of hydroclimatic resources for 2021–2030 // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. V. 328 (1). pp. 62–74. In Russian

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in western Siberia // *Water*. 2020. V. 12(6). pp. 1817.

Seibert J. HBV light version 2. User's Manual. Stockholm University, 2005. 17 p.

Seibert J., Vis M. J. P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2012. V. 16. pp. 3315–3325.

Sugawara M., et al., Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research note of the National Research Center for Disaster Prevention. 1974. No 11. pp. 1–64.

Thirel G., Andréassian V., Perrin C., Audouy J.-N., Berthet L., Edwards P., Folton N., Furusho C., Kuentz A., Lerat J., Lindström G., Martin E., Mathevet T., Merz R., Parajka J., Ruelland D., Vaze J. Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments // *Hydrological Sciences Journal*. 2015. V. 60(7–8). pp. 1184–1199.

Wijayarathne D.B., Coulibaly P. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. V. 27. 100646. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100646>

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Biancamaria S., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Decharme B. Snow Cover and Spring Flood Flow in the Northern Part of Western Siberia (the Poluy, Nadym, Pur, and Taz Rivers) // *J. Hydrometeor.* 2011. V. 12, pp. 1498–1511.

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. The modern hydrological regime of the northern part of Western Siberia from in situ and satellite observations // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. V. 66(4). pp. 447–463.

Author's:

Kopysov Sergey G., Cand. Sci (Geography), Associate Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: wosypok@mail.ru

Zemtsov Valerii A., Dr. Sci. (Geography), Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: zemtsov_v@mail.ru

Matsuyama Hiroshi, Professor, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan.

E-mail: yamahoshi@mvg.biglobe.ne.jp

Eliseev Artem O., Engineer, Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: kuzoller@gmail.com

УДК 556.1

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА БАСЕЙНА РЕКИ СЕДЭЯХИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Т.А. Локтионова¹, А.А. Ерофеев¹, С.Г. Копысов^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН



В работе построены карты и описана методика расчета среднееголетних значений элементов водного баланса для бассейна реки Седяхи (Ямало-Ненецкий автономный округ) с использованием модели гидролого-климатических расчетов. Выявлено, что вклад теплоэнергетических ресурсов испарения в функционирование лесотундровых геосистем, в силу эффекта «запирающего» воздействия многолетней мерзлоты, весьма значителен. Рост испаряемости на 19 % приводит к уменьшению стока почти в 2 раза. Результаты моделирования верифицированы на малом лесотундровом водосборе.

Ключевые слова: ландшафт, сток, климат, многолетняя мерзлота, рельеф.

Введение

Процессы и условия функционирования ландшафтов севера Западной Сибири весьма разнообразны и тесно взаимосвязаны. Например, при обсуждении прогнозов изменения климата Арктики отмечено, что «среднегодовые значения разности осадков и испарения ($P - E$) над водосборами суши, окружающей северный ледовитый океан, и, соответственно, речного стока в него, возрастают во всех сценариях» [Павлова, Катцов, 2015, с. 29]. При этом система гидрометрических и метеорологических наблюдений для данной территории представлена крайне редко [Действующие метеорологические станции, 2020]. Кроме того, имеющиеся пункты наблюдений зачастую находятся в близости от городов и в долинах крупных рек, являющимися зонами и коридорами тепляющего воздействия. Это одна из причин, которая увеличивает фактор неопределенности при моделировании распределения элементов гидрологического цикла (испарения, испаряемости, водного стока и др.) для глобальных моделей.

Современное состояние проблемы и постановка задач исследования. Элементы гидрологического цикла, как правило, определяются на основе баз гидрометеорологических данных. Часть этих показателей контролируется непосредственными измерениями на специально отобранных ключевых участках и малых водосборах, а также по данным сети наблюдений на малых и средних реках. При недостатке информации в гидрологическом моделировании принято использовать либо модели со сосредоточенными параметрами, либо распределенные модели, но со значительным осреднением входящих в них показателей [Bui et al., 2020]. В работе [Калинин и др., 2018] были использованы данные Landsat для

определения альбедо земной поверхности, а в [Коновалов, Рудаков, 2015] – горных ледников. Моделирование гидрологического функционирования с использованием метода гидролого-климатических расчетов (ГКР) и геоморфометрического анализа цифровых моделей высот для территории центральной части Западной Сибири выполнено в [Kopysov et al., 2015]. В работе [Ерофеев и др., 2018] связь орфографических условий и увлажнения в методе ГКР продемонстрирована на малом модельном водосборе.

Цели и задачи исследования. В условиях взаимосвязи протекания процессов гидрологического цикла на уровне деятельной поверхности наиболее целесообразно оценивать динамику каждого условия не по отдельности, а с помощью интегрального (балансового) подхода. Метод ГКР [Мезенцев В.С., 1982] соответствует предъявляемым критериям, поскольку является генетическим по отношению к основным элементам водного баланса, а в сочетании с различной априорной (дистанционной) информацией позволяет выявить количественные взаимосвязи в структуре и функционировании ландшафтов бассейнов средних и крупных рек. В ряде последних статей, посвященных обзору систем моделирования, применимых для мерзлотных водосборов Арктического региона [Fabre et al., 2017; Bui et al., 2020] модель ГКР, на наш взгляд, незаслуженно оставлена без внимания. Одной из возможных причин, по нашему мнению, является отсутствие полноценных методических работ использования этой модели в условиях водосборов севера Западной Сибири. Данная работа призвана восполнить имеющийся недостаток.

С использованием метода ГКР и геоморфометрического анализа цифровой модели высот ArcticDEM в работе планируется рассчитать GRID-матрицы и

построить карты со среднемноголетними значениями элементов водного баланса для бассейна реки Седэяхи, расположенной в лесотудровой зоне севера Западной Сибири. Результаты моделирования планируется верифицировать при помощи автоматических датчиков измерения гидрофизических параметров на малом модельном водосборе.

Объект исследования

Река Седэяха – левый приток реки Евояха (водосборный бассейн Пура), расположена на юге Ямало-Ненецкого автономного округа. Протяженность русла

реки – 145 км, площадь ее водосборного бассейна – 1 310 км² (рис. 1). Отличительной особенностью ландшафтов бассейна является широкое развитие болот и озер, занимающих около 70 % территории [Атлас..., 2004]. Территория бассейна преимущественно представлена лесотундровым типом местности. В поймах малых рек, из-за активного дренирования, встречается угнетенный лиственный лес. На террасах и междуречье в понижениях формируется широко распространенный хасырейный тип ландшафтов. В его структуре доминируют болотные и луговые урочища. Сохраняются акватории не заросших озер [Бобрик и др., 2017].

