

Мониторинг окружающей среды

УДК 550.844+546.791.027+632.126
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.2.36>

Разработка Листвянского, Бугульдейского и Ольхон-Приольхонского мониторинговых полигонов на Байкале: обзорное изучение микроэлементов и изотопов U в речных и подземных водах

Е.П. Чебыкин^{1,2}, С.В. Рассказов^{1,3}, А.М. Ильясова¹,
С.В. Снопков^{3,4}, С.Н. Коваленко³

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

⁴Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся результаты обзорных исследований микроэлементов и отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($OA4/8$) в подземных и поверхностных водах Листвянского, Бугульдейского и Ольхон-Приольхонского полигонов комплексного мониторинга, организованного с 2020 г. На Листвянском полигоне получен широкий интервал значений $OA4/8$ от 1.67 до 2.5 в зоне Обручевского разлома в районе пос. Б. Коты, на Бугульдейском и Ольхон-Приольхонском полигонах – интервал значений $OA4/8$ от 1.25 до 2.70 в зоне Приморского разлома. Эти значения характеризуют общий деформационный режим в крупных активных разломах центральной части Байкальской рифтовой зоны. Вода р. Бугульдейка отличается по микроэлементному составу и значениям $OA4/8$ от воды ее притока Куртун в связи с расположением бассейнов этих рек в породах обнаженного фундамента Сибирской платформы и ее осадочного чехла, включающего эвапоритовые карбонатные отложения. На о-ве Ольхон определена подземная вода, отличающаяся по элементному составу от глубинной байкальской воды.

Ключевые слова: подземные воды, поверхностные воды, мониторинг, землетрясения, Байкал.

Development of the Listvyanka, Buguldeyka, and Olkhon-Priolkhonye monitoring polygons on the Baikal: prospecting study of trace elements and U isotopes in waters from rivers and groundwaters

E.P. Chebykin^{1,2}, S.V. Rasskazov^{1,3}, A.M. Ilyasova¹,
S.V. Snopkov^{3,4}, S.N. Kovalenko³

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

²Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

⁴Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The results of prospecting studies of trace elements and activity ratio $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($AR4/8$) in surface waters and groundwaters from the Listvyanka, Buguldeyka, and Olkhon-Priolkhonye polygons of integrated monitoring, organized since 2020, are presented. At the Listvyanka polygon, wide interval of $AR4/8$ from 1.67 to 2.5 is obtained for groundwater in the Bolshie Koty village, at the Buguldeyka and Olkhon-Priolkhonye polygons that are located in the zone of the Primorsky fault – an interval of $AR4/8$ from 1.25 to 2.70. These values is general characteristic of large active faults of the central Baikal Rift Zone. Water from the Buguldeyka River differs in terms of both trace element compositions and $AR4/8$ values from those of its tributary Kurtun due to location of these rivers basins in rocks of the exposed basement of the Siberian Platform and its sedimentary cover, including evaporate carbonate sediments. On the Olkhon island, determined is groundwater that differs in elemental composition from the deep Baikal water.

Keywords: groundwater, surface water, monitoring, earthquakes, Baikal.

Введение

В центральной части Байкальской рифтовой системы с 2020 г. организуется комплексный мониторинг опасных геологических процессов. Пилотная сеть состоит из трех пунктов – «Бугульдейка», «Приольхонье» и «Листвянка», – каждый из которых оснащен современным высокоточным цифровым оборудованием, включающим в себя широкополосную сейсмическую станцию, приемник GPS, деформометры, датчик эманий почвенного радона, станцию наблюдений за электромагнитным полем Земли. Осуществляется сбор количественной информации о деформациях горных пород, современных движениях, вариациях геофизических полей для решения теоретических и прикладных вопросов геодинамики и сейсмологии, в том числе для разработки способов прогноза землетрясений. В окрестностях пунктов проводятся наблюдения за характером проявления некоторых экзогенных процессов (Семинский и др., 2022).

Одно из направлений исследований – гидрогеохимический мониторинг подземных и поверхностных вод. В 2012–2015 гг. авторами разрабатывался Култукский мониторинговый полигон для сеймопрогностических целей. В обзорное опробование было вовлечено более 40 станций подземных и поверхностных вод (Рассказов и др., 2015). К настоящему времени количество станций на Култукском полигоне приближается к 50-ти (Ильясова, Снопков, 2023). Параллельно проводилось опробование природных вод на других территориях Прибайкалья.

В период организации и проведения мониторинга в центральной части Байкальской рифтовой системы произошли сильные и умеренные землетрясения. Цель настоящей работы – провести анализ данных, полученных при обзорном изучении природных вод на Листвянском, Бугульдейском и Ольхон-Приольхонском полигонах (рис. 1) в связи выполнением задач по новому проекту организации комплексного мониторинга опасных геологических процессов на Байкальской природной территории.



Рис. 1. Схема распределения сильных и умеренных землетрясений Байкало-Хубсугульской сейсмической области в 2014–2022 гг. Афтершоки не показаны. Землетрясения 2014–2015 гг.: X – Северо-Хубсугульское, Гл – Голоустное. Землетрясения 2020–2021 гг.: Кр – умеренное Кыренское в Тункин-



Рис. 2. Карта опробования водопунктов в п. Листвянка (верхняя панель) и космоснимок с указанием мест отбора проб в п. Большие Коты (нижняя панель). Желтые символы – вода из рек, сиреневые – из родников, красные – из скважин.

Fig. 2. Map of water sampling sites in Listvyanka settlement (upper panel) and satellite image with sampling sites in Bolshiye Koty settlement (lower panel). Yellow symbols – water from rivers, lilac – from springs, red – from wells.

По элементному составу эти два типа вод п. Большие Коты сильно различаются (рис. 3). Усредненный элементный состав родников практически идентичен усредненному составу вод р. Б. Коты, т. е. родники являются естественными выходами подруслового стока. Заметное обогащение родниковой воды относительно речной Zn (в 3 раза) и Cl (в 2 раза) определяется вкладом родника ВК9, расположенного вблизи устья р. Б. Коты. Возможно, что повышенная концентрация этих элементов в роднике является индикатором

антропогенного влияния (застройка русла домами частного сектора) или же обусловлена подтоком более глубоких вод, обогащенных Cl и Zn, однако последнее утверждение компрометируют данные по U и W (см. ниже). Повышение концентраций Mn и Fe, а также небольшое повышение концентраций других элементов в родниковых водах, вероятно, возникает в результате более интенсивного взаимодействия «вода-порода», «вода-почва» (экстракция, вынос

тонкодисперсных коллоидов) при инфильтрации речных вод.

