

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 631.41(631.445.1)
doi: 10.17223/19988591/68/1

Гидроморфные почвы естественных и нарушенных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья (юг Западной Сибири)

Александр Олегович Константинов¹,
Елизавета Юрьевна Константинова², Андрей Андреевич Новоселов³,
Варвара Юрьевна Зайцева⁴, Алина Олеговна Курасова⁵

^{1, 4, 5} *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

² *Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

³ *Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>, konstantinov.alexandr72@gmail.com

² <http://orcid.org/0000-0002-9836-8721>, konstantliza@gmail.com

³ <https://orcid.org/0000-0001-8589-2316>, mr.andreygeo@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-9387-6358>, varvara.zaitseva.geo@gmail.com

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>, kurasovalina@gmail.com

Аннотация. Настоящее исследование посвящено изучению естественных и антропогенно нарушенных почв гидроморфных ландшафтов окрестностей города Тюмени. Проанализированы содержания и особенности профильного распределения макро- и микроэлементов, а также преобладающие почвообразовательные процессы и их выраженность. Объектами исследований служат торфозем агроминеральный торфяно-окисленно-глеевый (Sapric Drainic Histosol), вскрытый в мелиорированной сильно нарушенной части Тарманского болота, и условно фоновая перегнойно-глеевая омергеленная почва (Sapric Calcic Histosol), располагающаяся в пределах территории биостанции Тюменского государственного университета на озере Кучак. Полученные в ходе исследования результаты позволяют сделать вывод о том, что различия в степени антропогенного преобразования не оказывают существенного влияния на элементный состав почв. Особенности внутрипрофильной дифференциации макро- и микроэлементов в целом демонстрируют выраженное сходство с особенностями морфологического строения почвенных профилей, набором ведущих элементарных почвообразовательных процессов и геохимических барьеров. Роль процессов современного карбонатообразования потенциально значима для формирования радиальной геохимической структуры рассматриваемых почв, локальных геохимических потоков и секвестрации углерода.

Ключевые слова: тяжелые металлы, почвообразовательные процессы, физико-химические свойства почв, *Histosols*, профильная дифференциация, Тюменская область

Источник финансирования: исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0006; аналитические работы и интерпретация результатов).

Благодарности: авторы признательны С.В. Лойко за участие в полевых работах.

Для цитирования: Константинов А.О., Константинова Е.Ю., Новоселов А.А., Зайцева В.Ю., Курасова А.О. Гидроморфные почвы естественных и нарушенных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья (юг Западной Сибири) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2024. № 68. С. 6–26. doi: 10.17223/19988591/68/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/68/1

Hydromorphic soils of natural and disturbed landscapes of the Tura-Tavda interfluve (south of Western Siberia)

**Alexandr O. Konstantinov¹, Elizaveta Yu. Konstantinova²,
Andrey A. Novoselov³, Varvara Yu. Zaitseva⁴, Alina O. Kurasova⁵**

^{1, 4, 5} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

² *Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation*

³ *University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>, konstantinov.alexandr72@gmail.com

² <http://orcid.org/0000-0002-9836-8721>, konstantliza@gmail.com

³ <https://orcid.org/0000-0001-8589-2316>, mr.andreygeo@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-9387-6358>, varvara.zaitseva.geo@gmail.com

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>, kurasovalina@gmail.com

Summary. The presented paper is devoted to the ecological and geochemical features of natural and anthropogenically disturbed soils of lake-wetland landscapes of the Tura-Tavda interfluve. Hydromorphic landscapes occupy a significant area within the territory under consideration and play a key role in ensuring the sustainable development of the entire region, performing a number of important ecosystem functions. The intensification of anthropogenic pressure in the south of the Tyumen Oblast, caused by an increase in the area and population of cities, as well as the intensification of agriculture, also affects lake and wetland ecosystems. A striking example of such an impact can be hydromorphic landscapes in the vicinity of the city of Tyumen, which underwent a radical transformation as a result of drainage melioration, peat extraction and subsequent agricultural activity and urbanization. The result of the following process was an intensive transformation of the soil and vegetation cover associated with both mechanical disturbances and drying out, and chemical pollution. The purpose of this study was to assess the evidence of characteristic soil-forming processes and their influence on the structure, properties and geochemical features of soils of hydromorphic landscapes of the Tura-Tavda interfluve. The novelty of the presented research lies in the fact that the combined behavior of inorganic pollutants in similar soils of the territory under consideration has been studied for the first time. The background soil, represented by Sapric Calcic Histosol under a linden-aspen forest, and the soil of a heavily disturbed area, Sapric Drainic Histosol, were studied. Research methods included methods of soil morphology when describing soil profiles, micromorphology of soil thin sections for analysis of expression and intensity of soil-forming processes, as well as chemical analysis of soil, including measurements of pH, Eh, electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) by the potentiometric method in suspension, organic carbon content (C_{org}) by the titrimetric method, $CaCO_3$ content by the gas-volumetric method, mass loss on ignition (LOI), exchange cations Ca^{2+} and Mg^{2+} , particle size distribution by sedimentation method with pyrophosphate preparation. The macro- and microelement composition (Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Pb) of the soils was determined using X-ray fluorescence analysis. Statistical analysis of

the data was carried out using the STATISTICA 12 “StatSoft” package (USA). Signs of anthropogenic transformation of the profile in Sapric Drainic Histosol are noted, such as reduced thickness of organogenic and organomineral horizons and the absence of signs of carbonate formation (See Fig. 1), which, on the contrary, are manifested at the micro level in thin sections of Sapric Calcic Histosol (See Fig. 2). There are significant differences in the values of such parameters as pH, Eh, C_{org} , LOI, as well as sand fraction content for natural and disturbed soils (See Fig. 3). The levels of most elements in the two soils do not differ significantly: Mg (4.7 and 5.1 mg/kg), Ca (51.9 and 35.4 mg/kg), Mn (445.5 and 521.2 mg/kg), Fe (20.7 and 15.5 mg/kg), Cu (5.2 and 8.2 mg/kg), Zn (31 and 37.2 mg/kg), Sr (146.8 and 144.9 mg/kg), Pb (12.9 and 10.7 mg/kg) (See Fig. 4). Compared with the world-soil average, the disturbed hydromorphic soils of the Tarman bog massif have higher contents of Cr, Mn, Co, As. Correlation analysis made it possible to identify associations of elements, characterized by close relationships ($R > 0.576$; $p < 0.05$), which indicates a similar nature of their behavior and a common origin in the hydromorphic soils of the Tura-Tavda interfluvium (See Fig. 5). The levels and profile distribution of metals in the soils under consideration, despite significant differences and the history and nature of anthropogenic impact, demonstrated similar values and features. This fact indirectly indicates that even significant anthropogenic impact does not always transform the trends laid down as a result of long-term development of ecosystems and soils. In general, it is possible to note the presence of indirect interrelations between the prevailing set of soil-forming processes and their expression and the features of the radial geochemical structure of natural and disturbed soils.

The article contains 5 Figures, 40 References.

Keywords: heavy metals, soil-forming processes, physicochemical properties of soils, Histosols, profile differentiation, Tyumen Oblast

Fundings: This work was supported by a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No FSWM-2024-0006: laboratory work and data processing).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Sergei V. Loiko for participation in the field study.

For citation: Konstantinov AO, Konstantinova EYu, Novoselov AA, Zaitseva VYu, Kurasova AO. Hydromorphic soils of natural and disturbed landscapes of the Tura-Tavda interfluvium (south of Western Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2024;68:6-26. doi: 10.17223/19988591/68/1

Введение

Озерно-болотные ландшафты, распространённые в широком спектре природно-климатических условий Западной Сибири, играют важную роль в формировании экологического каркаса всего региона, а также обеспечении устойчивости экосистем к антропогенному воздействию. Особый статус болот в Западной Сибири объясняется сочетанием гидрологических и геоморфологических особенностей рассматриваемой территории, а также характером ее эволюции в позднечетвертичное время [1]. Экосистемные функции озерно-болотных ландшафтов, а также оценка их потенциальной уязвимости в условиях интенсификации антропогенного давления во многом зависят от специфики конкретной природной зоны, в которой они расположены. Подобные экосистемы играют важнейшую роль в устойчивом функционировании наиболее освоенных

частей Западной Сибири [2–3], включая зону подтайги. Например, подтаежные озерно-болотные ландшафты широко распространены на юге Тюменской и Томской областей, в частности, в наиболее урбанизированных и индустриализированных районах Западно-Сибирской равнины. Значимость данного типа экосистем обусловлена двумя аспектами. Во-первых, озерно-болотные ландшафты играют важную роль в сохранении биоразнообразия, регулировании стока, а также обеспечении хозяйственной и рекреационной деятельности [4]. Во-вторых, данный тип экосистем напрямую влияет на формирование континентальных биогеохимических потоков, а также потенциально способен оказывать влияние на изменение климатических условий [5–7].