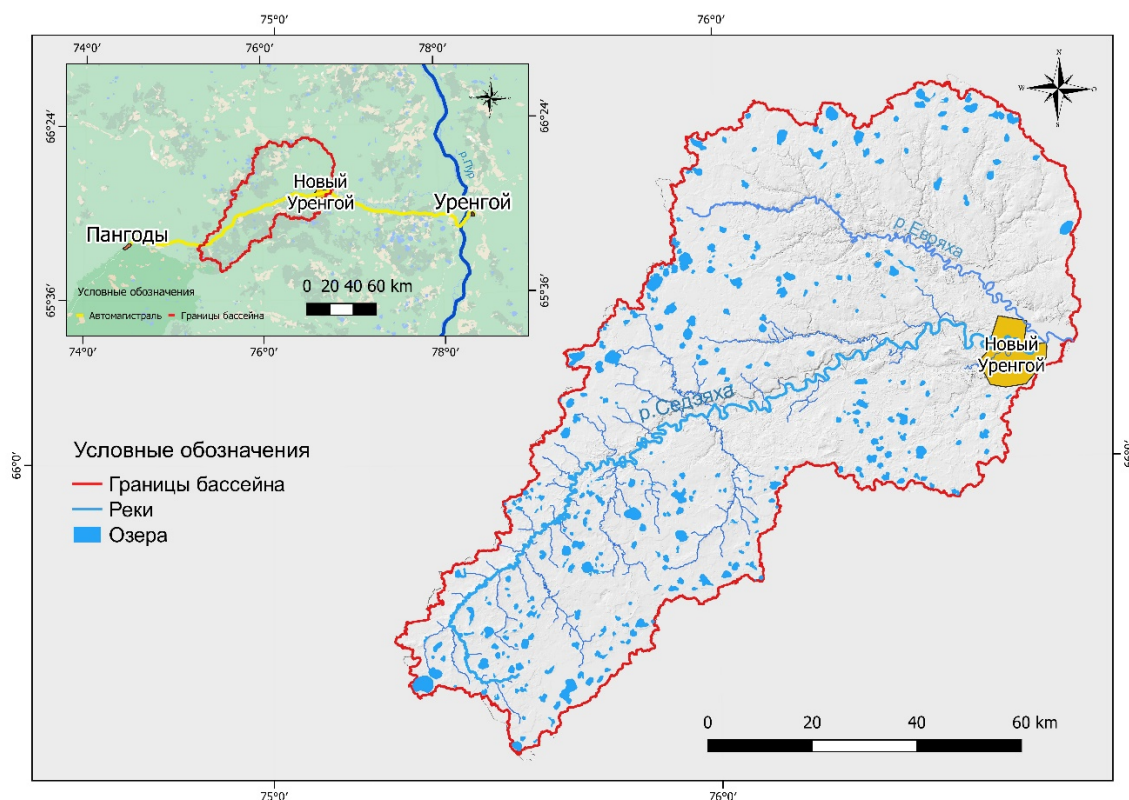


Рис. 1. Географическое расположение бассейна реки Седэяхи

Fig. 1. Spatial location of the River Sedeyaha catchment basin

Поверхность территории представляет собой низкую аккумулятивную равнину с довольно однообразным рельефом, главными элементами которого являются широкие плоские междуречья и речные долины [Кашменская, Земцов, 1988]; характерны различные формы проявления многолетней мерзлоты, повышенная заболоченность.

В области распространения морских аккумулятивных и моренных равнин общая равнинность территории нарушается моренными пологоувалистыми и холмисто-увалистыми возвышенностями. Важнейшей физико-географической особенностью

является наличие многолетнемерзлых горных пород. Заболачивание является одним из наиболее активных рельефообразующих процессов ввиду преобладания плоских равнинных поверхностей, сурового климата, низкой испаряемости при значительном количестве осадков, широкого распространения супесчано-суглинистых пород [Голубятников и др., 2015]. Вследствие выравнивания рельефа на междуречье, водоразделы между отдельными притоками и озерами идентифицировать визуально и даже картометрическим способом достаточно трудно.

Моделирование гидрологического цикла: параметры и модели

Гидролого-климатические расчеты. Методология моделирования основана на использовании метода ГКР. Данный метод представляет собой математическую модель процессов преобразования влаги на уровне деятельной поверхности водосборов [Гушля, Мезенцев, 1982]:

$$Y = H - Z = H - Z_M * \left[1 + \left(\frac{H}{Z_M} \right)^{-n} \right]^{-1/n}, \quad (1)$$

где Z – испарение с поверхности (мм); Z_M – водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов испарения (мм); n – параметр ландшафтных условий стока; H – суммарное увлажнение (мм).

По мнению некоторых исследователей [Карнацевич, Хрущев, 2014], модель ГКР имеет небольшое число параметров, позволяет при редкой сети метеонаблюдений привлекать данные модельных реанализов по температурам воздуха и атмосферным осадкам в узлах координатной сетки и выполнять расчет текущих водно-тепловых балансов с заданным интервалом дискретности. В теплый период при моделировании гидрографа стока и других показателей водного баланса можно выполнять расчеты с суточным шагом. Этими же авторами [Карнацевич, Хрущев, 2014] отмечена хорошая сходимость результатов расчета с натурными данными.

Параметры модели ГКР допускают большую детализацию по территории и временную изменчивость в зависимости от реальных или задаваемых в виде сценариев изменений климата в разных природных зонах и ландшафтах. Таким образом, модель ГКР фактически представляет собой модель с распределенными в пространстве и по времени параметрами. Уравнения теплового и водного баланса в этой модели связаны через величину испарения с поверхности водосбора.

Геоинформационное моделирование. Основные этапы геоинформационного моделирования были проведены в ГИС-пакете с открытым исходным кодом SAGA. Для учета пространственных неоднородностей формирования стока, для территории всего водосборного бассейна был выполнен геоморфометрический анализ, а для учета пространственной дифференциации теплоэнергетических ресурсов испарения – использованы данные о спектральном альбедо (спектральный канал Spatial Reflectance, имеющийся в космических снимках Landsat 7 и Landsat 8), совмещенные с данными климатического реанализа. Расчеты выполнены для июля 2010 и 2015 гг., в которых наблюдались контрастные условия температуры и выпадения осадков [Специализированные массивы..., 2020]. Основные характеристики снимков приведены в табл. 1.

Пространственные границы бассейна реки Седэяхи определялись путем автоматической клас-

сификации цифровых моделей рельефа ArcticDEM с пространственным разрешением 2 м в модуле Catchment Boundary ГИС-пакета SAGA [Satellite Image Analysis..., 2020]. Базовая картографическая информация в виде векторных ГИС-слоев гидросети, объектов инженерной инфраструктуры (дорог, населенных пунктов и др.) создавалась путем оцифровки космических снимков Sentinel 2a.

Помимо векторных данных при моделировании элементов гидрологического цикла, большое внимание было уделено растровым изображениям, содержащим разнообразную информацию о климате, характере рельефа, структуре землепользования и др. Содержание коллекции растровых слоев приведено в табл. 2.

Данные с высоким пространственным разрешением ArcticDEM использовались для моделирования степени гидроморфности ландшафта. ArcticDEM представляет собой цифровую модель высот (ЦМВ), создаваемых на основе космических снимков с высоким пространственным разрешением (приблизительно 0,5 м), получаемых с помощью группировки спутников DigitalGlobe [ArcticDEM, 2020]. Для бассейна реки Седэяхи были рассчитаны ЦМВ с шагом сетки 2, 10 и 30 м.

Гидролого-климатический мониторинг. Для организации постоянного мониторинга за параметрами гидрологического цикла водосборов севера Западной Сибири, был выбран верхний левый приток реки Седэяхи (ручей) с площадью водосбора 24 км² (65°49'42" с.ш., 75°24'01" в.д.).

На исследуемом ручье было проведено устройство водомерного поста с учетом следующих требований:

- участок устройства водомерного поста на протяжении трехкратной ширины является прямолинейным, открытым, доступным для измерений;
- русло устойчивое (не размывается и не заиляется);
- пост располагается на расстоянии не меньше пятикратной ширины от устья ближайших притоков и вне сферы влияния подпоры от затопов льда и гидротехнических сооружений;
- течение воды параллельно-струйное, без завоедей, косых и обратных течений и порогов;
- дно ручья не имеет значительных выступов, мешающих измерению глубин и скоростей течения.