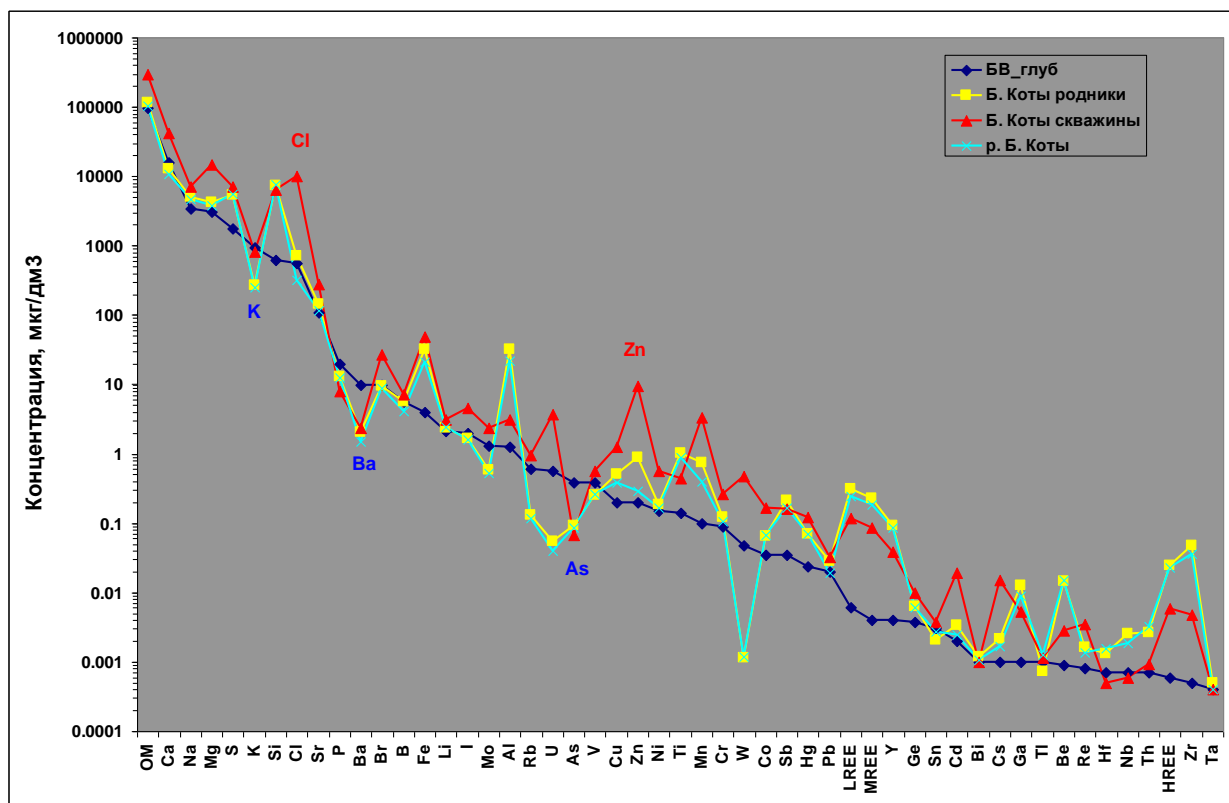


Рис. 3. Средняя концентрация химических элементов в родниках и скважинах пос. Б. Коты и в реке Б. Коты (выше поселка и в устье) в сопоставлении с глубиной водой оз. Байкал. Синим шрифтом отмечены элементы, концентрации которых во всех пробах понижены относительно глубоководной байкальской воды, красным – элементы вероятного антропогенного загрязнения родниковых вод в устьевой части р. Б. Коты.

Fig. 3. The average concentration of chemical elements in waters from springs and wells of the Bolshie Koty village and in those from the the Bolshie Koty River (in its upper current and at the mouth) in comparison with the deep water from Lake Baikal. Element concentrations in all samples that are lower than in the deep Baikal water are marked in blue; those of probable anthropogenic pollution of spring waters in the mouth of the Bolshie Koty River – by red.

Общая минерализация родников 110–120, а рек 100–120 мг/дм³ (р. Б. Коты и р. М. Коты) по элементному составу практически идентичны. Подземная вода, вскрытая скважинами на глубину несколько десятков метров, более минерализована (240–340 мг/дм³) и обогащена относительно родниковой воды примерно половиной химических элементов. Небольшие степени обогащения (до 2 раз по усредненным данным) характерны для Pb, Ba, B, S, Li, Na, Fe, Ti, Ge, Hg, Sn и Sr. Другими элементами скважинная вода обогащена в большей степени: Re, Cr, V, Cu, Co, I, Br, K, Ni, Ca, Mg, Mo и Mn – в 2–5 раз, Cd, Cs, Rb – в 5–7 раз, Zn – в 11 раз, Cl – в 14 раз, U – в 68 раз и W – в 413 раз. В последних

двух случаях высокая степень обогащения обусловлена не столько высокими концентрациями U и W в скважинной воде, сколько их низкими концентрациями в родниковой воде (U ~ 0,06, W ~ 0,001 мг/ дм³), которая на порядок ниже (в 10 и 40 раз, соответственно) даже по сравнению с глубоководной водой оз. Байкал. Родниковая вода обогащена относительно скважинной Si, Bi, Ta, Sb, As и P – до 2 раз, Ti, Ga, Y, REE, Hf, Th, Nb и Be – в 2–5 раз, Zr и Al – в 10 раз.

Подземная вода п. Б. Коты (как родниковая, так и скважинная) обогащена относительно глубоководной байкальской воды (БВ_глуб) большинством химических элементов. Их число и степень обогащения,

очевидно, разные для родниковой и скважинной воды. Общими чертами для этих вод (для всех исследованных образцов) являются пониженные (относительно БВ_глуб) концентрации К, Ва, и As и повышенные концентрации Be, Na, Mg, Al, Si, S, Ti, Mn, Fe, Co, Zn, Ga, Sr, Y, Cs и REE.

В береговой зоне пос. Б. Коты выявляется резкое различие компонентного состава родниковых и скважинных вод зоны Обручевского разлома (рис. 4). В тех и других участвует компонент глубинного резервуара Южного Байкала. В родниковой воде Б. Котовской и М. Котовской речных долин озерный компонент ЮБР обедняется ураном в восстановленной среде с переходом в компонент ВКБВ. Компонент смешения с ВКБВ отличается повышенным $OA4/8$ (до 2.5),

обусловленным деформационным эффектом, и повышенной концентрацией U, свидетельствующей о вскрытии трещинами окисленных пород. В отличие от родников, скважины на западном борту Б. Котовской долины вскрыли байкальскую воду в застойной окисленной среде со смешением компонентов, подобным крутому тренду подземных вод Листвянской зоны (Рассказов и др., 2020). В скважине ВК-6 (глубина 24 м) для воды получено значение $OA4/8 = 1.96$, соответствующее компоненту ЮБР, в скважине ВК-7 (глубина 45 м) – пониженное значение $OA4/8$ (1.67). Концентрации U (соответственно, 2.5 и 3.5 мкг/дм³) почти на порядок превысили содержание в глубинной байкальской воде.