Влияние разномасштабных естественных и антропогенно обусловленных изменений окружающей среды на состояние озерно-болотных ландшафтов Западной Сибири является актуальной и достаточно сложной проблемой. Интенсивное хозяйственное освоение территории, начавшееся во второй половине прошлого века, привело к значительной трансформации озерно-болотных экосистем юга Западной Сибири [8]. Следует отметить, что антропогенно-обусловленные изменения конкретного озерно-болотного ландшафта в значительной степени зависят от преобладающего типа негативного воздействия [9], который может включать деградацию территории при добыче торфа, осушительные мелиорации, увеличение частоты пожаров, химическое загрязнение сопряженных природных сред [10–12]. Почвы и почвенный покров в целом являются крайне уязвимыми компонентами гидроморфных и полугидроморфных ландшафтов. Различные виды антропогенного воздействия могут приводить как к прямым изменениям строения и свойств органогенных и органоминеральных почв за счет механических нарушений и загрязнения, так и опосредованно влиять на направленность и интенсивность ведущих процессов за счет осушения и последующей смены растительных сообществ [13–14].

Подтаежные озерно-болотные ландшафты являются важнейшим компонентом ландшафтной мозаики наиболее урбанизированной части юга Тюменской области. Сменяющие друг друга сочетания болотных массивов и водоемов являются характерной чертой Тура-Тавдинского междуречья. Близость данной территории к Тюменской агломерации является причиной широкого распространения нарушенных болот, наиболее крупным и известным из которых является Тарманский болотный массив [15–16]. Развитие городской инфраструктуры и расширение промышленности способствовали масштабным мероприятиям по осушению болота с последующим изъятием торфа для нужд предприятий теплоэнергетики. Так, обширные золотвалы тюменской ТЭЦ-1 образованы в результате сжигания торфов Тарманского месторождения [17–18]. В дальнейшем часть мелиорированных земель использовалась в качестве сенокосов и огородов [19].

В целом озерно-болотные ландшафты, находясь на периферии Тюменской агломерации, подвергаются медленной урбанизации [20–21], что приводит к природно-антропогенной эволюции экосистем и почвенного покрова. В этой связи приобретает актуальность сравнительная эколого-геохимическая оценка состояния естественных и антропогенно-нарушенных почв Тарманского болотного массива, а именно их физико-химических

свойств, содержания поллютантов и роли почвообразовательных процессов в дифференциации профилей. В отдельных работах изучена биогеохимия озерно-болотных ландшафтов [22–23], в том числе естественных и слабоизмененных почв. Таким образом, целью данного исследования является оценка выраженности характерных почвообразовательных процессов и их влияния на строение, свойства и геохимические особенности почв гидроморфных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья.

Материалы и методы

Пояс озерно-болотных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья приурочен к поверхности второй надпойменной террасы левого склона долины р. Тавды, простирается в широтном направлении на 136 км в пределах Слободо-Туринаского района Свердловской области, Нижнетавдинского, Тюменского и Ярковского районов Тюменской области. Общая площадь водосбора составляет 2 160 км², при этом болотами занято 1 240 км² [15]. Болотный массив расположен в континентальной западносибирской центральной области умеренного климата; среднегодовое количество осадков по данным метеостанции Тюмень составляет 470 мм/год, среднегодовая температура +2,2°C. Территория входит в Ишимо-Иртышский округ торфяных болотных верховых, переходных и низинных почв и их грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов с участием дерново-подзолисто-глеевых почв со вторым гумусовым горизонтом Западно-Сибирской южнотаежной почвенной провинции [24]. Мощность торфяной залежи, подстилаемой озерными иловатыми глинами и сапропелями, в составе которой преобладают гипновые мхи, осока и тростник [25], составляет в среднем 2 м. С 1971 г. Тарманский болотный массив подвергался осушению в своей западной части [26].

Полевые исследования проведены в августе 2022 г. Заложены два почвенных разреза, характеризующих торфозем агроминеральный торфяно-окисленно-глеевый (Sapric Drainic Histosol) (T1/22) под разнотравно-злаковой растительностью (57°16'44.14" N, 65°22'44.54" E) и перегнойно-глеевую омергеленную почву (Sapric Calcic Histosol) (T2/22) под липово-осиновым лесом (57°21'31.58" N, 66°02'53.38" E) (рис. 1). Торфозем рассматривается нами как антропогенно-трансформированная почва, а перегнойно-глеевая – как фоновая почва. Классификация почв проводилась согласно Классификации и диагностике почв России [27] и Мировой реферативной базе почвенных ресурсов [28]. Образцы почв массой 1–1,5 кг отобраны из каждого генетического горизонта по всей мощности почвенного профиля до глубины 110 см; дополнительно отобрана проба омергеленного морфона в горизонте CGml,ox (глубина 70–95 см) перегнойно-глеевой омергеленной почвы (T2/22). Всего отобрано и проанализировано 12 образцов. Также для лучшего понимания выраженности и интенсивности почвообразовательных процессов из передней стенки разреза T2/22 были отобраны пять микромонолитов, из которых в дальнейшем были изготовлены прозрачные шлифы. Изучение шлифов проводилось с использованием поляризационного микроскопа BX53M «Olympus» (Япония); снимки получены с использованием цифровой камеры SC180 «Olympus» (Япония).

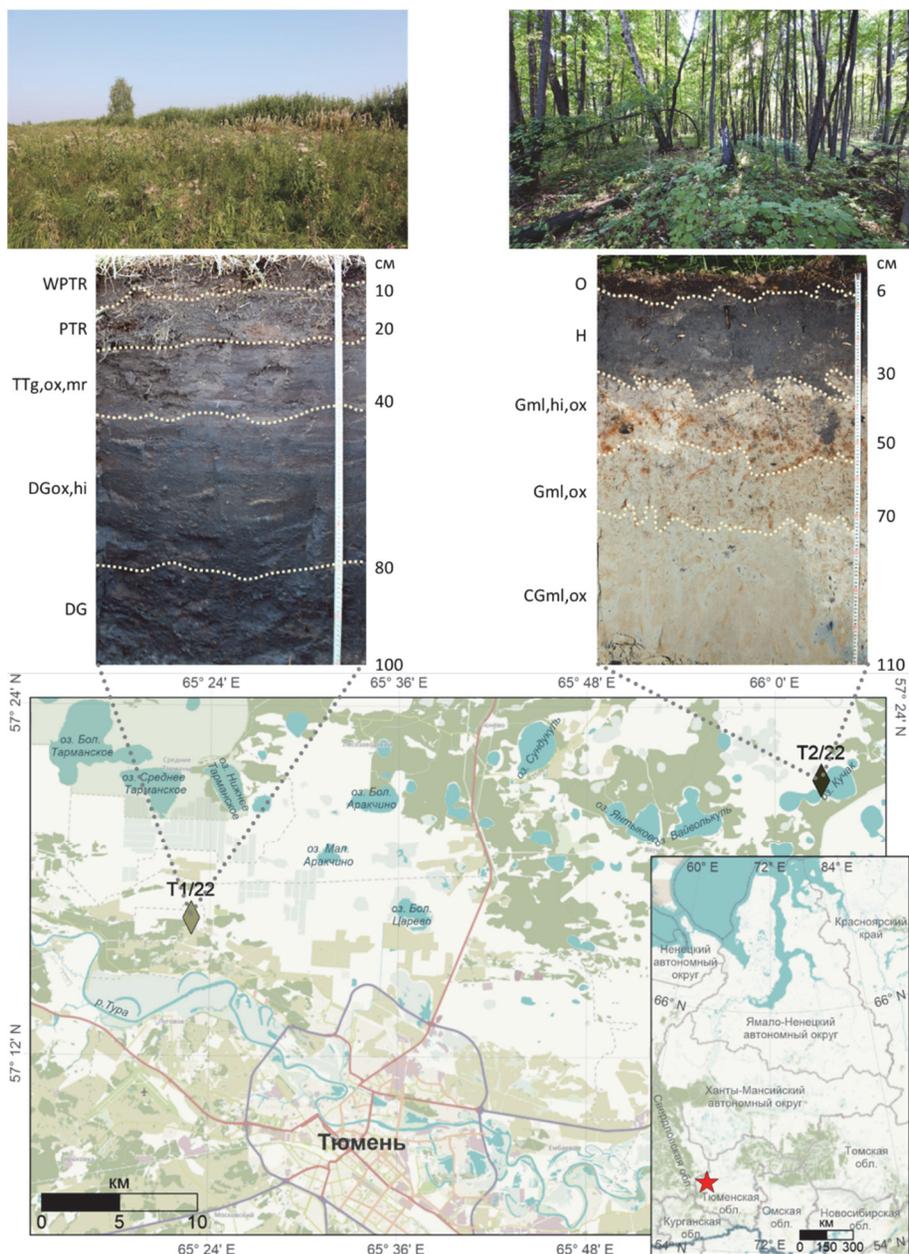


Рис. 1. Расположение изученных почвенных разрезов в пределах Тарманского болотного массива, Тюменская область: T1/22 – торфозем агроминеральный торфяно-окисленно-глеевый под разнотравно-злаковой растительностью, T2/22 – перегнойно-глеевая омергеленная почва под липово-осиновым лесом. Авторы фото А.А. Новоселов, С.В. Лойко
[Fig. 1. Location of the studied soil sections within the Tarman bog massif, Tyumen Oblast: T1/22 - Sapric Drainic Histosol under forb-grass vegetation, T2/22 - Sapric Calcic Histosol under the linden and aspen forest. Photo by Andrey A. Novoselov, Sergey V. Loiko]