Водомерный пост был оборудован системой автоматического мониторинга «САМУВ» (производитель ИМКЭС СО РАН, г. Томск) с двумя датчиками уровня воды. Диапазон измеряемых температур прибора колеблется от 0 до 50 °С и с погрешностью ±0,2 °С. Диапазон измеряемых уровней до 5 м и погрешностью не более 1 %.

В ходе экспедиционных исследований 22 августа 2014 г. была проведена тахеометрическая съемка, на основании которой построен поперечный профиль

русла и долины ручья. Также были проведены измерения скоростей течения ручья, по результатам которых получен расход воды. На основании полученного расхода воды по гидравлическим формулам определен коэффициент шероховатости русла.

На основании измеряемых в автоматическом режиме данных о колебаниях уровней воды и гидравлическим формулам для равномерного движения в естественных руслах были рассчитаны расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) исследуемого ручья за период с 23.08.2014 по 03.10.2014 г.

Для информационного обеспечения моделирования многолетней динамики элементов гидрологического цикла ландшафтов репрезентативных водосборов рек

равнинной и высокогорной Арктики на основе информации с установленных на малом модельном водосборе гидрофизических датчиков, была сформирована база данных «Пространственно-временная динамика элементов гидрологического цикла репрезентативных водосборов рек равнинной и высокогорной Арктики» [Ерофеев и др., 2020]. Гидрофизический мониторинг выполнялся нами на следующих участках:

- 1) русло реки ($65^{\circ}51'05,31''$ с.ш., $75^{\circ}23'05,37''$ в.д.);
- 2) ручей-проталина и лиственничный лес ($65^{\circ}51'06,97''$ с.ш., $75^{\circ}22'38,72''$ в.д.);
- 3) бугристый торфяник на междуречье ($65^{\circ}51'20,78''$ с.ш., $75^{\circ}20'59,64''$ в.д.).

Содержание базы данных представлено в табл. 3.

Таблица 1

Основные характеристики снимков космических снимков

Table 1

The main characteristics of satellite imagery

Тип данных	Дата	Время	Пространственное разрешение, м	Источник данных
Landsat 7	01.07.2010	11:14	30	https://earthexplorer.usgs.gov
Landsat 8	20.07.2015	11:28	30	https://earthexplorer.usgs.gov

Таблица 2

Коллекция растровых слоев для моделирования

Table 2

Collection of raster layers for modelling

Вид данных	Период получения данных	Пространственное разрешение	Источник данных
Цифровая модель высот	—	2 м	ArcticDEM (www.pgc.umn.edu/data/arcticdem)
Атмосферные осадки	1970–2016	1 км	WorldClim (https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html)
Солнечная радиация	1970–2016	1 км	WorldClim (https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html)
Средняя температура	1970–2016	1 км	WorldClim (https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html)
Sentinell 2a	2019	10 м	Earth Explorer USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/)

Таблица 3

Структура и содержание табличной информации в базе данных для бассейна реки Седэяхи

Table 3

Structure and content of tabular information in the database for the Sedeyaha river basin

№	Расположение	Показатель	Измерительное оборудование	Даты работы
1	Русло реки	Температура воды, °С Уровень воды, см Среднесуточный слой стока, мм/сут	САМУВ-150. Причина прекращения измерений – падение напряжения батареи	22.07.2014 – 01.04.2019
2	Ручей-проталина и лиственничный лес	Температура воды, °С Температура воздуха на высоте 2 м, °С Электропроводность воды, сим Уровень воды, мм Влажность воздуха, % Температура почвы по глубине, °С	САМУВ-153. Причина прекращения измерений – заглохло датчик	23.08.2014 – 15.05.2015
3	Бугристый торфяник на междуречье	Электропроводность воды, сим	САМУВ-152. Причина прекращения измерений – поврежден животными	23.08.2014 – 05.09.2015
		Температура почвы на поверхности, °С		23.08.2014 – 20.08.2015

Методика геоинформационного моделирования включала в себя два этапа (рис. 2) и ряд последовательных операций:

- загрузку ЦМБ ArcticDEM;
- сшивку и геометрическую коррекцию (пространственную привязку) ЦМБ;
- гидрологическую коррекцию ЦМБ (заполнение пустот и псевдопонижений для моделирования поверхностного стока);
- расчет направлений стока в потенциальной гидрографической сети и определение площади для каждого звена водостока;
- расчет границ водосборного бассейна реки Седэяхи;
- расчет морфометрических параметров для гидролого-климатических расчетов.

Одним из важнейших параметров методики является параметр направлений стока (Flow Direction) и идентификации структуры водосборов (Watershed Delineation), служащий основой для определения площади каждого звена водостока и последующего создания площади водосборного бассейна. Среди других морфометрических параметров также был рассчитан индекс потенциальной влажности (Topographic Wetness Index) [Beven, Kirkby, 1979; Ерофеев, 2012]. Он использовался для анализа степени гидроморфности ландшафтов, а также для расчета параметра ландшафтных условий формирования стока n (рис. 5).

Гидролого-климатические расчеты включали в себя моделирование среднесезонных показателей испарения, испаряемости и водного стока. Расчет теплоэнергетических ресурсов испарения (Z_m) был связан с расчетом спектрального альбедо (A), измеряемого сенсором Landsat 7 и 8 и преобразуемого в значения поглощенной солнечной радиации посредством формулы (3).

При расчете альбедо применялся модуль Top of Atmosphere Reflectance ГИС-пакета SAGA, выполняющий калибровку. Для этого необходимо было указать используемые для калибровки каналы (Bands), а также файл калибровки MTL – MetadataFile. Важной особенностью данного модуля является наличие функции атмосферной коррекции (Atmospheric Correction).

По своей физической природе альбедо, получаемое на основе мультиспектральных оптических спутниковых снимков, является узкополосным, с необходимостью его преобразования в широкополосное (единое значение альбедо снега для всех спектральных интервалов) и коротковолновое (длины волн от 0,38 до 2,5 мкм). Поэтому было произведено соответствующее преобразование, которое позволяет выполнять расчеты энергетического баланса, а в нашем случае – элементов гидрологического цикла. Для этого использовалась формула (2), предложенная S. Liang [2000].

$$0,356 \times b_2 + 0,130 \times b_4 + 0,373 \times b_5 + 0,085 \times b_6 + 0,072 \times b_7 - 0,018, \quad (2)$$

где $b(n)$ – спектральная полоса космического снимка Landsat 8.

Основные характеристики космических снимков сенсоров Landsat 7 и 8, используемых для расчета спектрального альбедо бассейна реки Седэяхи, приведены в табл. 4. Результаты расчетов данных показателей для космических снимков, полученных 1 июля 2010 и 20 июля 2015 г. показаны на рис. 3.

После расчета спектрального альбедо были рассчитаны теплоэнергетические ресурсы испарения (Z_m). Для этого на первом этапе была получена поглощенная солнечная радиация (часть суммарной солнечной радиации, поглощаемая подстилающей поверхностью). Блок метеорологических показателей (параметры солнечной радиации, количество атмосферных осадков и др.) получен через интернет-сервис с данными климатического реанализа WorldClim версии 2.0 [Fick, Hijmans, 2017], представленных в виде растров осредненных среднемесячных значений. В расчетах применялись именно эти данные по причине того, что данные с WorldClim покрывают всю поверхность суши (за исключением Антарктиды) и доступны для получения в разных форматах и с различным пространственным разрешением вплоть до 30 угловых секунд (примерно 1 км²). Поглощенная солнечная радиация (R_k) за расчетный месяц была определена по формуле:

$$R_k = (1 - A), \quad (3)$$

где A – спектральное альбедо земной поверхности в долях от единицы.