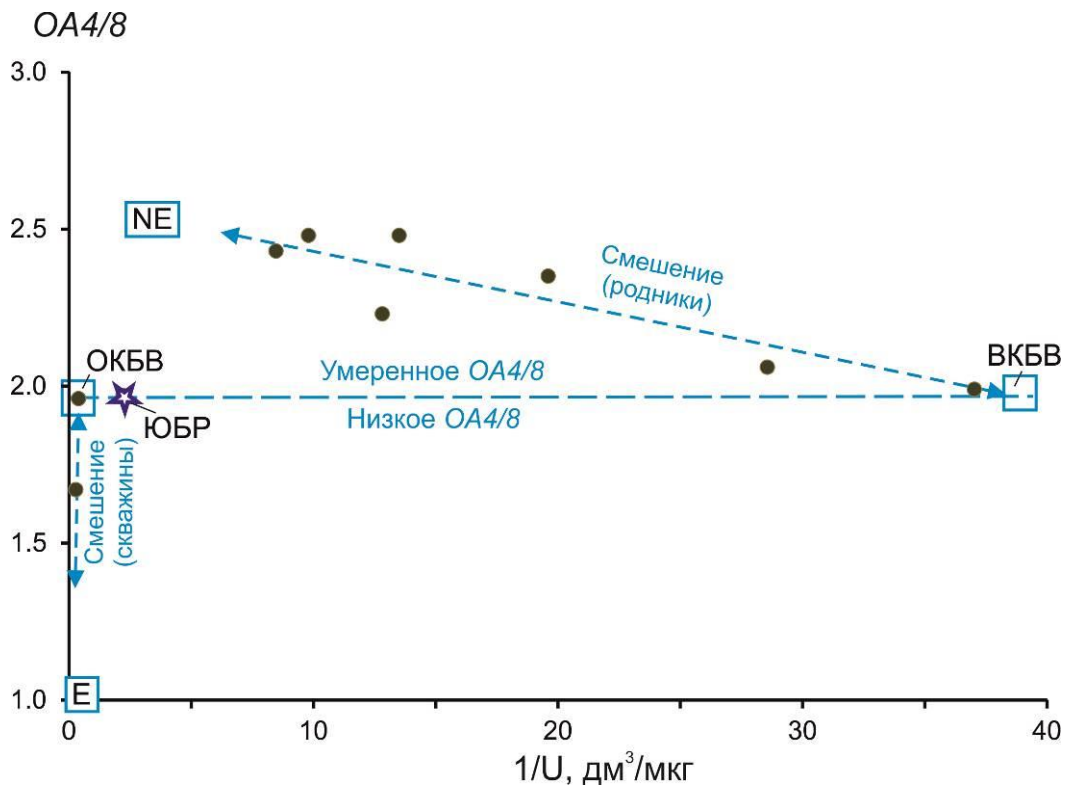


Рис. 4. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ подземных вод Большекотовской гидрогеохимической зоны Листвянского полигона. Компоненты: E, NE – соответственно, равновесного и неравновесного урана (с высокой концентрацией U). ОКБВ – окисленный компонент байкальской воды (с высокой концентрацией U). ВКБВ – восстановленный компонент байкальской воды (с низкой концентрацией U). ЮБР – Южно-Байкальский резервуар (Рассказов и др., 2020).

Fig. 4. Diagram $OA4/8$ vs $1/U$ of groundwaters from the Bolshie Koty hydrogeochemical zone of the Listvyanka polygon. Components: E, NE – equilibrated and non-equilibrated, respectively (with high U concentration); ОКБВ – oxidized component of Baikal water (with high U concentration). ВКБВ – reduced component of Baikal water (with low U concentration). ЮБР – South Baikal Reservoir (Rasskazov et al., 2020).

Бугульдейский полигон

На Бугульдейском полигоне опробовано 7 родников и скважин на территории от Бугульдейки до Еланцов (рис. 5).

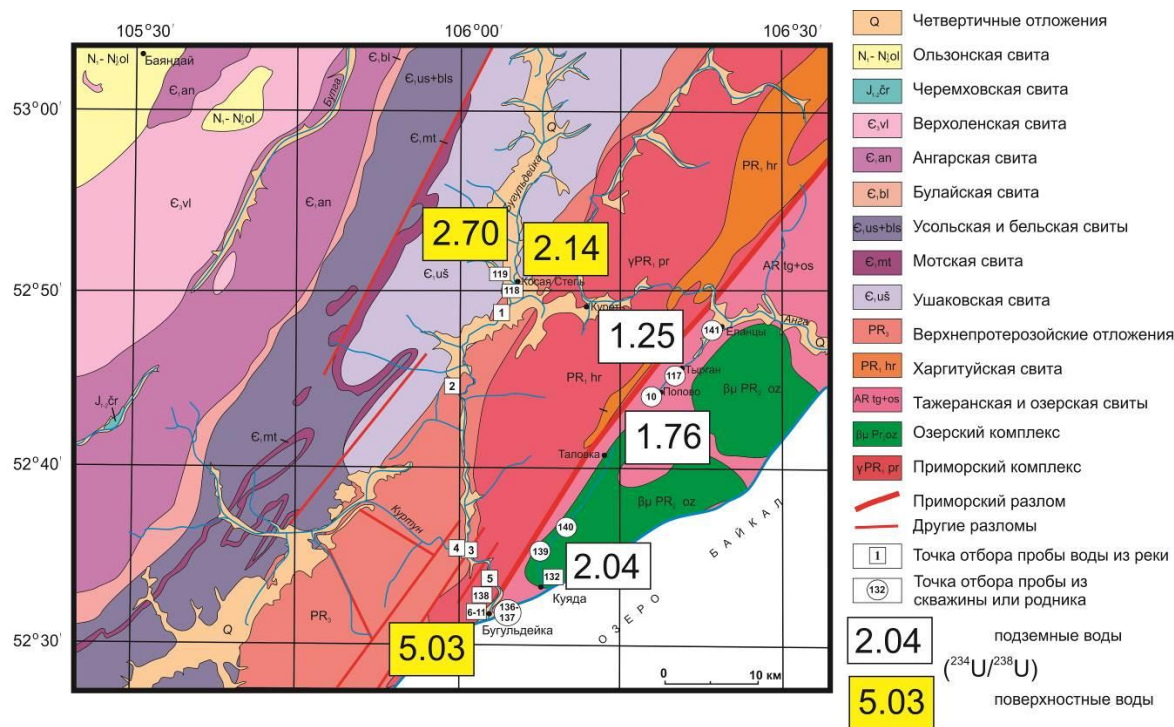


Рис. 5. Схема опробования и результаты измерений *ОА4/8* подземных и поверхностных вод в районе Бугульдейки. Использована основа Государственной геологической карты м-ба 1:200000. На геологической карте показаны осадочные стратоны: четвертичный (пески, галечники, глины), ользонская свита миоцена–нижнего плиоцена (глины, алевриты, пески, ракушняковые известняки), черемховская свита нижней-средней юры (песчаники, алевролиты, аргиллиты, пласты угля), верхоленская свита верхнего кембрия (песчаники, алевролиты с известняковыми и доломитовыми прослоями, содержащими гипс), ангарская свита нижнего кембрия (окремненные доломиты и известняки), булайская свита нижнего кембрия (доломиты), усольская и бельская свиты нижнего кембрия (доломиты, известняки с прослоями соли), мотская свита нижнего кембрия (пестроцветные песчаники, алевролиты и карбонатные породы), ушаковская свита нижнего кембрия (граувакковые песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты и глинистые сланцы), неопротерозойские (?) отложения (сланцы, песчаники, известняки), харгитуйская свита палеопротерозоя (филлитовидные, кварцево-серицитовые и гранатовые сланцы), тажеранская и озерская свиты архея (гнейсы, кристаллические известняки, кварциты). Интрузивные комплексы: озерский среднего протерозоя (габбро-диабазы) и приморский палеопротерозоя (граниты).