В предварительно высушенных до воздушно-сухого состояния пробах определены рН, редокс-потенциал (Eh), удельная электропроводность (ЕС) и общая минерализация (TDS) потенциометрическим методом в суспензии почва:вода (1:2,5) при помощи мультиметра 3420 WTW «Xylem Analytics» (Германия), гранулометрический состав с использованием пипетки Качинского с пирофосфатной подготовкой [29], содержание органического углерода ($C_{орг}$) методом Тюрина, карбонатов газоволюметрическим методом, обменных кальция и магния по методу Шаймухаметова, потери массы при прокаливании (ППП) путём сжигания образца в муфельной печи [30]. Макро- и микроэлементный состав почв (Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Sr, Pb) определен в воздушно-сухих порошковых пробах почв с применением рентгеновского спектрометра Спектроскан МАКС-GVM «НПО «Спектрон» (Россия). Количественный анализ проведен в автоматическом режиме с использованием ПО «Спектр-Квант» «НПО «Спектрон» (Россия). Градуировка прибора выполнена по результатам измерения государственных стандартных образцов состава почвы. Контроль качества измерений проводился путем оценки погрешности с использованием стандартного образца почвы [31].

Статистический анализ данных проведен с использованием пакета STATISTICA 12 «StatSoft» (США). При сравнении химического состава почв использован U-критерий Манна–Уитни. Результаты считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Для оценки парных взаимосвязей между показателями использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена (R). Ассоциации между элементами представлены в виде корреляционной диаграммы, созданной с помощью приложения EzCorrGraph, версия 1.1 [32]. Для построения графика рассматривался порог $R = 0,576$ при $n = 12$.

Результаты исследования и обсуждение

Необходимо отметить значительные различия в морфологии исследованных почв, а также выраженности и наборе преобладающих почвообразовательных процессов. Так, в торфоземе агроминеральном торфяно-окисленно-глеевом (Т1/22) (формула профиля WPTR–PTR–ТТg,ox,mr–DGox,hi–DG) отмечены многочисленные признаки, указывающие на высокую степень антропогенного преобразования профиля. Во-первых, мощность собственно органогенных и органоминеральных горизонтов не превышает нескольких десятков сантиметров, в то время как в ненарушенных торфяных почвах подтайги юга Тюменской области данная величина может достигать нескольких метров [33]. Таким образом, можно говорить о значительном механическом нарушении верхней части профиля, связанном с добычей торфа фрезерным способом. Кроме того, наличие агроторфяно-минерального горизонта PTR, подстилаемого сохранившимся маломощным торфяным горизонтом ТТg,ox,mr (см. рис. 1), свидетельствует об умеренном характере последующего сельскохозяйственного использования данного участка в качестве сенокоса без многократной глубокой распашки. Перечисленные выше особенности строения профиля позволяют сделать вывод о том, что механи-

ческие нарушения и изъятие органогенного материала при осушении и разработке месторождения торфа в сочетании с исходной мощностью залежи в значительной степени определяют направление антропогенной эволюции данной группы почв, в то время как последующее землепользование лишь модифицирует данный тренд [34]. Также следует отметить отсутствие характерных для Тура-Тавдинского междуречья признаков карбонатообразования в глеевых горизонтах нижней части профиля. Данный факт может являться как следствием локальных условий, так и косвенным подтверждением влияния осушительной мелиорации и разработки торфа на процессы осаждения-растворения карбонатов. Таким образом, в нарушенных почвах гидроморфных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья преобладают элементарные почвообразовательные процессы метаморфизма органического вещества, миграции вещества в почве и оглеения почвенной массы.

Разрез Т2/22 (формула профиля O-H-Gml,hi,ox-Gml,ox-CGml,ox), представляющий ненарушенную почву озерно-болотных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья, в значительной степени отличается как по набору и выраженности современных почвообразовательных процессов, так и гидрологическим условиям. Наиболее значимыми процессами являются процессы метаморфизма органического вещества, метаморфизма минерального вещества, а также оглеения почвенной массы, сегрегации и цементации вещества. Следует отметить, что тогда как в почвах нарушенных ландшафтов ведущую роль среди процессов метаморфизма органического вещества играют процессы его минерализации и миграции, а процессы поступления органики и ее гумификации находятся в подчинённом положении, в почвах естественных участков наблюдается противоположная тенденция. Особого внимания заслуживает процесс современного карбонатообразования, приводящий к формированию выраженной, хотя и неравномерной, омергеленной зоны непосредственно под гумусовым профилем. Данная особенность свидетельствует о высокой интенсивности процессов современного карбонатообразования при близком залегании грунтовых вод и хорошо просматривается в шлифах (рис. 2): в средней части профиля выражены процессы образования пелитоморфных карбонатов. В отдельных случаях карбонатный материал можно считать цементирующим, так как он заполняет большую часть порового пространства. В целом, анализируя особенности изученных профилей, можно отметить, что в почвах нарушенных гидроморфных ландшафтов происходит активный вынос вещества из профиля, в то время как в почвах естественных ландшафтов, наоборот, наблюдается активный привнос, что отражается в большем разнообразии почвообразовательных процессов и контрастности радиальной структуры.

Торфоземы и перегнойно-глеевые почвы отличаются характером профильного распределения основных физико-химических параметров. Значимые различия ($p < 0,05$) наблюдаются в показателях pH, Eh, $C_{орг}$, ППП, содержания песка в профиле этих почв (рис. 3). В торфоземах реакция среды меняется от нейтральной в поверхностном горизонте до кислой в подстилающей породе (pH от 7,4 до 5). В перегнойно-глеевой почве кислотность изменяется по элювиально-иллювиальному типу от сильнощелочной через нейтральную до щелочной (pH 6,5–8,9).