После определения поглощенной солнечной радиации, для расчета теплоэнергетических ресурсов (Z_m) по поглощенной радиации использовалось эмпирическое выражение (4), общие результаты отображены на графике (рис. 4):

$$Z_m = 2/3 * R_k, \quad (4)$$

где R_k – поглощенная радиация.

В методе ГКР орографические условия формирования стока учитываются с помощью параметра ландшафтных условий n (рис. 5), который отражает способность деятельного слоя сбрасывать избыточную влагу под действием сил гравитации [Копысов, 2014; Ерофеев и др., 2018]. Параметр n является информативной интегральной гидрографической характеристикой речных водосборов и бессточных территорий. Расчет параметра производится на основе ранее рассчитанного индекса потенциальной влажности [Pourali et al., 2016].

Климатический (местный) сток был рассчитан по модели ГКР (1) на основе полученных ранее значений испарения с поверхности, теплоэнергетических ресурсов испарения, суммарного увлажнения и параметра ландшафтных условий стока, используя данные климатического реанализа (WorldClim) и

ЦМБ ArcticDEM (рис. 6). В отличие от реального (русового) стока, интегрирующего местный сток в виде русловой сети, под местным стоком понимается величина среднего многолетнего стока, определяемая как разность средних многолетних величин осадков и испарения на конкретной территории. В условиях избыточного увлажнения величина испарения стремится к водному эквиваленту тепло-

энергетических ресурсов испарения. Исходные данные по ежедневным осадкам и температурам воздуха с октября 1966 по 2018 г., среднее по метеостанции Надым и Тарко-Сале взяты из базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных ВНИГМИ-МЦД [Bulygina et al., 2020].

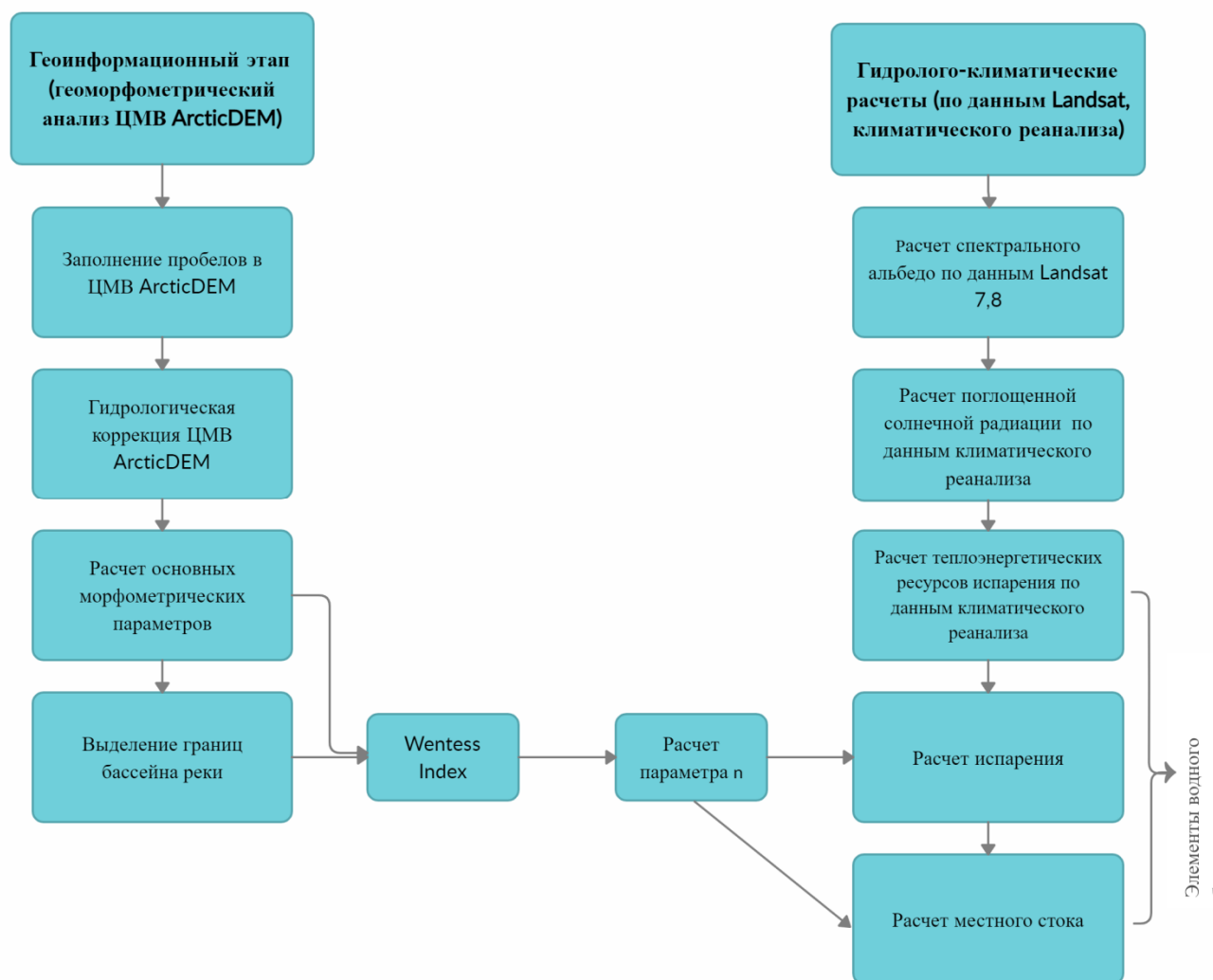


Рис. 2. Блок-схема этапов моделирования основных элементов водного баланса водосборного бассейна

Fig. 2. Diagram of stages of the basic elements of the water budget modelling

Таблица 4

Сравнение основных характеристик космических снимков Landsat, используемых для расчета спектрального альbedo

Table 4

Comparison of the main characteristics of the Landsat satellite images are used to calculate the spectral albedo

Сенсор	Дата	Время (местное)	Яркость			Спектральное альbedo		
			мин	сред	макс	мин	сред	макс
Landsat 7	01.07.2010	11:14	0,09	0,08	0,07	0,06	0,08	0,21
Landsat 8	20.07.2015	11:28	0,32	0,28	0,26	0,25	0,27	0,59

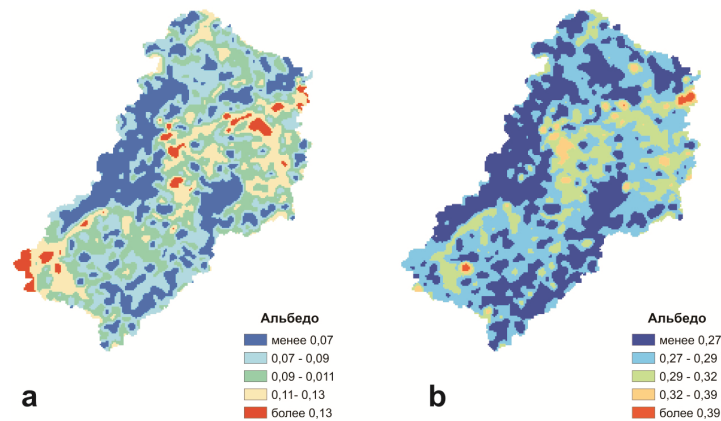


Рис. 3. Альbedo земной поверхности, рассчитанное на основе данных Landsat 8

a – для космического снимка, полученного 1.07.2010 г.; *b* – для космического снимка, полученного 20.07.2015 г.