Fig. 5. Sampling scheme and results of *AR4/8* measurements in groundwaters and surface waters from the Buguldeyka area. The state geological map of scale 1:200000 is used. The geological map shows sedimentary strata: Quaternary (sands, pebbles, clays), Miocene-Lower Pliocene Olzon Formation (clays, silts, sands, shell limestones), Lower-Middle Jurassic Cheremkhovo Formation (sandstones, siltstones, mudstones, coal seams), Upper Cambrian Upper Lena Formation (sandstones, siltstones with intercalations of limestones and dolomites with gypsum), Lower Cambrian Angara Formation (silicified dolomites and limestones), Lower Cambrian Bulai Formation (dolomites), Lower Cambrian Usol'e and Belaya Formations (dolomites, limestones with salt interlayers), Lower Cambrian Moty Formation (variegated sandstones, siltstones, and carbonate rocks), Lower Cambrian Ushakovka Formation (greywacke sandstones, gravelstones, conglomerates, siltstones and shales), Upper Proterozoic (?) sediments (shales, sandstones, limestones), Paleoproterozoic Khargitui Formation (phyllite-like, quartz-sericite and garnet schists), Archean Tazheran and Ozersky Formations (gneisses, crystalline limestones, quartzites). Intrusive complex: Middle Proterozoic Ozersk (gabbro-diorite), Paleoproterozoic Primorsky (granites).

С целью изучения гидроизотопного профиля западного побережья Байкала выполнено опробование воды из бассейна р. Бугульдейка (рис. 6, 7). Для сравнения отобрана вода из р. Таловка.

Бугульдейка – одна из наиболее крупных рек, впадающих в Байкал на западном побережье. Ее водосборный бассейн находится на Приморском хребте. Длина р. Бугульдей-

ка составляет 78 км, устье реки находится напротив дельты р. Селенга противоположного берега Байкала. Основной приток р. Бугульдейка (правый) – р. Куртун.

Образцы воды отбирались 30 июня 2015 г. вдоль основного русла реки со среднего течения (47 км от устья) до ее впадения в оз. Байкал. Отобрана вода также из р. Куртун в 540 м выше слияния с р. Бугульдейка.

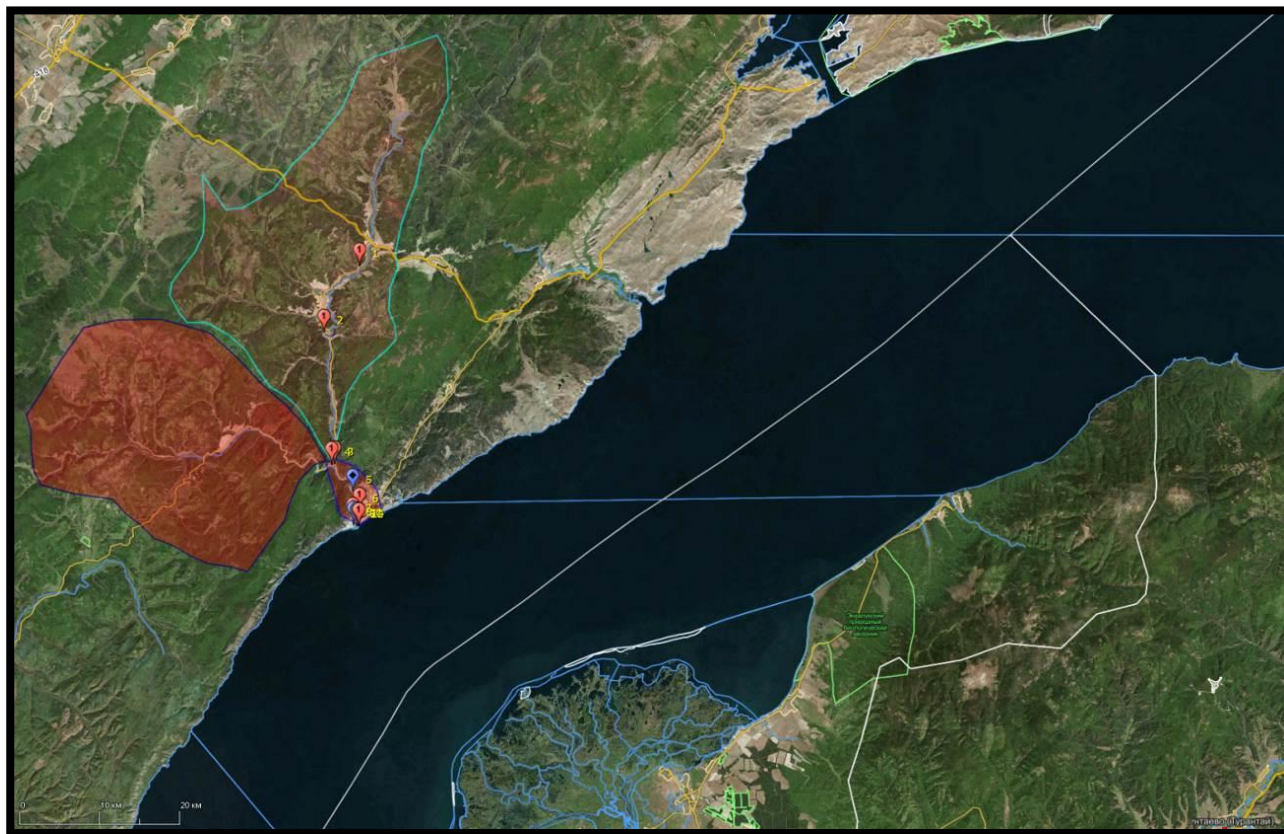


Рис. 6. Местоположение точек отбора проб воды в бассейне р. Бугульдейка и ее правого притока р. Куртун на космоснимке. Выделены бассейны обеих рек.

Fig. 6. Location of water sampling sites in the basin of the Buguldeyka River and its right tributary Kurtun in the satellite image. The basins of both rivers are outlined.