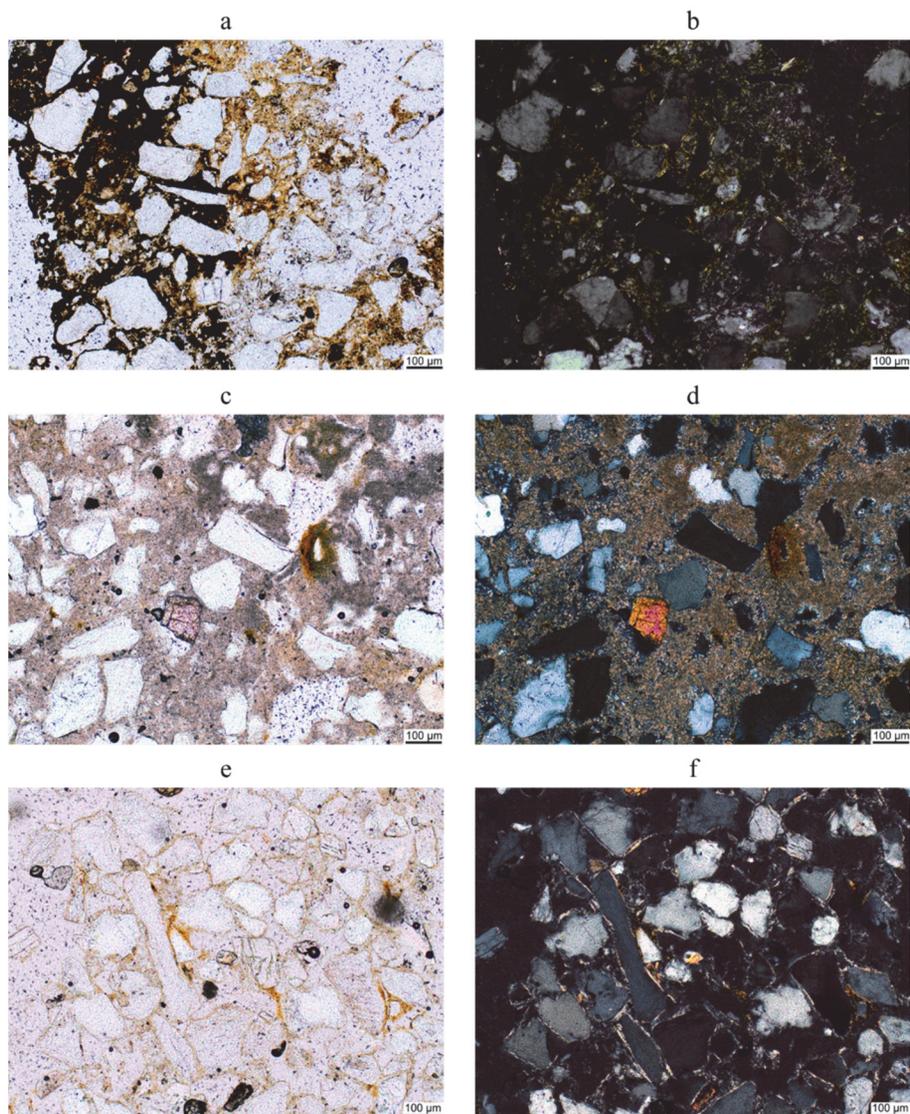


Рис. 2. Особенности микростроения перегнойно-глеевой омергеленной почвы (в пределах Тарманского болотного массива, Тюменская область): *a, b* – нижняя часть горизонта Н (20–30 см) с заметным распределением зон, обогащенных органическим веществом, и преимущественно минеральной массой; *c, d* – омергеленный морфон в средней части профиля (70–80 см) с хорошо заметной цементацией карбонатным материалом; *e, f* – нижняя часть горизонта CGml,ox (100–110 см), представляющая собой современные озерно-аллювиальные отложения. Снимки выполнены:

a, c, e – без анализатора; *b, d, f* – с анализатором; $\mu\text{м}$ – мкм

[**Fig. 2.** Features of the microstructure of Sapric Calcic Histosol (within the Tarman bog massif, Tyumen region): *a, b* – the lower part of the H horizon (20–30 cm) with a noticeable distribution of zones enriched in organic matter and predominantly mineral mass; *c, d* – marlified morphon in the middle part of the profile (70–80 cm) with clearly visible cementation by carbonate material; *e, f* – the lower part of the CGml,ox horizon (100–110 cm), which is modern lacustrine-alluvial deposits. The images were taken:

a, c, e – without an analyzer; *b, d, f* – with an analyzer; μm – micrometers]

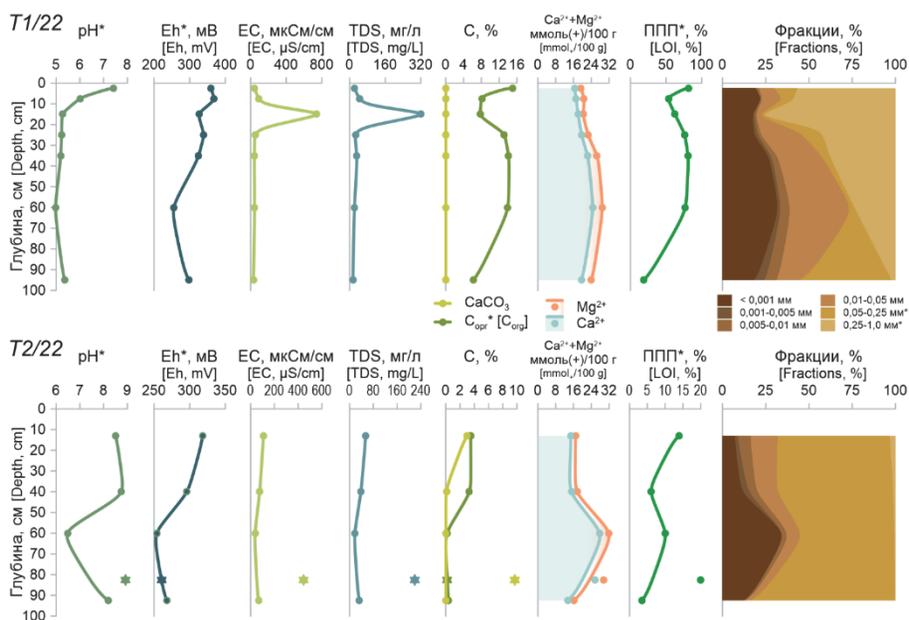


Рис. 3. Профильное распределение основных физико-химических свойств в торфоземе агроминеральном торфяно-окисленно-глебовом (Т1/22) и перегнойно-глеевой омергеленной почве (Т2/22). Звездочкой отмечены достоверные отличия согласно U-критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$)

[Fig. 3. Vertical distribution of main physical-chemical properties in Sapric Drainic Histisol (T1/22) and Sapric Calcic Histisol (T2/22). An asterisk indicates significant differences according to the Mann-Whitney U test ($p < 0.05$)]

Окислительно-восстановительная обстановка характерна для гидроморфных почв и соответствует слабо восстановительным условиям (E_h 256–368 и 254–318 мВ соответственно). Обе почвы относятся к незасоленным, вместе с тем максимальные значения ЕС и TDS наблюдаются в агроторфяно-минеральном горизонте PTR торфоземов (740 мкСм/см; 320 мг/л) и в оглеенной породе CGml,ox перегнойно-глеевой почвы (445 мкСм/см; 220 мг/л). В профиле торфозема отмечена поверхностная аккумуляция $C_{орг}$ (до 15%) с последующим резким снижением содержания в агроторфяно-минеральном горизонте при общем уменьшении вниз по профилю. В перегнойно-глеевой почве $C_{орг}$ распределен по прогрессивно-аккумулятивному типу (от 3,5 до 0,4%). В отличие от торфозема, в профиле перегнойно-торфяной почвы обнаруживаются карбонаты в перегнойном горизонте Н (3%) и в пределах омергеленного морфона в горизонте CGml,ox (9,7%). Суммарное содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} незначительно увеличивается с глубиной в профиле торфозема, тогда как в перегнойно-глеевой почве отмечается их максимальное накопление в глеевом горизонте Gml,ox. В обеих почвах в составе поглощенных катионов преобладает Ca^{2+} . Основным источником обменных катионов в почвах Тарманского болотного массива служат грунтовые воды [16]. В верхней части профиля торфозем имеет легкосуглинистый состав, в нижней – среднесуглинистый. В перегнойно-глеевой почве отмечено увеличение относительной доли физической глины

в глеевом горизонте (до 37%), тогда как перегнойный горизонт и порода характеризуются супесчаным составом.