Fig. 3. Albedo of the Earth surfaces is calculated with Landsat 8

a – for the satellite image with data acquisition 1st of July 2010; *b* – with data acquisition 20 of July 2015

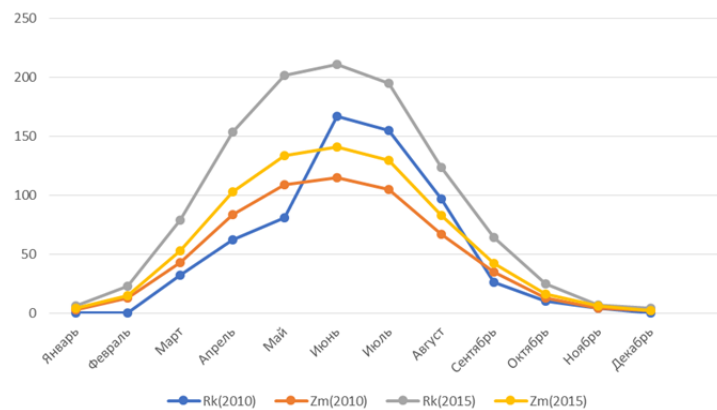


Рис. 4. График расчета теплоэнергетических ресурсов (мм) и поглощенной радиации (вт/м²) за 2010 и 2015 гг.

Fig. 4. Calculation of heat and power resources (mm) and absorbed radiation (w/m²) for 2010 and 2015

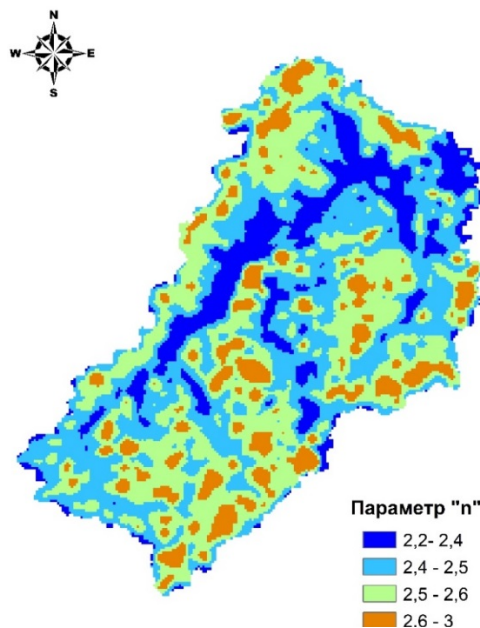


Рис. 5. Распределение параметра ландшафтных условий формирования стока *n* в бассейне реки Седяхи

Fig. 5. Distribution of the parameter of landscape conditions of runoff formation *n* into the River Sedeyaha catchment basin

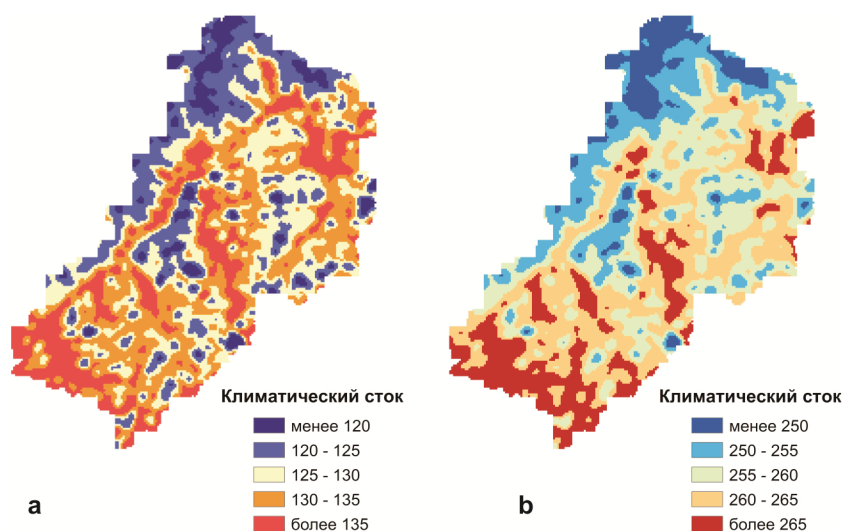


Рис. 6. Распределение климатического стока в бассейне реки Седяхи за 2010 (а) и 2015 (б)

Fig. 6. Distribution of the climatic runoff on the River Sedeyaha catchment basin for 2010 (a) and 2015 (b)

Обсуждение результатов

В условиях слабой гидрологической изученности, свойственной удаленным территориям севера Западной Сибири, важное значение приобретают новые методы учета пространственно-временной динамики элементов гидрологического цикла. Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет получать все более разнообразную информацию о структуре, динамике и функционировании геосистем. Для их полноценного использования требуется разработка современных методик, рассматривающих процессы гидрологического цикла на

уровне деятельной поверхности интегрально, а не по отдельности.

За рассмотренный нами период (с 1967 по 2016 г.) самым холодным и сухим на данной территории является 1969 г., в то время как аномально жарким и сухим – 2016 г. (рис. 7), в котором были отмечены вспышки сибирской язвы и многочисленные пожары в тундре. Средняя величина теплоэнергетических ресурсов испарения (испаряемости Z_m) за полвека выросла на 22 %. Также на рис. 7 видно, что за расчетный период среднегодовые значения осадков увеличились на 130 мм (22 %), местный климатический сток – на 65 мм (24 %).

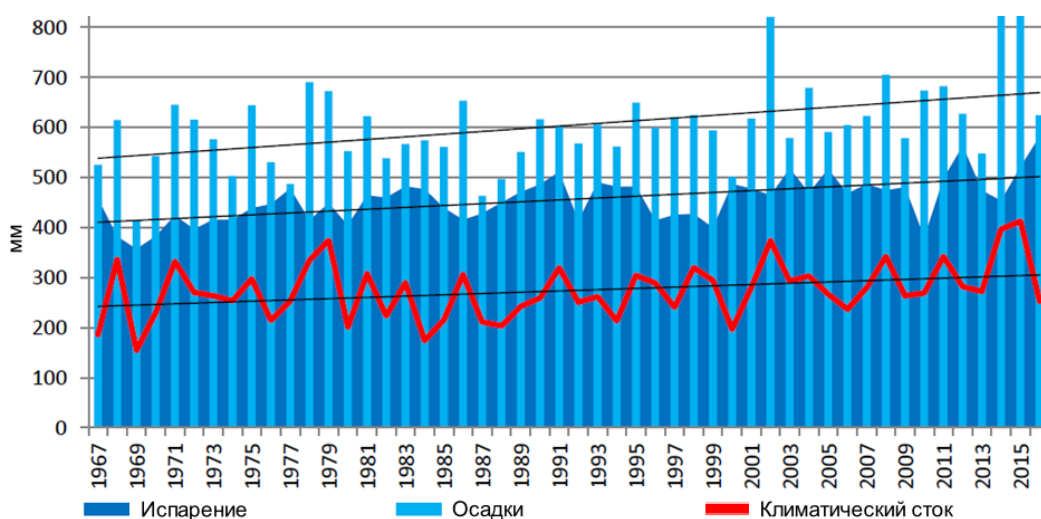


Рис. 7. Многолетний ход водного эквивалента теплоэнергетических ресурсов испарения, осадков и климатического стока

Fig. 7. Long-term variation of the potential evaporation, precipitation and climatic runoff

Внутригодовое распределение испаряемости на территории бассейна отличается неравномерностью. Так, 81 % всех затрат приходится на летние месяцы: 37 % на июль, 23 и 21 % на июнь и август соответственно. На май и сентябрь приходится только 7 и 9 %.