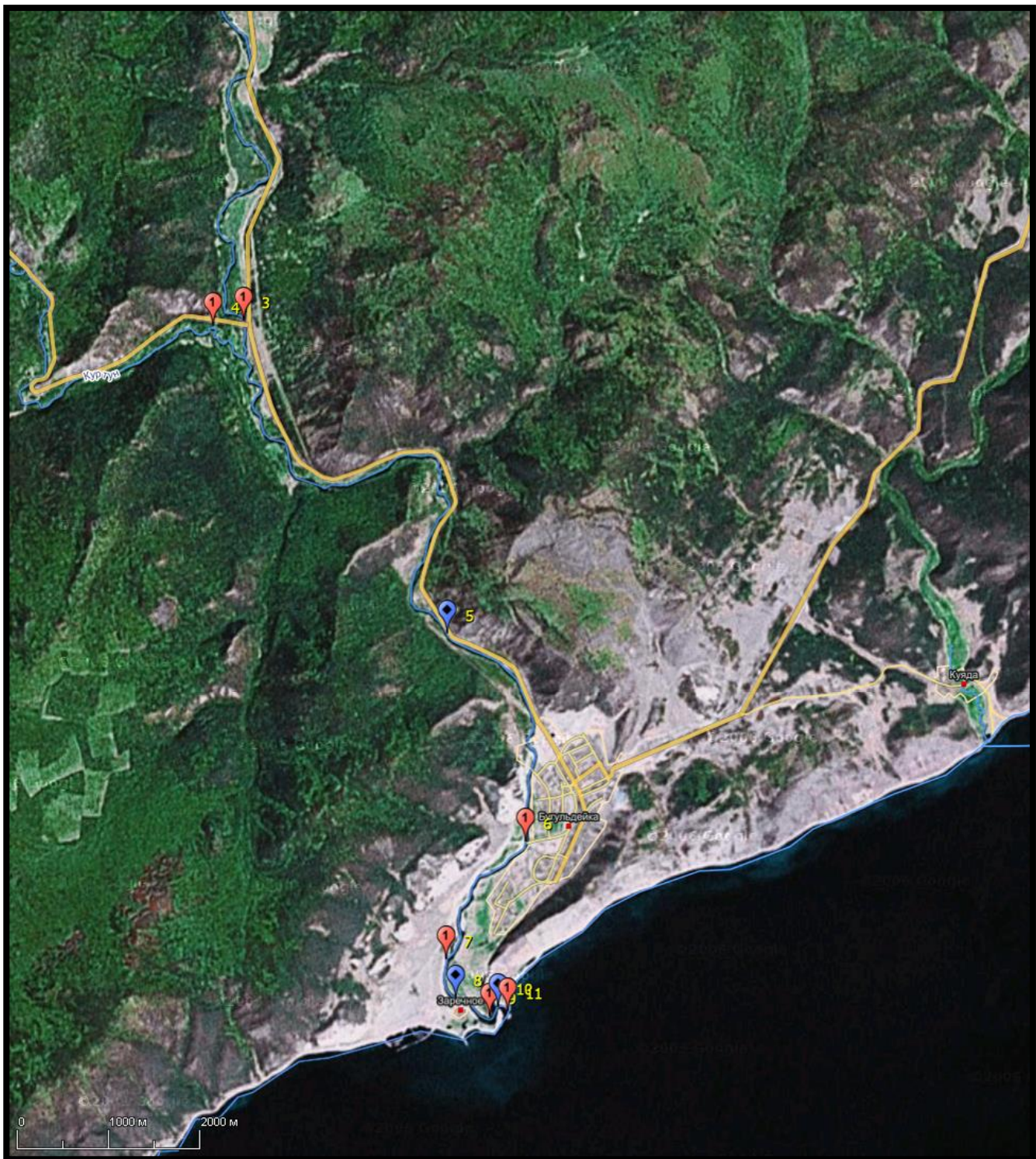


Рис. 7. Местоположение точек отбора проб воды из р. Бугульдейка от слияния с р. Куртун до устья.

Fig. 7. Location of water sampling sites along the Buguldeyka River from its tributary Kurtun to the mouth.

В Приморском разломе района Бугульдейки получен интервал $OA4/8$ подземных вод 1.25–2.04. В верхнем течении р. Бугульдейка отношение $OA4/8$ выше (2.7), а в устье

этой реки вода характеризуется аномально высоким значением $OA4/8 = 5.03$ (рис. 5). По аналогии с профилем Иркутск–Байкал (Расказов и др., 2020), мы связываем значение

$OA4/8 = 2.7$ и его аномальную характеристику (5.03) с проявлением минерализации в карбонатных отложениях осадочного чехла Сибирской платформы.

Причины высокого отношения активностей изотопов урана будут обсуждаться при рассмотрении конкретных данных, когда будут выполнены измерения изотопных отношений урана всех проб бассейна р. Бугульдейка. Предварительные выводы можно сделать на основе уже имеющихся результатов элементного анализа проб воды.

Профили изменения концентраций элементов в воде по руслу р. Бугульдейка, а также в воде р. Куртун показаны на рис. 8. В рассмотрение взяты только те элементы, которые были надежно определены методом ИСП-МС. Нам в, частности, не удалось надежно измерить Cu и Zn из-за контаминации прибора, а другие элементы из-за их очень низкого содержания в пробах и /или повышенных пределов обнаружения. Профили P , Ge , Sb не показаны. Частичная минерализация Min^* представлена суммой основных элементов, вносящих основной вклад в минерализацию – металлов (Na , Mg , K , Ca) и неметаллов (Si , S , Cl). Для расчета полной минерализации не хватает данных по содержанию гидрокарбонатных ионов, которые в данной работе не определялись. Частичная сумма редкоземельных элементов REE представлена первыми четырьмя лантанидами (La , Ce , Pr , Nd), концентрации которых определяются надежно.

Элементные профили были кластеризованы методом Варда с помощью программного

обеспечения Statistica 8 и на рис. 8 структурированы так, чтобы выявить основные закономерности. Участки реки, на которых происходит увеличение концентрации элементов, отмечены прямоугольниками розового цвета, уменьшение концентрации – прямоугольниками голубого цвета.

Из рис. 8 следует, что соотношение элементов на разных участках реки меняется. На первом 16-км участке (43–31 км от устья) происходит увеличение частичной минерализации и концентрации основных элементов, вносящих в нее вклад (Na , Mg , K , Ca , S , Cl), за исключением Si . Концентрации Li , Ba , Sr , Br , B , U и Mo на первом участке также возрастают, W , Y , REE, Al , Si , I , Zr , Be , As , Mn , Fe падают, а Co , Rb , Ni и V практически не меняются. Наибольшее увеличение концентраций (на 40–47 %) характерно для Li , Mg , S , Ca , Ba , а падение (на 71–87 %) для REE, Mn и Fe . Высокие степени падения концентраций (~50%) также характерны для W , Y , Zr и Be .

Значительное падение концентраций Mn и Fe указывает на изменение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) среды. Возможно, что воды верхнего участка реки содержат большее количество органического вещества, что сдвигает Eh среды в восстановительную сторону, в которой Mn и Fe более подвижны, и могут быть мобилизованы в раствор из твердой фазы (горные породы, почвы, речные отложения, взвешенное вещество) (Bjorkvald et al., 2008; Pokrovsky et al., 2005, 2006).