Выявлен ряд особенностей профильного распределения макро- и микроэлементов (рис. 4) в изученных почвах. В профиле торфозема содержания Na, Ca, Fe, а также Mn и Sr снижаются от поверхности (15,2, 72,4, 24,3 г/кг и 628, 159 мг/кг соответственно) к нижней границе гумусово-слаборазвитого горизонта, развивающегося на агроторфяно-минеральном горизонте, WPTR (13,0, 26,3, 13,4 г/кг и 247, 123 мг/кг соответственно), затем достигают максимума в торфяном горизонте TTg,ox,mr (18,3, 72,6, 24,6 г/кг и 597, 168 мг/кг соответственно) и постепенно уменьшаются к нижней части профиля до минимума в оглеенной породе DG (9,4, 18,0, 20,5 г/кг и 310, 145 мг/кг соответственно). Характер миграции данной группы элементов соответствует профильному распределению $C_{орг}$ и ППП, с которыми отмечены высокие положительные корреляции Ca ($R_{Ca-C_{орг}} = 0,93$ и $R_{Ca-ППП} = 0,96$), Mn ($R_{Mn-C_{орг}} = 0,82$ и $R_{Mn-ППП} = 0,86$) и Sr ($R_{Sr-C_{орг}} = 0,86$ и $R_{Sr-ППП} = 0,82$). Таким образом, подвижные катионогенные элементы концентрируются на биогеохимических барьерах в верхней части горизонта WPTR и горизонте TTg,ox,mr торфозема, где превышение их содержаний относительно почвообразующей породы достигает 1,2–2 раза (до 4 для Ca). Распределение Mg и Ni в органоминеральных и органогенных горизонтах аналогично (от 5,2 г/кг и 52,5 мг/кг в WPTR до 3,5 г/кг и 34,5 мг/кг в PTR и 5,2 г/кг и 53,3 мг/кг в TTg,ox,mr соответственно), тогда как в минеральной толще содержание данных элементов увеличивается (до 5,1 г/кг и 87,0 мг/кг в DGox,hi и 6,0 г/кг и 55,8 мг/кг в DG, соответственно). В кислой глеевой обстановке катионогенные Mg и Ni подвижны, их накопление происходит на сорбционно-седиментационном барьере и связано с распределением средней пыли ($R = 0,79–0,93$). Как правило, почвы более тяжелого гранулометрического состава характеризуются повышенным содержанием данных элементов [35]. Определенное сходство обнаруживается в поведении Al, K, Ti и Cr, в распределении которых отмечаются два максимума содержаний в нижней части горизонта WPTR (7,3, 3,8, 1,1 г/кг и 33,1 мг/кг соответственно) и в минеральной толще DG (42,0, 12,1, 4,0 г/кг и 68,7 мг/кг, соответственно). Данная группа элементов отрицательно коррелирует с $C_{орг}$ ($R_{Al-C_{орг}} = -0,92$, $R_{K-C_{орг}} = -0,92$, $R_{Ti-C_{орг}} = -0,95$, $R_{Cr-C_{орг}} = -0,93$) и ППП ($R_{Al-ППП} = -0,95$, $R_{K-ППП} = -0,95$, $R_{Ti-ППП} = -0,98$, $R_{Cr-ППП} = -0,89$). Тенденцию к накоплению в нижней части профиля имеют V, Cu и Zn (81,6, 6,6, 41,3 мг/кг соответственно). Слабая подвижность Al, K, Ti, V, Cr, Cu и Zn в кислой глеевой среде определяет их концентрацию в подстилающей породе. Распределение P, Co и As характеризуется наличием максимума концентраций в горизонте TTg,ox,mr (3,1 г/кг, 23,8 и 26 мг/кг соответственно) при общем снижении содержаний вниз по профилю (до 0,8 г/кг, 12,0 и 10,9 мг/кг в горизонте DG соответственно). Необходимо отметить, что данные элементы отрицательно коррелируют с фракцией физической глины ($R < -0,71$). Таким образом, в отношении P, Co и As горизонт TTg,ox,mr проявляет себя как хемосорбционный барьер. Распределение Pb в профиле торфозема имеет бимодальный характер с максимумами содержаний в нижней части горизонта WPTR

(20,9 мг/кг) и органогенном горизонте ТТg,ox,мг (17,1 мг/кг). В профиле перегнойно-глеевой почвы содержания Na, P, Ca и Sr уменьшаются с глубиной: от 8,8, 1,3, 47,2 г/кг и 157 мг/кг в перегнойном горизонте Н до 4,8, 0,2, 4,1 г/кг и 96,2 мг/кг в горизонте СGml,ox соответственно (рис. 4). Статистически значимые ($p < 0,05$) очень высокие положительные корреляции ($R > 0,9$) выявлены между Na и pH, содержаниями Na, Ca, Sr и карбонатами. Кроме того, отмечено концентрирование элементов данной группы в омергеленном морфоне горизонта СGml,ox (на 70–95 см) относительно почвообразующей породы в 1,9–2,8 раза (до 26,3 раза для Ca). Таким образом, в накоплении Na, P, Ca и Sr ведущую роль играют щелочные барьеры, обусловленные изменениями кислотности среды [36–37]. Тенденцию к накоплению в глеевом горизонте Gml,ox имеют Mg, Al, Fe (6,8, 56,5 и 31,8 г/кг соответственно), а также V, Ni, Cu, Zn, As (107, 43,3, 9,7, 47,3 и 17,7 мг/кг соответственно). Необходимо отметить наличие положительных корреляций Mg и Al с обменными катионами и физической глиной ($R > 0,9$) и отрицательных корреляций Fe, Ni, Zn с фракцией мелкого песка ($R < -0,9$). Горизонт Gml,ox представляет собой сорбционно-седиментационный барьер, где интенсивное осаждение данной группы элементов обусловлено адсорбцией тонкими глинистыми частицами [38].

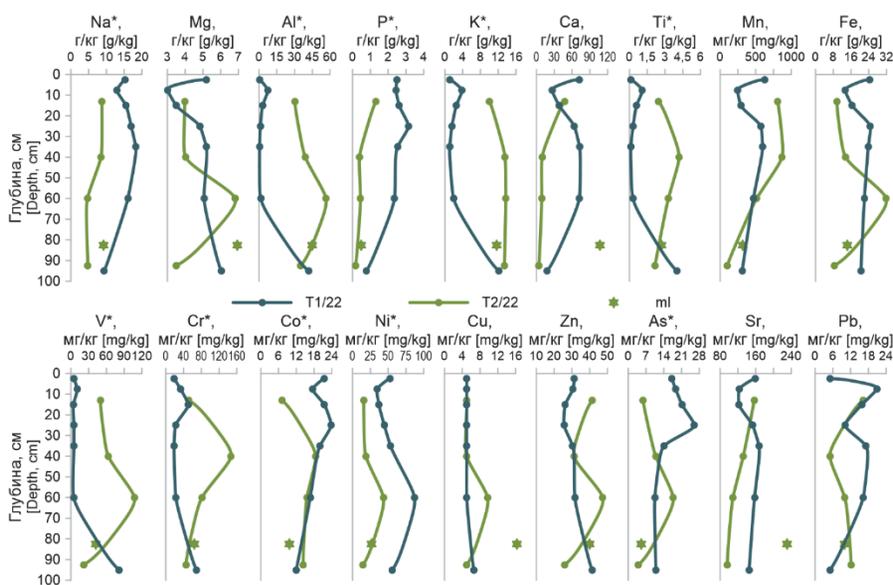


Рис. 4. Профильное распределение макро- и микроэлементов в торфоземе агроминеральном торфяно-окисленно-глеевом (Т1/22) и перегнойно-глеевой омергеленной почве (Т2/22). ml – омергеленный морфон в горизонте СGml,ox. Звездочкой отмечены элементы, содержания которых достоверно отличаются согласно U-критерию Манна–Уитни ($p < 0,05$)

[Fig. 4. Vertical distribution of chemical elements in Sapric Drainic Histosol (T1/22) and Sapric Calcic Histosol (T2/22). ml - marlaceous spot in the CGml,ox horizon. An asterisk indicates elements whose contents are significantly different according to the Mann–Whitney U test ($p < 0.05$)]

Минимальные содержания К и Со отмечены в перегнойном горизонте Н (10 г/кг и 7,2 мг/кг), в минеральной толще их распределение близко к равномерному. В глеевом горизонте Gml,hi,ox, который служит кислородным барьером, отмечены максимальные содержания Ti, Cr и Mn (4,2 г/кг, 149 и 870 мг/кг соответственно), далее вниз по профилю наблюдается снижение их концентраций (до 2,2 г/кг, 45,8 и 99,1 мг/кг в горизонте CGml,ox соответственно). В распределении Pb отмечаются два максимума в перегнойном горизонте Н и в CGml,ox.

С помощью U-критерия Манна–Уитни для изученных типов гидроморфных почв Тарманского болотного массива выявлены статистически значимые различия макро- и микроэлементного состава (см. рис. 4). В торфоземе агроминеральном торфяно-окисленно-глеевом содержания Na, P, Co, Ni и As в среднем выше, чем в перегнойно-глеевой омергеленной почве. В отношении Al, K, Ti, V и Cr отмечена обратная тенденция. Концентрации остальных изученных элементов не показали достоверных отличий. Повышенные содержания Na, P, Co, Ni, As в торфоземе, по всей видимости, обусловлены их более интенсивной биогенной аккумуляцией [35]. В перегнойно-глеевой почве вероятным источником Al, K, Ti, V, Cr выступает минеральная почвообразующая порода. В поверхностных горизонтах изученных гидроморфных почв содержания Mn в 1,3–1,7 раза выше, а Sr сопоставимы по сравнению со среднемировыми концентрациями микроэлементов в почвах [39]. Также в поверхностном горизонте WPTR торфоземов отмечены повышенные относительно глобального фона содержания Co, Ni и As (в 1,8–2,5 раза).