При расчете спектрального альбедо по данным спектральных каналов Landsat 7 и 8 для 1 июля 2010 г. и 20 июля 2015 г. наблюдаются существенные различия в распределении показателей (см. рис. 3). В первую очередь это может быть связано с изменением яркости пикселей изображения, появление которых вызвано погодными условиями и условиями освещения в момент съемки. В связи с этим при сравнительном анализе спектрального альбедо по разновременным снимкам можно рекомендовать пользоваться лишь относительными величинами.

Дальнейшее развитие описанной в работе методики может быть связано с использованием данных климатического реанализа с более точным временным и пространственным разрешением. Другим перспективным направлением является разработка блока трансформации климатического стока в гидрометрический сток, а также разделение суммарного стока на генетические (или структурные) составляющие в модели ГКР.

Заключение

С использованием метода ГКР и геоморфометрического анализа цифровой модели высот ArcticDEM

в работе рассчитаны GRID-матрицы и построены карты со среднемноголетними значениями элементов водного баланса для бассейна реки Седзяхи, расположенной в лесотундровой зоне севера Западной Сибири.

Выявлено, что вклад теплоэнергетических ресурсов испарения в функционирование лесотундровых геосистем весьма значителен в силу эффекта «запирающего» воздействия многолетней мерзлоты на водообмен в деятельном слое с грунтовыми водами. Основываясь на полученных результатах, было показано, что рост испаряемости на 19 % приводит к уменьшению стока почти в 2 раза. Результаты моделирования верифицированы на малом лесотундровом водосборе, расположенном в верховьях бассейна реки Седзяхи с использованием автоматических измерительных устройств.

Основываясь на проведенных расчетах, в данной работе была продемонстрирована возможность моделирования гидрологического цикла бассейна реки Седзяхи. Как оказалось, роль теплоэнергетических ресурсов испарения в функционировании лесотундровых геосистем с избыточной увлажненностью является определяющей. Такое действие обусловлено наличием многолетнемерзлых пород, блокирующих водообмен в деятельном слое с грунтовыми водами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки, проект № 0721-2020-0041.

ЛИТЕРАТУРА

- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск : Омская картографическая фабрика, 2004. 304 с.
- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е. Вклад абиотических факторов в пространственное варьирование эмиссии CO₂ почв лесотундровой зоны Западной Сибири (Новый Уренгой) // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 2. С. 52–59.
- Голубятников Л.Л., Заров Е.А., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Гаврилов Г.О. Анализ ландшафтной структуры ландшафтов тундровой зоны Западной Сибири на основе спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2015. № 3. С. 4–14.
- Гушля А.В., Мезенцев В.С. Водно-балансовые исследования. Киев : Вища школа, 1982. 229 с.
- Действующие метеорологические станции сети Росгидромета. URL: http://www.aari.aq/default_ru.html (дата обращения: 02.11.2020).
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н. Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 39–47.
- Ерофеев А.А. Ландшафтно-экологический анализ бассейнов малых рек на основе геоинформационного моделирования (на примере малых рек Томска и его окрестностей) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2012. 16 с.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Локтионова Т.А. Пространственно-временная динамика элементов гидрологического цикла репрезентативных водосборов рек равнинной и высокогорной Арктики // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622173 от 06.11.2020.
- Калинин Н.А., Шкляев В.А., Исаков С.В. Применение данных спутников Landsat для определения динамики изменения структуры землепользования и дифференциального альбедо территории // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 530–536.
- Карнацевич И.В., Хрущев С.А. Компьютерная система массовых расчетов текущих водных балансов речных водосборов неизученных областей суши. Омск, 2014. 176 с.
- Кашменская О.В., Земцов А.А. Рельеф Западно-Сибирской равнины. Новосибирск : Наука, 1988.
- Копысов С.Г. Параметрический учет ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчетов // ГИПР. 2014. № 3. С. 157–161.
- Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга ледников и гляциологических расчетов // Лед и Снег. 2015. № 1 (129). С. 15–27.
- Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. 80 с.

Павлова Т.В., Катцов В.М. Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке. Результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей. CMIP5 // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2015. Вып. 579. С. 29.

Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 10.11.2020).

ArcticDEM. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem> (дата обращения: 09.03.2020).

Bui M.T., Lu J., Nie L. A Review of Hydrological Models Applied in the Permafrost-Dominated Arctic Region // *Geosciences*. 2020. № 10. P. 401.

Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // *Hydrological Science Bulletin*. 1979. № 24. P. 43–69.

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Description of daily air temperature and precipitation data set from Russian meteorological stations and from some meteorological stations over the former USSR territory (TTTR). URL: <http://meteo.ru/english/climate/descrip11.htm> (дата обращения: 17.03.2020).

Earth Explorer: United States Geological Survey (USGS). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. V. 37. P. 4302–4315.

Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Srinivasan R., Teisserenc R., Sánchez Pérez J.M. Using Modeling Tools to Better Understand Permafrost Hydrology // *Water*. 2017. No 9. P. 418.

Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemcov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // *International Journal of Environmental Studies*. 2015. Vol. 72. No 3. P. 380–385.

Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms // *Remote Sens. Environ.* 2000. № 76. P. 213–238.

Pourali S.H., Arrowsmith C., Chrisman N. et al. Topography Wetness Index Application in Flood Risk-Based Land Use Planning // *Appl. Spatial Analysis*. 2016. No 9:39. P. 39–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2> (дата обращения: 10.11.2020).

Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Version 2. SAGA GIS 4+. 2020. URL: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june_2017.pdf (дата обращения 10.11.2020).

Авторы:

Локтионова Тамара Андреевна, инженер, проблемная научно-исследовательская лаборатория гляциоклиматологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: taamaralok@gmail.com

Ерофеев Александр Анатольевич, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией гляциоклиматологии, Геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: erofeev@yandex.ru

Копысов Сергей Геннадьевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: wosypok@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 121–132. DOI: 10.17223/25421379/17/10

T.A. Loktionova¹, A.A. Erofeev¹, S.G. Kopysov^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

MODELLING OF THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF HYDROLOGICAL CYCLE ELEMENTS OF THE SEDEYAKHA CATCHMENT ON THE BASIS OF HCC MODEL

This article presents and briefly discusses results and methodic of the modeling of annual average values of spatio-temporal dynamics of the elements of hydrological circle distribution on the Sedeyakha catchment. The study site is located on the north of Western Siberia (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug), has an area of 1310 km², and belongs to the forest-tundra geobotanical zone.

The methodology of the research is based on the using of the Hydroclimatology Calculation (HCC) method in combination with the modeling of moisture and insolation conditions through SAGA software package.

For the accounting of spatial heterogeneity of runoff formation, the geomorphometry analysis was carried out for the whole catchment. Heat and energy resources of evaporation were modeled by parameters of spectral albedo, which is available through Landsat 7 and Landsat 8 satellite images. Calculations were performed for the years with contrasting temperature and precipitation conditions (for July 2010 and July 2015).

GIS-based modeling included two stages and several sequential operations with DEM: 1) downloading of the ArcticDEM; 2) geometric correction (spatial reference); 3) hydrological correction (filling sinks on the terrain model for simulation of surface runoff); 4) calculation of channel network and delineation of catchment subbasins; 5) calculation of the catchment basin boundaries of the River Sedeyakha; 6) calculation of Wetness Index.