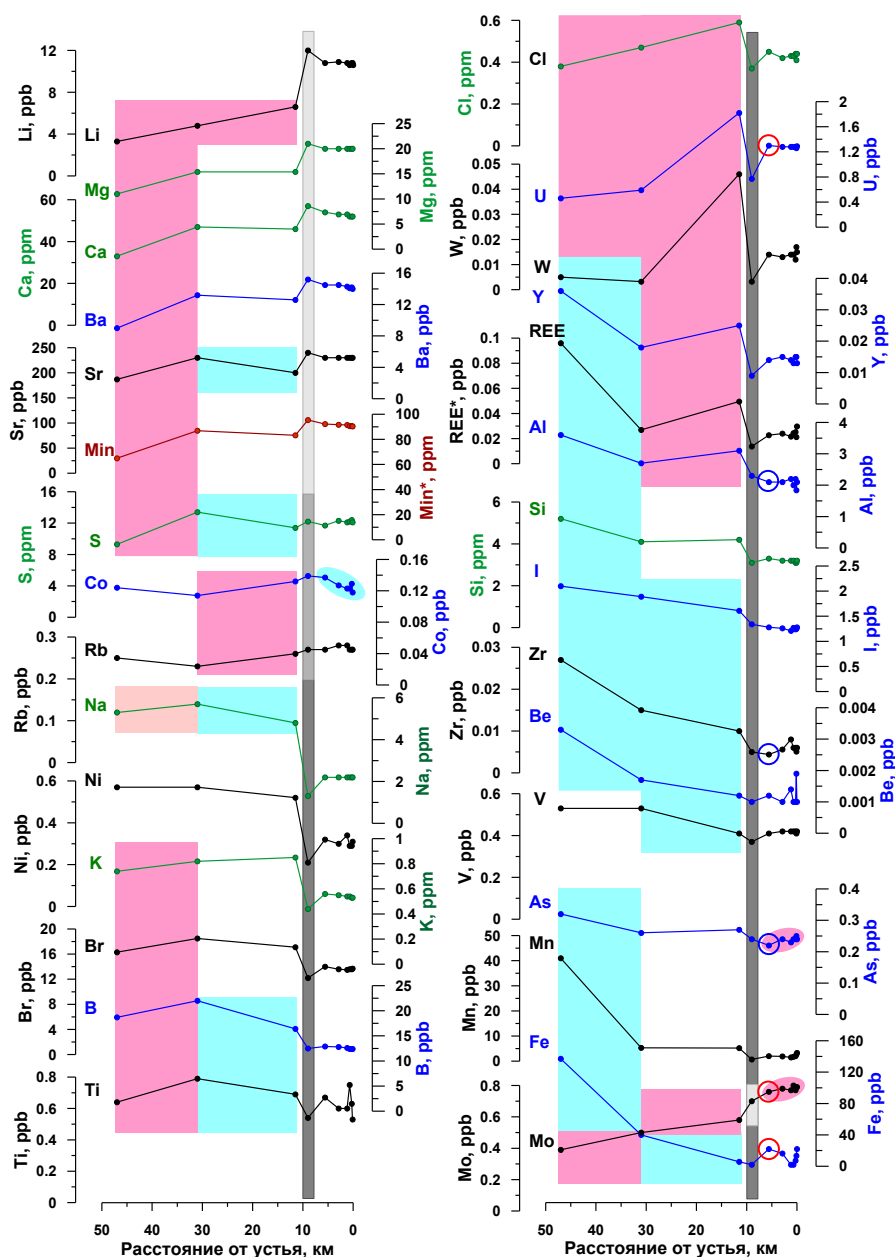


Рис. 8. Изменение концентраций элементов в воде вдоль русла р. Бугульдейка. Серыми прямоугольниками отмечены концентрации элементов в р. Куртун – крупном правом притоке р. Бугульдейка (положение р. Куртун на оси абсцисс – приблизительное). Светло-серыми прямоугольниками отмечены элементы, концентрации которых в р. Куртун заметно (>10 %) больше, а темно-серыми – меньше, чем в р. Бугульдейка перед слиянием. Серым прямоугольником средних тонов отмечены элементы, концентрации которых в р. Куртун незначительно отличаются (разница не более 10 %) от концентраций элементов в р. Бугульдейка перед слиянием. Прямоугольниками теплых и холодных цветовых тонов отмечены участки р. Бугульдейка, на которых происходит заметное (>10 %) возрастание и убывание концентраций элементов соответственно. Кружками отмечены концентрации элементов, которые при слиянии р. Куртун и р. Бугульдейка смешиваются не консервативно (см. текст и табл. 2).

Fig. 8. Change in concentrations of elements in waters along the Buguldeyka River. The gray rectangles mark concentrations of elements in the Kurtun River – a large right tributary of the Buguldeyka River (the position of the Kurtun River on the x-axis is approximate). Light gray rectangles mark the elements, whose concentrations in the Kurtun River is noticeably (>10 %) more, and dark gray – less than in the Buguldeyka River before the merger. The gray rectangle of medium tones marks the elements, whose concentrations in the Kurtun River slightly differ (difference no more than 10 %) from the concentrations of elements in the

Buguldeyka River. before the merger. Rectangles of warm and cold color tones mark sections of the Buguldeyka River, where there is a noticeable (>10 %) increase and decrease in the concentrations of elements, respectively. The circles indicate the concentrations of elements that, at the confluence of the Kurtun and Buguldeyka Rivers are not mixed conservatively (see text and Table 2).

Т а б л и ц а 1

Описание и координаты отбора проб воды из р. Бугульдейка и р. Куртун

Table 1

Description and coordinates of water sampling from Buguldeyka River and Kurtun River

Шифр	Описание	Расстояние от устья, км	N	E
1	р. Бугульдейка, вода, 3.7 км ниже д. Косая Степь	47	N52°48'46.82"	E106°3'43.78"
2	р. Бугульдейка, вода,	31	N52°44'24.06"	E105°59'51.06"
3	р. Бугульдейка, вода	11.5	N52°35'41.83"	E106°1'2.4"
4	р. Куртун, вода, 540 м выше слияния с р. Бугульдейка	~ 11 (в месте слияния)	N52°35'39.84"	E106°0'44.56"
5	р. Бугульдейка, вода	5.6	N52°33'50.94"	E106°3'0.83"
6	р. Бугульдейка, вода	2.9	N52°32'37.63"	E106°3'46.66"
7	р. Бугульдейка, вода	1.2	N52°31'55.62"	E106°3'0.07"
8	р. Бугульдейка, вода	0.7	N52°31'41.73"	E106°3'5.86"
9	р. Бугульдейка, вода	0.28	N52°31'35.28"	E106°3'25.53"
10	р. Бугульдейка, вода	0.12	N52°31'38.95"	E106°3'30.7"
11	р. Бугульдейка, вода	0	N52°31'37.26"	E106°3'36.38"

Т а б л и ц а 2

Концентрации элементов (ppb) и их частичных сумм (Min*, REE, см. текст) в фильтрованной воде (0,45 мкм) р. Куртун и р. Бугульдейка по результатам ИСП-МС анализа. Концентрация Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, Min* дана в ppm

Table 2

Concentrations of elements (ppb) and their partial sums (Min*, REE, see text) in filtered water (0.45 µm) Kurtun River and Buguldeyka River based on the results of ICP-MS analysis. Concentrations of Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, Min* are presented in ppm