Корреляционный анализ позволил выделить парагенетические ассоциации элементов, характеризующихся тесными положительными взаимосвязями ($R > 0,576$; $p < 0,05$), что указывает на сходный характер их поведения и общее происхождение в гидроморфных почвах Тарманского болотного массива. Структуру связей между элементами иллюстрирует рис. 5. Наиболее высокими положительными парными корреляциями ($R > 0,8$) характеризуются Al, K, Ti, V, Cr. Элементы положительно коррелируют со значениями pH ($R = 0,57–0,6$) и фракцией мелкого песка ($R = 0,57–0,73$) и отрицательно – со значениями $C_{орг}$ ($R < -0,73$), ППП ($R < -0,77$) и среднего песка ($R < -0,61$). Пара Cu–Zn объединена умеренными связями с V и Al ($R = 0,62–0,75$). Отмечены отрицательные корреляции между Cu и $C_{орг}$ ($R = -0,62$), а также положительные корреляции между Cu и обменным Ca^{2+} ($R = 0,62$), Zn и фракцией средней пыли ($R = 0,65$). Следовательно, Al, K, Ti, V, Cr, Cu и Zn формируют единую ассоциацию, поведение которой, вероятно, обусловлено особенностями минеральной матрицы. Как показано выше, накопление элементов данной ассоциации происходит на сорбционных и кислородных барьерах в изученных гидроморфных почвах. Сильные связи характерны для Na, P, Co, As ($R = 0,63–0,89$). Элементы данной группы обнаруживают положительные корреляции с Eh ($R = 0,52–0,71$), $C_{орг}$ ($R = 0,43–0,86$), ППП ($R = 0,45–0,90$) и средним песком ($R = 0,63–0,91$), а также отрицательные корреляции с pH и мелким песком ($R < -0,51$). С Na умеренно связаны ($R = 0,66–0,68$) устойчивые пары подвижных катионогенных литофильных элементов Sr–Ca ($R = 0,93$), которые также положительно коррелируют с

ППП ($R = 0,63-0,78$), и подвижных в глеевой обстановке Fe–Ni ($R = 0,74$), положительно связанных с обменными катионами ($R = 0,5-0,76$), илом ($R = 0,70-0,71$) и физической глиной ($R = 0,62-0,76$). Таким образом, в ассоциацию объединяются Na, P, Ca, Fe, Co, Ni, As и Sr, которые в изученных гидроморфных почвах осушаемого болотного массива осаждаются на биогеохимических, щелочных и хемосорбционных барьерах. Связывает две ассоциации, описанные выше, Mg, который положительно коррелирует с обменными катионами Ca^{2+} и Mg^{2+} и фракцией физической глины ($R > 0,6$).

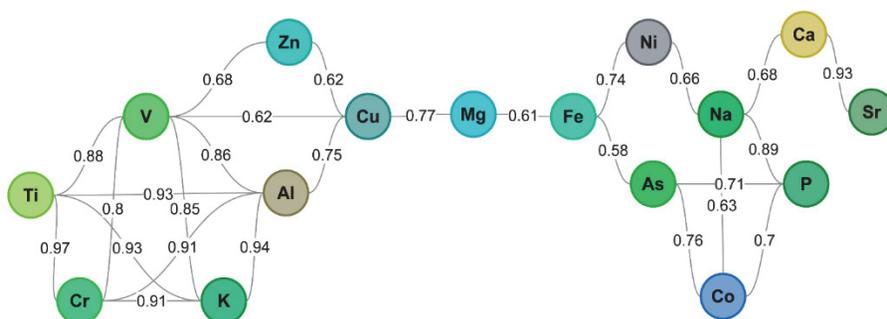


Рис. 5. Корреляционная диаграмма элементов и соединений в гидроморфных почвах Тарманского болотного массива

[Fig. 5. Correlation dendrogram of chemical elements and compounds in hydromorphic soils of the Tarman bog massif]

Таким образом, торфозем и перегнойно-глеевая почва отличаются особенностями внутрипрофильного распределения химических элементов. Отличия обусловлены характером почвообразования, определяющего морфологию почв, и соответственно, условия миграции и накопления элементов. Торфоземы представляют собой почвы, сформированные в результате осушения торфяников, имеющие в профиле агроторфяно-минеральный горизонт, залегающий на органогенной породе [40]. Перегнойно-глеевые почвы занимают пониженные элементы рельефа на периферии болотного массива, и формируются на минеральных породах.

Заключение

По результатам проведенного исследования выявлена высокая контрастность почв гидроморфных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья. Следует отметить, что особенности строения профиля, свойств и геохимической дифференциации сформированы под воздействием конкретных геоморфологических условий, особенностей экосистем, а также характера и интенсивности антропогенного воздействия. Показано, что в пределах мелиорированных участков Тарманского болотного массива одними из распространенных типов почв являются торфоземы агроминеральные. Основной особенностью данных почв является высокая степень трансформации профиля в результате осушительной мелиорации, добычи торфа и его последу-

ющего использования. Антропогенное преобразование торфоземов агроминеральных связано как непосредственно с механическими нарушениями профиля и изъятием значительной части органогенной толщи, а также ее перемешивания с минеральным материалом, так и с отложенными последствиями дренирования и, соответственно, изменения водного режима. В целом наложение особенностей инициальной органогенной почвы и последующих изменений привели к формированию почвы с относительно мало контрастной радиальной геохимической структурой, специфическим набором современных почвообразовательных процессов, что находит отражение в распределении большинства рассматриваемых химических элементов. Качественно иная ситуация отмечается для почв ненарушенных ландшафтов. Так, для перегнойно-глеевой омергеленной почвы характерно наличие хорошо дифференцированного профиля, а также контрастной радиальной геохимической структуры. Особенности макро- и микроморфологического строения и основные физико-химические свойства почв позволяют отметить высокую значимость процессов современного почвообразования в формировании профиля данных почв. Дифференциация вертикального распределения большинства рассматриваемых элементов обусловлена наличием хорошо выраженных биогеохимических, щелочных и хемосорбционных барьеров. Исследованные почвы представляют лишь небольшую часть естественных и антропогенно-измененных вариантов развития гидроморфных ландшафтов Тура-Тавдинского междуречья, отличающегося колоссальным разнообразием и относительно большой площадью. В то же время полученные результаты фиксируют важную тенденцию современной динамики данных систем: для антропогенно-преобразованных почв характерны вынос вещества за пределы профиля и низкая контрастность барьеров, в то время как для инициальных почв наблюдается противоположная тенденция. Данный фактор следует учитывать при планировании геохимических исследований данной территории.

Список источников

1. Болота Западной Сибири – их роль в биосфере. 2-е изд. / под ред. А.А. Земцова. Томск : ТГУ, СибНИИТ, 2000. 72 с.
2. Kirpotin S.N., Berezin A., Bazanov V., Polishchuk Y., Vorobiov S., Mironycheva-Tokoreva N., Kosykh N., Volkova I., Dupre B., Pokrovsky O., Kouraev A., Zakharova E., Shirokova L., Mognard N., Biancamaria S., Viers J., Kolmakova M. Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. Vol. 66. PP. 409–421. doi: 10.1080/00207230902753056
3. Kirpotin S.N., Antoshkina O.A., Berezin A.E., Elshehawi S., Feurdean A., Lapshina E.D., Pokrovsky O.S., Peregon A.M., Semenova N.M., Tanneberger F., Volkov I.V., Volkova I.I., Joosten H. Great Vasyugan Mire: How the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems // *Ambio*. 2021. Vol. 50. PP. 2038–2049. doi: 10.1007/s13280-021-01520-2
4. Ковалева Е., Яковлев А. Экологические функции болотных экосистем (на примере острова Сахалин) // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21, № 12. С. 32–37. doi: 10.18412/1816-0395-2017-12-32-37
5. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Филиппов И.В., Казанцев С.В., Мачида Т., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к