For the studied period (from 1967 to 2016), the coldest and driest year for the River Sedeyakha basin was 1969. The abnormally hot and the driest year is 2016. That year there have been outbreaks of anthrax and numerous fires in the tundra.

The average value of heat and energy resources of evaporation (Zm) for half a century has increased by 22 %. The amount of precipitation increased by 130 mm (22 %), which led to an acceleration of a climatic runoff by 65 mm (24 %).

It was revealed that the contribution of heat and energy resources of evaporation for the functioning of forest-tundra geosystems is very significant due to the "locking" effect of permafrost on water exchange with groundwater in the active layer. The increase of evaporation by 19 % leads to the decrease of runoff by almost two times. The results of the simulation were verified on a small forest-tundra catchment by data loggers.

Keywords: *landscape, runoff, climate, permafrost, topography.*

References

- Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous area]. Omsk: Omsk cartographic factory. 2004. 304 p. In Russian
- Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Drozdov D.S., Ponomareva O.E. *Vklad abioticheskikh faktorov v prostranstvennoe var'irovanie emissii SO₂ pochv lesotundrovoy zony Zapadnoy Sibiri (Novyy Urengoy)* [Contribution of abiotic factors to spatial variation of CO₂ emission in soils of the forest-tundra zone of Western Siberia (Novy Urengoy)] // *Earth's Cryosphere*. 2017. XXI. No 2. pp. 52–59. In Russian
- Golubyatnikov L.L., Zharov E.A., Kazantsev V.S., Filippov I.V., Gavrilov G.O. *Analiz landshaftnoy struktury landshaftov tundrovoy zony Zapadnoy Sibiri na osnove sputnikovyykh dannykh* [Analysis of the landscape structure of tundra landscapes in Western Siberia based on satellite data] // *The study of the Earth from space*. 2015. pp. 4–14. In Russian
- Gusla A.V., Mezentsev V. S. *Vodno-balansovyye issledovaniya* [Water-balance studies]. Kiev: Vyshcha SHKOLA. 1982. 229 p. In Russian
- Deistviyushchie meteorologicheskie stancii seti Rosgidrometa* [Operating weather stations of the Roshydromet network]. Available at: http://www.aari.aq/default_ru.html. Date accessed 02.11.2020. In Russian
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Nikifonov A. *Landshaftno-geofizicheskij podhod k zonirovaniyu struktury zemlepol'zovaniya na malom vodoshore* [Landscape geophysical approach to zoning of land use structure at small catchment] // *The University of Tomsk Polytechnic*. 2018. V. 329. No 6. pp. 39–47. In Russian
- Erofeev A.A. *Landshaftno-ekologicheskyy analiz basseynov malyykh rek na osnove geoinformatsionnogo modelirovaniya (na pri mere malyykh rek Tomska i ego okrestnostey). Avtoreferat Dis. Kand. nauk* [Landscape and ecological analysis of small rivers watersheds on the basis of GIS-based modelling. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. p. 16. In Russian
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Loktionova T.A. *Prostranstvenno-vremennaya dinamika elementov gidrologicheskogo tsikla reprezentativnykh vodosborov rek ravninnoy i vysokogornoj Arktiki* [Spatial and temporal dynamics of elements of the hydrological cycle of representative river catchments in the lowland and high-mountain Arctic] // *Certificate of state registration of the database № 2020622173*. 06.11.2020. In Russian
- Kalinin N.A., Shklyaev V.A., Isakov S.V. *Primenenie dannykh sputnikov Landsat dlya opredeleniya dinamiki izmeneniya struktury zemlepol'zovaniya i differentsial'nogo al'bedo territorii. Optika atmosfery i okeana* [Use of Landsat data to determination of the dynamics of landuse change and differential albedo] // *Atmospheric and Oceanic Optics* 31, No 7. pp. 530–536. In Russian
- Karnatsevich I.V., Khrushev S.A. *Kompiuternaya sistema massovykh raschetov teknyshikh vodnykh balansov rechnykh vodosborov neizuchennykh oblastei sushi: monografiya* [Computer system of mass calculations of current water balance of river basins of unexplored land areas: monograph]. Omsk. 2014. Izdatelstvo. p. 176. In Russian
- Kasiminskaya O. V., Zemtsov A. A. *Rel'ef Zapadno-Sibirskoy ravniny* [The Relief of the West Siberian plain] // "Science" Siberian branch. 1988. In Russian
- Kopysov S.G. *Parametricheskii uchet landshaftnykh uslovii stoka v metode gidrologo-klimaticheskikh raschetov* [Parametric account of landscape conditions of flow in the method of hydrology climatic calculations] // *Geografiya i prirodnye resursy* 2014, No 3. pp. 157–161. In Russian.
- Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemcov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // *International Journal of Environmental Studies*. 2015. Vol. 72. No 3. pp. 380–385.
- Kononov V.G., Rudakov V.A. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya monitoringa lednikov i glaciologicheskikh raschyotov* [Possibilities of Using earth remote sensing data for glacier monitoring and glaciological calculations] // *Ice and Snow*. 2015. No 1 (129). pp. 15–27. In Russian
- Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselyakh* [Hydrological calculations for melioration]. Omsk, Omsk Agricultural Institute Publ., 1982. P.80. In Russian
- Pavlova T.V., Kattsov V.M. *Ozhidaemye izmeneniya osadkov i ispareniya v Arktike v 21-m veke. Rezul'taty raschetov s pomoshch'yu ansamblya global'nykh klimaticheskikh modelej. CMIP5* [Expected changes in precipitation and evaporation in the Arctic in the 21st century. Results of calculations using an ensemble of global climate models. CMIP5] // *Proceedings Of the main geophysical Observatory of A. I. Voeikov*. 2015. pp. 29. In Russian
- Specializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy* [Specialized data for climatic research]. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (date accessed 10.11.2020). In Russian
- ArcticDEM. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>. No 3. pp. 4–14. Date accessed: 09.03.2020.
- Bui M.T., Lu J., Nie L. A Review of Hydrological Models Applied in the Permafrost-Dominated Arctic Region // *Geosciences* 2020. 10. p. 401.
- Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // *Hydrological Science Bulletin*, 1979, No 24, pp. 43–69.
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Description of daily air temperature and precipitation data set from Russian meteorological stations and from some meteorological stations over the former USSR territory (TTTR). Available at: <http://meteo.ru/english/climate/descrip11.html>. Date accessed: 17.03.2020. In Russian
- Earth Explorer: United States Geological Survey (USGS) Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. V. 37. pp. 4302–4315.
- Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Srinivasan R., Teisserenc R., Sánchez Pérez J.M. Using Modeling Tools to Better Understand Permafrost Hydrology. *Water* 2017, 9, 418 p.

Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemcov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // International Journal of Environmental Studies. 2015. Vol. 72. No 3. pp. 380–385.

Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms // Remote Sens. Environ. 2000. No 76. pp. 213–238.

Pourali S.H., Arrowsmith C., Chrisman N. et al. Topography Wetness Index Application in Flood Risk-Based Land Use Planning // Appl. Spatial Analysis. 2016. No 9:39. pp. 39–54. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>. Date accessed 10.11.2020.

Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Version 2. SAGA GIS 4+. 2020. Available at: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june_2017.pdf (date accessed 10.11.2020).