Шифр Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Li	3.3	4.8	6.6	12	10.8	10.9	10.8	10.6	10.8	10.8	10.6
Be	0.0033	0.0017	0.0012	0.001	0.0012	0.001	0.0014	0.001	0.001	0.0019	0.001
B	18.7	22.0	16.4	12.5	12.9	12.8	12.6	12.4	12.4	12.4	12.4
Na	5.30	5.70	4.80	1.31	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.10
Mg	11.0	15.4	15.4	21.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Al	3.6	2.7	3.1	2.3	2.1	2.1	2.2	2	2.2	1.84	2.1
Si	5.2	4.1	4.2	3.1	3.3	3.2	3.2	3.2	3.1	3.1	3.2
P	39	23	14	20	10	28	14	8.2	20	17	10
S	9.30	13.4	11.4	12.2	11.7	12.3	12.1	12.2	12.4	12.1	12.2
Cl	0.38	0.47	0.59	0.37	0.45	0.42	0.43	0.43	0.44	0.41	0.44
K	0.74	0.82	0.85	0.44	0.56	0.55	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53
Ca	33	47	46	57	54	53	53	52	52	52	52
Ti	0.64	0.79	0.69	0.54	0.67	0.6	0.6	0.75	0.63	0.53	0.54
V	0.53	0.53	0.41	0.37	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.42
Cr	0.10	0.11	0.08	0.10	0.063	0.11	0.10	0.12	0.071	0.069	0.12
Mn	41	5.3	5.2	0.68	2.0	1.9	1.5	1.7	2.0	2.7	3.3
Fe	137	40	5.7	2	22	16	2	2	7.2	13	22

Co	0.124	0.114	0.132	0.139	0.137	0.127	0.123	0.123	0.129	0.118	0.125
Ni	0.57	0.57	0.52	0.21	0.32	0.3	0.34	0.29	0.29	0.31	0.25
Ga	0.0042	0.0026	0.0030	0.0025	0.0017	0.0022	0.0021	0.0018	0.0021	0.0025	0.0035
Ge	0.01	0.007	0.007	0.006	0.004	0.007	0.004	0.006	0.006	0.005	0.004
As	0.32	0.26	0.27	0.24	0.22	0.24	0.23	0.24	0.24	0.25	0.24
Br	16.3	18.5	17.1	12.2	14.0	13.6	13.5	13.6	13.6	13.7	13.8
Rb	0.25	0.23	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
Sr	187	230	200	240	230	230	230	230	230	230	230
Y	0.036	0.018	0.025	0.009	0.014	0.015	0.014	0.013	0.015	0.015	0.013
Zr	0.027	0.015	0.010	0.005	0.0044	0.0056	0.0080	0.0060	0.0060	0.0051	0.0060
Mo	0.39	0.50	0.58	0.70	0.76	0.78	0.77	0.80	0.77	0.79	0.79
Sb	0.038	0.027	0.025	0.025	0.019	0.023	0.020	0.020	0.024	0.022	0.015
I	2.10	1.89	1.61	1.34	1.28	1.26	1.21	1.27	1.24	1.25	1.28
Ba	9.0	13.2	12.6	15.2	14.5	14.5	14.3	14.1	14.2	14	13.9
La	0.024	0.0069	0.014	0.0039	0.0063	0.0062	0.0050	0.0059	0.0064	0.0060	0.0068
Ce	0.039	0.011	0.016	0.0046	0.009	0.009	0.007	0.009	0.009	0.009	0.011
Pr	0.006	0.002	0.0035	0.0012	0.0014	0.0018	0.0016	0.0014	0.0018	0.0012	0.0019
Nd	0.027	0.007	0.016	0.004	0.006	0.007	0.008	0.008	0.008	0.005	0.01
W	0.0050	0.0032	0.046	0.0032	0.014	0.013	0.014	0.014	0.012	0.017	0.015
U	0.46	0.59	1.82	0.77	1.3	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26	1.29
Min*	65	87	83	95	92	92	91	91	91	90	90
REE	0.096	0.027	0.050	0.014	0.023	0.024	0.022	0.024	0.025	0.021	0.030

Повышенные концентрации труднорастворимых элементов (REE, W, Y, Zr и Be) на начальном участке реки также свидетельствуют в пользу повышенного содержания органического вещества в воде, которое способно комплексовать практически нерастворимые металлы в органо-минеральные растворимые комплексы (Pokrovsky et al., 2006; Bagard et al., 2011 и ссылки в этой работе). Корреляция органического вещества с такими металлами хорошо пролеживается в сезонной динамике на ряде сибирских рек (Pokrovsky et al., 2006; Bagard et al., 2011) и р. Селенге (Чебыкин и др., 2012). Антогонистом Mn по поведению в окислительно-восстановительных условиях является Mo. Эту пару элементов используют, в частности, для реконструкции интенсивности вентилиации глубинных океанических вод (Yarincik et al., 2000). В нашем случае, также видно, что профили Mn–Fe и Mo имеют взаимно обратную форму. Т.е., по мере продвижения к Байкалу, окислительно-восстановительный потенциал среды в реке должен возрастать.

На втором 19.5 км участке реки (31–11.5 км от устья) концентрации Li, Cl, U и Mo продолжают нарастать. Среди них особенно сильно возрастает концентрация U (в три ра-

за). Другие элементы, для которых характерно увеличение концентраций на данном участке – Co, Rb, W, Y, REE, и Al. Среди них в наибольшей степени возрастает концентрация W (в 14 раз). Уменьшение концентраций характерно для Sr, S, Na, B, Ti, I, Zr, Be, V и Fe. Среди них в наибольшей степени падает концентрация Fe (на 86%), высокие степени падения характерны для Zr (на 33%) и Be (на 29%). Концентрация остальных элементов (Mg, Ca, Ba, Min*, Ni, K, Br, Si, As, Mn) на данном участке практически не меняется.

Концентрации и соотношения элементов в р. Куртун и р. Бугульдейка значительно различаются. Концентрации Li, Mg, Ca, Ba, Sr, Mo и частичная минерализация Min* в р. Куртун больше, чем в р. Бугульдейка перед слиянием (отмечено светло-серым прямоугольником на рис. 8) на 82, 36, 24, 21, 20, 21 и 15 % соответственно. Концентрации S, Co, Rb практически одинаковые (различие менее 10%). Концентрации других элементов в р. Куртун меньше, чем в р. Бугульдейка перед слиянием (отмечено темно-серым прямоугольником на рис. 8) (в скобках разница концентраций): Na (73 %), Ni (60 %), K (48 %), Br (29%), B (24 %), Ti (22 %), Cl (37%), U (58 %), W (93 %), Y (64 %), REE (72%), Al

(26%), Si (26%), I (17%), Zr (50%), Be (17%), V (10%), As (11%), Mn (87%), Fe (65%). Таким образом, по ряду элементов (Li, Na, Ni, U, W, Y, REE, Zr, Mn и Fe) различие концентраций составляет более чем в два раза.

После слияния рек концентрации большинства элементов на четвертом 5.6 км участке р. Бугульдейка (5.6–0 км от устья) практически не меняются, за исключением Co, As и Mo. Концентрация Co имеют небольшую тенденцию к уменьшению, а As и Mo – к увеличению (рис. 8, выделено цветом). Концентрации Ti, Zr, Be и Fe заметно флуктуируют.