- «стандартной модели» Вc5 // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2010. № 2. С. 43–50.
6. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Влияние факторов среды на эмиссию CO₂ с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. 2012. № 6. С. 658–667.
 7. Raudina T.V., Smirnov S.V., Lushchaeva I.V., Istigechev G.I., Kulizhskiy S.P., Golovatskaya E.A., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Seasonal and spatial variations of dissolved organic matter biodegradation along the aquatic continuum in the southern taiga bog complex, Western Siberia // Water. 2022. Vol. 14, № 23. PP. 3969. doi: 10.3390/w14233969
 8. Шмыглева А.В. Антропогенное воздействие как фактор деградации экосистем Западной Сибири в советский период // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. 2017. № 6 (51). С. 48–54.
 9. Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Малолетко А.А., Магур М.Г., Харанжевская Ю.А. Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 43. С. 196–223. doi: 10.17223/19988591/43/10
 10. Инишева Л.И., Аристархова В.Е., Порохина Е.В., Боровкова А.Ф. Выработанные торфяные месторождения, их характеристика и функционирование. Томск : ТГПУ, 2007. 224 с.
 11. Sinyutkina A.A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // Catena. 2021. Vol. 205. PP. 105464. doi: 10.1016/j.catena.2021.105464
 12. Kharanzhevskaya Yu.A. Seasonal stream water chemistry response to long-term forestry drainage and wildfire: A case study in a part of the Great Vasyugan Mire // Geography, Environment, Sustainability. 2024. Vol. 17, № 1. PP. 44–53. doi: 10.24057/2071-9388-2023-2806
 13. Зайдельман Ф.Р. Деградация мелиорируемых почв России и сопредельных стран в результате антропогенного изменения их водного режима и способы защиты // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2014. № 4. С. 24–30.
 14. Ильясов Д.В., Сиринов А.А., Суворов Г.Г., Метелева М.М., Маслов А.А., Мулдашев А.А., Широких П.С., Бикбаев И.Г., Мартыненко В.Б. Почвы и растительность антропогенно-измененного торфяника в степной зоне (на примере массива Берказан-Камыш, Башкирия) // Агрехимия. 2018. № 12. С. 46–59. doi: 10.1134/S0002188118120062
 15. Казаков А.А. Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 4. С. 161–167.
 16. Моторин А.С. Агрехимические свойства торфяных почв Северного Зауралья и их трансформация // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 6. С. 12–16. doi: 10.32962/0235-2524-2022-6-12-17
 17. Konstantinov A., Novoselov A., Konstantinova E., Loiko S., Kurasova A., Minkina T. Composition and properties of soils developed within the ash disposal areas originated from peat combustion (Tyumen, Russia) // Soil Science Annual. 2020. № 71 (1). PP. 3–14. doi: 10.37501/soilsa/121487
 18. Konstantinov A., Konstantinova E., Novoselov A., Kurasova A., Shuvaev E., Sherstnev A., Zaitseva V., Minkina T. Geochemical status of non-reclaimed ash dumps subjected to long-term self-overgrowing: Evidence from the Tyumen, Russia // Journal of Geochemical Exploration. 2024. Vol. 258. 107387. doi: 10.1016/j.gexplo.2024.107387
 19. Гиберт К.А., Кустьшева И.Н. Совершенствование функционирования мелиорационных систем с целью эффективности водопонижения на территории г. Тюмени // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 4, № 2. С. 18–23. doi: 10.33764/2618-981X-2023-4-2-18-23
 20. Konstantinov A., Konstantinova E., Smirnov P., Minkina T., Batalin G., Gareev B., Mingazov G., Loiko S. Assessment of soil development during rapid urbanization using the

- carbon and nitrogen stable isotope composition // *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. PP. 9123–9134. doi: 10.1007/s10653-023-01580-1
21. Konstantinova E., Novoselov A., Konstantinov A., Minkina T., Sushkova S., Loiko S. Evaluating the effect of historical development on urban soils using microartifacts and geochemical indices // *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. PP. 121–136. doi: 10.1007/s10653-021-01064-0
 22. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. Новосибирск : Наука, 1990. 286 с.
 23. Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // *География и природные ресурсы*. 2006. № 1. С. 63–70.
 24. Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте : учеб. пособие. М. : МАКС Пресс, 2020. 100 с.
 25. Грехова И.В. Ботанический состав и степень разложения низинных торфов в Тюменской области // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология*. 2012. Т. 5, № 2. С. 9–12.
 26. Калужный И.Л. Изменение химического состава болотных вод при мелиорации евтрофного болотного массива // *Труды Инсторфа*. 2022. № 25 (78). С. 3–11.
 27. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 341 с.
 28. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna : International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
 29. Теории и методы физики почв / под ред. Е.В. Шейна, Л.О. Карпачевского. М. : Гриф и Ко, 2007. 616 с.
 30. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
 31. М-049-ПДО/18. Методика измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв и донных отложений рентгенофлуоресцентным методом. СПб. : ООО «НПО «Спектрон», 2018. 18 с.
 32. de Campos F.F., Licht O.A.B. Correlation Diagrams: graphical visualization of geochemical associations using the EzCorrGraph app // *Journal of Geochemical Exploration*. 2021. № 220. 106657. doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106657
 33. Ryabogina N.E., Afonin A.S., Ivanov S.N., Li H.-C., Kalinin P.A., Udaltsov S.N., Nikolaenko S.A. Holocene paleoenvironmental changes reflected in peat and lake sediment records of Western Siberia: Geochemical and plant macrofossil proxies // *Quaternary International*. 2019. Vol. 528. PP. 73–87. doi: 10.1016/j.quaint.2019.04.006
 34. Элементарные почвообразовательные процессы: опыт концептуального анализа, характеристика, систематика / под ред. Н.А. Караваевой, С.В. Зонна. М. : Наука, 1992. 184 с.
 35. Kabata-Pendias A., Szeke B. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. Boca Raton : CRC Press, 2015. 440 p. doi: 10.1201/b18198
 36. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Биогеохимические барьеры для ремедиации почв и очистки почвенно-грунтовых вод // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2016. № 3. С. 3–15.
 37. Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Брехов П.Т. Пространственная неоднородность свойств торфяных почв верховых болот в условиях локального пирогенеза на северо-востоке острова Сахалин // *Почвоведение*. 2016. № 2. С. 261–274. doi: 10.7868/S0032180X16020076
 38. Wang X., Sun Y., Li S., Wang H. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil from the Raoyanghe Wetland, China. *PLoS ONE*. 2019. Vol. 14, № 8. e0220409. doi: 10.1371/journal.pone.0220409
 39. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. 548 p. doi: 10.1201/b10158

40. Korkanç S.Ya., Korkanç M., Amiri A.F. Effects of land use/cover change on heavy metal distribution of soils in wetlands and ecological risk assessment // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 923. 171603. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171603.

References

1. Bolota Zapadnoy Sibiri – ikh rol' v biosfere [Swamps of Western Siberia – Their role in the biosphere]. 2nd ed. Zemtsov AA, editor. Tomsk: Tomsk State University Publ., Siberian Peat Research Institute Publ.; 2000. 72 p. In Russian
2. Kirpotin SN, Berezin A, Bazanov V, Polishchuk Y, Vorobiov S, Mironycheva-Tokoreva N, Kosykh N, Volkova I, Dupre B, Pokrovsky O, Kouraev A, Zakharova E, Shirokova L, Mognard N, Biancamaria S, Viers J, Kolmakova M. Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale. *International Journal of Environmental Studies*. 2009;66:409-421. doi: 10.1080/00207230902753056
3. Kirpotin SN, Antoshkina OA, Berezin AE, Elshehawi S, Feurdean A, Lapshina ED, Pokrovsky OS, Peregon AM, Semenova NM, Tanneberger F, Volkov IV, Volkova II, Joosten H. Great Vasyugan Mire: How the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems. *Ambio*. 2021;50:2038-2049. doi: 10.1007/s13280-021-01520-2
4. Kovaleva E, Yakovlev A. Ecological functions of marsh ecosystems (the case of Sakhalin Island). *Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(12):32-37. doi: 10.18412/1816-0395-2017-12-32-37 In Russian
5. Glagolev MV, Kleptsova IE, Filippov IV, Kazantsev VS, Machida T, Maksyutov ShSh. Methane emissions from subtaiga mires of Western Siberia: concept of the "standard model" BC5. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2010;65(2):86-93. doi: 10.3103/S0147687410020067
6. Golovatskaya EA, Dyukarev EA. The influence of environmental factors on the CO₂ emission from the surface of oligotrophic peat soils in West Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(6):588-597. doi: 10.1134/S106422931206004X
7. Raudina TV, Smirnov SV, Lushchaeva IV, Istigechev GI, Kulizhskiy SP, Golovatskaya EA, Shirokova LS, Pokrovsky OS. Seasonal and spatial variations of dissolved organic matter biodegradation along the aquatic continuum in the southern taiga bog complex, Western Siberia. *Water*. 2022;14(23):3969. doi: 10.3390/w14233969
8. Shmygleva AV. Anthropogenic factor in degradation of ecosystems in Western Siberia in the soviet period. *Vestnik Surgutskogo gosudarstvennogo pedagogičeskogo universiteta – Surgut State Pedagogical University Bulletin*. 2017;6(51):48-54. In Russian, English summary
9. Sinyutkina AA, Gashkova LP, Maloletko AA, Magur MG, Kharanzhevskaya YuA. Transformation of the surface and vegetation cover of drained bogs in Tomsk region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;43:196-223. doi: 10.17223/19988591/43/10 In Russian, English summary
10. Inisheva LI, Aristarkhova VE, Porokhina EV, Borovkova AF. Cutaway peat deposits, their characteristics and functioning. Tomsk: Tomsk State Pedagogical University Publ.; 2007. 224 p. In Russian
11. Sinyutkina AA. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*. 2021;205:105464. doi: 10.1016/j.catena.2021.105464
12. Kharanzhevskaya YuA. Seasonal stream water chemistry response to long-term forestry drainage and wildfire: A case study in a part of the Great Vasyugan Mire. *Geography, Environment, Sustainability*. 2024;17(1):44-53. doi: 10.24057/2071-9388-2023-2806
13. Zaidelman FR. Degradatsiya melioriruemykh pochv Rossii i sopredel'nykh stran v rezul'tate antropogennogo izmeneniya ikh vodnogo rezhima i sposoby zashchity [Degradation of reclaimed soils in Russia and neighboring countries as a result of anthropogenic changes in