Author's:

Loktionova Tamara A., Engineer, Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: taamaralok@gmail.com

Erofeev Alexander A., Cand. Sci. (Geography), Head of the Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: erofeew@yandex.com

Kopysov Sergey G., Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of Forest Ecosystem Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia; Associate Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: wosypok@mail.ru

ПЕРСОНАЛИИ

УДК 550.4 + 929

ЛЕОНИД ПЕТРОВИЧ РИХВАНОВ: МАРШРУТ ОТ АСПИРАНТА ДО ПРОФЕССОРА

Е.Г. Язиков¹, В.П. Парначев²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия



Посвящается памяти безвременно ушедшему Леониду Петровичу Рихванову (31.07.1945–16.09.2020), профессору Томского политехнического университета, чья научная деятельность связана с изучением и развитием радиогеохимического метода в геологии.

Ключевые слова: биография, профессор, заслуженный геолог, радиогеохимия, геоэкология, Томский политехнический университет.

Леонид Петрович Рихванов родился в с. Голуметь Иркутской области. В 1969 г. окончил Томский политехнический институт (ТПИ, ныне НИ ТПУ) и получил диплом горного инженера-геолога. С этого времени до конца своей жизни он работал в Томском политехническом университете, пройдя путь от аспиранта до доктора геолого-минералогических наук, профессора и заведующего кафедрой.



Леонид Петрович Рихванов
31.07.1945–16.09.2020

С 1972 г. под руководством профессора В.К. Черепнина начались минералого-геохимические исследования с использованием ядерно-физических методов, развиваемых на базе учебного ядерного реактора ТПИ, и аспирант Л.П. Рихванов активно включился в работу этого коллектива.

В это время на базе реактора была впервые отработана методика высокоточного определения урана методом запаздывающих нейтронов в любых объектах без разрушения материалов. Сотрудниками кафедры, в том числе и Л.П. Рихвановым (1972, 1975, 1988 гг.), были освоены методики радиографическо-

го анализа, позволяющие с высокой точностью определять как уровень накопления, так и особенности распределения радиоактивных элементов в природных средах.

В период с 1975 по 1990 г. разработка минералого-геохимических критериев и признаков прогнозирования, поисков и оценки уранового оруденения в горно-таёжных зонах становится основной темой исследования кафедры. По данному направлению Л.П. Рихвановым (1975 г.) и другими сотрудниками кафедры были защищены кандидатские диссертации, а результаты этих разработок нашли отражение в многочисленных закрытых отчётах, публикациях (более 100 работ) и в авторских свидетельствах (5) на способы радиографических исследований и поисков урановых месторождений.

Проведённые в этом направлении Л.П. Рихвановым и его коллегами работы (1975–1988 гг.) позволили рекомендовать ряд оценочных, прогнозных, поисковых и поисково-разведочных критериев уранового оруденения применительно к горно-таёжным районам Алтае-Саянской складчатой области.

Дальнейшие исследования сотрудников кафедры под руководством Л.П. Рихванова в 1980–1990-е гг. показали, что радиогеохимические методы позволяют решать не только многие геологические, но и экологические, и технологические задачи (поиски углеводородного сырья; радиоэкологическая оценка территорий; типизация, оценка и разбраковка почв, торфов, минеральных удобрений и т.д.). Так, изучение уровня содержания естественных радиоактивных элементов в почвах (Рихванов, 1994, 1995 гг.) позволило установить, что накопление урана и тория в почвах зависит не только от генетического типа, количества гумуса, фосфора и железа в почвах, но и

от факторов загрязнения внешней среды. В зонах влияния предприятий ядерно-топливного цикла уровень накопления урана более существен, чем вне зон влияния.

Существующие взаимосвязи между уровнем накопления фосфора, гумуса и радиоактивных элементов позволило производить в полевых условиях агрогеохимическую оценку почв (1992, 1993 гг.). Проводимое Л.П. Рихвановым и его коллегами (1996–2000 гг.) радиогеохимическое изучение углей свидетельствуют о том, что данные элементы могут использоваться как для целей типизации углей и угольных бассейнов, так и для корреляции угленосных толщ, решения некоторых генетических вопросов углеобразования.

Начиная с 1996 г. под руководством Л.П. Рихванова на кафедре шла активная разработка технологии прогнозирования и поисков месторождений углеводородного сырья в условиях Западной Сибири радиогеохимическими методами.

Накопленный многолетний опыт по использованию естественных радиоактивных элементов как трассеров природных геологических процессов позволил Леониду Петровичу, его коллегам и ученикам активно включиться в решение радиозоологических проблем, обусловленных деятельностью предприятий ядерно-топливного цикла, испытанием ядерного оружия в атмосфере. Так, Л.П. Рихванову (1997, 1999 гг.) удалось показать, что в зонах влияния ядерных производств сформировались специфические природно-техногенные биогеохимические районы.

В исследованиях Л.П. Рихванова и сотрудников кафедры показана чрезвычайно важная индикаторная роль радиоактивных элементов в биологических материалах. При этом достаточно точно выявлено, что уровни их накопления и отношения элементов отражают не только геохимическую специфику среды обитания и степень ее трансформации, но и физиологическое состояние живых существ в норме и патологии.

Благодаря научным разработкам и активной гражданской позиции профессора Леонида Петровича Рихванова, в настоящее время радиоактивные элементы и методы их исследования широко используются для решения многих задач в науках о Земле. Л.П. Рихванов был членом нескольких диссертационных советов в Томском политехническом и Томском государственном университетах, участвовал в обсуждении и подготовке кадров высшей квалификации, руководил аспирантами и соискателями, которые приезжали к нему не только из разных городов России, но и дальнего и ближнего зарубежья.

Свои научные идеи Л.П. Рихванов активно пропагандировал на проводимых им и его коллегами конференциях под общим названием «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», в работе которых кроме многих отечественных ученых участвовали и зарубежные коллеги.

Признавая заслуги и достижения Леонида Петровича Рихванова, его избрали действительным членом Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности, членом-корреспондентом Международной академии наук Высшей школы, членом координационного экологического Совета администрации Томской области, экологической комиссии администрации города Томска, председателем Томского отделения Российского геологического общества.

За свою напряженную научную и общественную деятельность Леонид Петрович был удостоен почётных званий «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», «Заслуженный геолог Российской Федерации», «Почетный разведчик недр», «Почетный работник высшего образования Российской Федерации».

Светлый образ Леонида Петровича Рихванова – учёного, гражданина, труженика, замечательного человека и надежного товарища – навсегда останется в нашей памяти.

Авторы:

Язиков Егор Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, отделение геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: yazikoveg@tpu.ru

Парначев Валерий Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра динамической геологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: dingeo@ggf.tsu.ru

E.G. Yazikov¹, V.P. Parnachev²

¹*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.*

RIKHVANOV LEONID PETROVICH: THE ROUTE FROM GRADUATE STUDENT TO PROFESSOR

Dedicated to the memory of the untimely deceased Leonid Petrovich Rikhvanov (life years 31.07.1945–16.09.2020), professor at Tomsk Polytechnic University, who devoted his scientific activities to the study and development of the radio-geochemical method in geology.

Keywords: *biography, professor, honored geologist, radio geochemistry, geoecology, Tomsk Polytechnic University.*

Author's:

Yazikov Egor Gr., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Department of Geology, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: yazikoveg@tpu.ru

Parnachev Valery P., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Department of Dinamical Geology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: dingeo@ggf.tsu.ru

Научный журнал

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

2020. № 4

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 25.12.2020 г. Формат 60х84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 17,2; усл. печ. л. 16.
Тираж 50 экз. Заказ № 4512. Цена свободная.

Дата выхода в свет 14.01.2021 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