- their water regime and methods of protection]. *Use and Protection of Natural Resources of Russia*. 2014;4:24-30. In Russian
14. Ilyasov DV, Sirin AA, Suvorov GG, Meteleva MM, Maslov AA, Muldashev AA, Shirokih PS, Bikbaev IG, Martynenko VB. Soils and vegetation of anthropogenic changed steppe peatland (Berkazan-Kamysh, Bashkiriya). *Agrohimia*. 2018;12:46-59. doi: 10.1134/S0002188118120062. In Russian, English summary
 15. Kazakov AA. Remote geothermal sensing of Western Siberia bogs (the case of Tarmany marsh massif). *Tyumen State University Herald*. 2013;4:128-132.
 16. Motorin AS. Agrochemical properties of peat soils in the northern trans-ural region and their transformation. *Melioratsiya I Vodnoe Khozyaystvo*. 2022;6:12-16. doi: 10.32962/0235-2524-2022-6-12-17. In Russian, English summary
 17. Konstantinov A, Novoselov A, Konstantinova E, Loiko S, Kurasova A, Minkina T. Composition and properties of soils developed within the ash disposal areas originated from peat combustion (Tyumen, Russia). *Soil Science Annual*. 2020;71(1):3-14. doi: 10.37501/soilsa/121487
 18. Konstantinov A, Konstantinova E, Novoselov A, Kurasova A, Shuvaev E, Sherstnev A, Zaitseva V, Minkina T. Geochemical status of non-reclaimed ash dumps subjected to long-term self-overgrowing: Evidence from the Tyumen, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*. 2024;258:107387. doi: 10.1016/j.gexplo.2024.107387
 19. Giber KA, Kustysheva IN. Improving the functioning of melioration systems for the purpose of the effectiveness of dewatering in the territory of the city of Tyumen. *Interexpo GEO-Siberia*. 2023;4(2):18-23. doi: 10.33764/2618-981X-2023-4-2-18-23 In Russian, English summary
 20. Konstantinov A, Konstantinova E, Smirnov P, Minkina T, Batalin G, Gareev B, Mingazov G, Loiko S. Assessment of soil development during rapid urbanization using the carbon and nitrogen stable isotope composition. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;45:9123-9134. doi: 10.1007/s10653-023-01580-1
 21. Konstantinova E, Novoselov A, Konstantinov A, Minkina T, Sushkova S, Loiko S. Evaluating the effect of historical development on urban soils using microartifacts and geochemical indices. *Environmental Geochemistry and Health* 2023;45:121-136. doi: 10.1007/s10653-021-01064-0
 22. Karetin LN. Pochvy Tyumenskoy oblasti [Soils of the Tyumen region]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1990. 286 p. In Russian
 23. Moskovchenko DV. Biogeochemical properties of the high bogs in Western Siberia. *Geografya I Prirodnye Resursy*. 2006;1:63-70. In Russian, English summary
 24. Urusevskaya IS, Alyabina IO, Shoba SA. Karta pochvenno-ekologicheskogo rayonirovaniya Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:8 000 000. Poyasnitel'nyy tekst i legenda k karte: Uchebnoe posobie. [Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:8,000,000. Explanatory text and legend for the map: Textbook]. Moscow: MAX Press; 2020. 100 p. In Russian
 25. Grehova IV. Botanical structure and decomposition degree of peats in the Tyumen Region. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Ekologiya – Bulletin of Irkutsk State University. Biology. Ecology*. 2012;5(2):9-12. In Russian, English summary
 26. Kalyuzhny IL. Changes in chemical composition of a peat water under melioration of a eutrophic mire. *Trudy Instorfa*. 2022;25:3-11. In Russian
 27. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena; 2004; 341 p. In Russian
 28. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna:International Union of Soil Sciences (IUSS); 2022. 234 p.
 29. Teorii i metody fiziki pochv [Theories and methods of soil physics]. Shein EV, Karpachevsky LO, editors. Moscow: Grif i Ko Publ., 2007. 616 p. In Russian
 30. Theory and practice of chemical analysis of soils. Vorobyova LA, editor. Moscow: GEOS Publ.; 2006. 400 p. In Russian

31. M-049-PDO/18. Metodika izmereniy massovoy doli metallov i oksidov metallov v poroshkovykh probakh pochv i donnykh otlozheniy rentgenofluorestantsnym metodom [Methodology for measuring the mass fraction of metals and metal oxides in powder samples of soils and bottom sediments using the X-ray fluorescence method]. St. Petersburg: NPO Spektron Publ.; 2018. 18 p. In Russian
32. de Campos FF, Licht OAB. Correlation Diagrams: graphical visualization of geochemical associations using the EzCorrGraph app. *Journal of Geochemical Exploration*. 2021;220:106657. doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106657
33. Ryabogina NE, Afonin AS, Ivanov SN, Li HC, Kalinin PA, Udaltsov SN, Nikolaenko SA. Holocene paleoenvironmental changes reflected in peat and lake sediment records of Western Siberia: Geochemical and plant macrofossil proxies. *Quaternary International*. 2019;528:73-87. doi: 10.1016/j.quaint.2019.04.006
34. Elementary soil-forming processes: an experience of conceptual analysis, characteristics, taxonomy. Karavaeva NV, Zonn SV, editors. Moscow: Nauka, 1992. 184 p. In Russian
35. Kabata-Pendias A, Szeke B. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. Boca Raton: CRC Press; 2015. 440 p. doi: 10.1201/b18198.
36. Vodyanitskii YN, Shoba SA. Biogeochemical barriers for soil and groundwater bioremediation. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2016;71:89-100. doi: 10.3103/S014768741603008X
37. Lipatov DN, Shcheglov AI, Manakhov DV, Brekhov PT. Spatial heterogeneity in the properties of high-moor peat soils under local pyrogenesis in Northeastern Sakhalin. *Eurasian Soil Science*. 2016;49:238-250. doi: 10.1134/S1064229316020071
38. Wang X, Sun Y, Li S, Wang H. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil from the Raoyanghe Wetland, China. *PLoS ONE*. 2019;14(8):e0220409. doi: 10.1371/journal.pone.0220409
39. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2011. 548 p. doi: 10.1201/b10158
40. Korkanç SYa, Korkanç M, Amiri AF. Effects of land use/cover change on heavy metal distribution of soils in wetlands and ecological risk assessment. *Science of The Total Environment*. 2024;923:171603. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171603.

Информация об авторах:

Константинов Александр Олегович, м.н.с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

Константинова Елизавета Юрьевна, канд. геогр. наук, с.н.с. фронтальной лаборатории «Биоинженерия ризосферы» Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9836-8721>

E-mail: konstantliza@gmail.com

Новоселов Андрей Андреевич, канд. геол.-минер. наук, доцент кафедры физической географии и экологии Тюменского государственного университета (Тюмень, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8589-2316>

E-mail: mr.andreygeo@mail.ru

Зайцева Варвара Юрьевна, магистрант кафедры географии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9387-6358>

varvara.zaitseva.geo@gmail.com

Курасова Алина Олеговна, м.н.с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>

E-mail: kurasovalina@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Alexandr O. Konstantinov, Junior Researcher, BIO-GEO-CLIM Laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6950-2207>

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

Elizaveta Yu. Konstantinova, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Frontline laboratory "Bioengineering of the rhizosphere", Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9836-8721>

E-mail: konstantliza@gmail.com

Andrey A. Novoselov, Cand. Sci. (Geol.), assistant professor, Department of Physical Geography and Ecology, University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8589-2316>

E-mail: mr.andreygeo@mail.ru

Varvara Yu. Zaitseva, Student, Department of Geography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9387-6358>

E-mail: varvara.zaitseva.geo@gmail.com

Alina O. Kurasova, Junior Researcher, BIO-GEO-CLIM Laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4479-3789>

E-mail: kurasovalina@gmail.com

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 13.04.2024;
одобрена после рецензирования 13.09.2024; принята к публикации 28.12.2024.*

*The article was submitted 13.04.2024;
approved after reviewing 13.09.2024; accepted for publication 28.12.2024.*