Используя концентрацию Na (как наиболее консервативный элемент) в р. Куртун и в р. Бугульдейка до смешения и в 5.6 км после смешения (точка № 5, см. рис. 7, табл. 2) было рассчитано соотношение речных потоков. Оказалось, что поток р. Куртун в 3 раза больше потока р. Бугульдейка. Расчеты показывают, что при таком соотношении потоков большинство элементов также смешиваются консервативно (физическое разбавление), за исключением Al, As, Zr, концентрация которых оказалась ниже расчетной и Fe, Mo и U, концентрация которых оказалась выше расчетной (особенно Fe – в 7 раз). Возможно, что на этом участке (после смешения и до точки № 5, длиной 5.9 км, 11–5.6 км от устья) продолжают меняться физико-химические условия, происходит осаждение тонкодисперсной взвеси, маркируемой Al и мобилизация в раствор Fe, Mo, U из коллоидных частиц или привнос этих элементов из других источников.

Различие в элементном составе р. Бугульдейка и р. Куртун в значительной степени определяется геологическим строением их бассейнов (рис. 5). Большая часть бассейна р. Куртун находится в нижнекембрийской бельской и усольской свитах. Это доломиты с гипсом, ангидритом и прослоями соли, которые насыщают дренирующие их воды Ca, Mg, сульфатами и генетически связанными с ними элементами (Ba, Sr, Mo). Повышенное содержание Li, возможно, генетически связано с прослоями солей. В то же время концентрация Na в р. Куртун заметно ниже, чем в р. Бугульдейка, что косвенно указывает на

то, что соленосные толщи в бассейне р. Куртун имеют большее отношение Li/Na.

Геологическое строение бассейна р. Бугульдейка более сложное (рис. 5). В верхней его части центральное место занимает нижнекембрийская ушаковская свита (граувакковые песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты и глинистые сланцы), а на краях нижнекембрийская бельская и усольская свиты. Основное русло реки обрамляют четвертичные отложения (пески, галечники, глины). Последние, а также породы ушаковской свиты, вероятно, сказываются на повышенной концентрации в р. Бугульдейка Si, Al и ряда других металлов (Na, K, Ni) (точка № 1, 47 км от устья, рис. 6), которые могут быть извлечены из полевых шпатов и глинистых минералов по ионообменному механизму. Повышены также концентрации неметаллов и металлоидов (I, Br, V, As), что, возможно, связано с поступлением элементов из соленосных кембрийских отложений и/или с ионным обменом (некоторые глинистые минералы способны обменивать анионы (Перельман, 1982).

На участке реки между точками 1 и 2 (43–31 км от устья, рис. 6) впадают три правых притока – рр. Алтар Харгы, Байса, сливающаяся перед впадением с р. Му Турунга, и ХиДуса. Бассейны этих притоков лежат в нижнекембрийской ушаковской свите и частично в нижнекембрийской мотской свите (пестроцветные песчаники, алевролиты и карбонатные породы), основное русло реки на этом участке обрамляют четвертичные отложения (пески, галечники, глины) и верхнепротерозойские (непротерозойские?) отложения (сланцы, песчаники, известняки) (рис. 6). Возможно, увеличение на данном участке концентраций Mg, Ca, Ba, Sr, S, Mo, U связано с влиянием карбонатных пород, которые распространены как в бассейне притоков, так и по основному руслу. Здесь же происходит увеличение Li, Cl и ряда других элементов (рис. 8), поступающих из кембрийских соленосных отложений.

На участке реки между точками 2 и 3 (31–11.5 км от устья, рис. 6) впадает один левый приток – р. Кундуй, бассейн которой сложен

вреднепротерозойскими отложениями и три левых притока – рр. Борлог, Светлый, Сухой. Левые притоки дренируют верхнепротерозойские отложения и, в верховьях, раннепротерозойский Приморский интрузивный комплекс (граниты). На этом участке продолжает возрастать концентрация Li, Cl, U, Mo. Немного увеличивается содержание Co, Rb, Y, REE, Al. В наибольшей степени возрастает концентрация U и W (рис. 8). Возможно, что увеличение концентрации этих элементов частично связано с гранитами.

Участок реки после смешения с р. Куртун (11–0 км от устья) практически полностью

лежит в обрамлении Приморского интрузивного комплекса (граниты). На этом относительно коротком участке концентрации большинства элементов практически не меняются.

Для выбора пунктов гидрогеохимического мониторинга Бугульдейского полигона опробованы поверхностные воды из бассейнов рек Бугульдейка и Таловка, а также подземные воды родников и скважин на отрезке зоны Приморского разлома от пос. Бугульдейка до пос. Еланцы. Образцы воды отбирались с мая по сентябрь в 2012–2020 гг. Измерялись концентрации урана и $OA4/8$ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты измерений концентраций U и $OA4/8$ в подземных и поверхностных водах Бугульдейского и Ольхон-Приольхонского полигонов

Table 3

Results of measurements of U concentration and $RA4/8$ in groundwater and surface water of Buguldeyka and Olkhon-Prionkhonye polygons

Ст.	Дата	Время	Серия	Объект	Широта	Долгота	U, мкг/дм ³	$OA4/8$	Отн. ошибка, % (1σ)
Бассейн среднего течения р. Бугульдейка (выше устья р. Куртун)									
118	29.06.2014	20:35	50	р. Бугульдейка	52°50.414'	106°95.034'	0.083	2.14	1.20
119	29.06.2014	20:45	50	рч. Харик	52°50.900'	106°03.968'	0.36	2.7	0.60
Бассейн нижнего течения р. Бугульдейка (ниже устья р. Куртун)									
138	11.06.2015	12:50	65	р. Бугульдейка	52°33.123'	106°03.872'	1.09	5.03	0.46
144	04.06.2016	13:10	77	Бугульдейка	52°32.896'	106°03.815'	1.21	4.95	0.52
Krt-1	10.09.2017	14:46	92	р. Куртун	52°35.356'	105°59.058'	0.74	7.15	0.42
Krt-2	10.09.2017	15:10	92	р. Куртун	52°36.161'	105°59.058'	0.71	7.23	0.41
Krt-3	10.09.2017	15:30	92	р. Куртун	52°35.827'	105°57.935'	0.70	7.30	0.40
Р. Таловка									
132	21.05.2015	15:30	64	Низовье	52°33.658'	106°07.896'	3.4	2.04	0.77
Приморский разлом									
136	11.06.2015	12:25	65	Скважина	52°32.924'	106°04.310'	10.0	2.99	0.56
137	11.06.2015	12:40	65	Скважина	52°33.155'	106°04.136'	4.0	3.38	0.52
139	12.06.2015	10:00	65	Родник	52°34.921'	106°07.204'	10.3	2.26	0.66
140	11.06.2015	12:20	65	Родник	52°37.706'	106°09.707'	3.0	1.89	0.73
10	29.06.2014	20:10	50	Родник	52°44.429'	106°18.421'	7.5	1.70	0.74
117	22.02.2016	16:00	74	Скважина	52°45.932'	106°20.869'	17.9	1.19	1.10

Примечание: Ст. – станция опробования.

На рис. 9 показаны вариации концентраций U в опробованных водопунктах, варьирующие от 0.083 (проба 118 района Косой

Степи) до 18 мкг/дм³ (проба 117 в 80-метровой скважине района Тыргана).

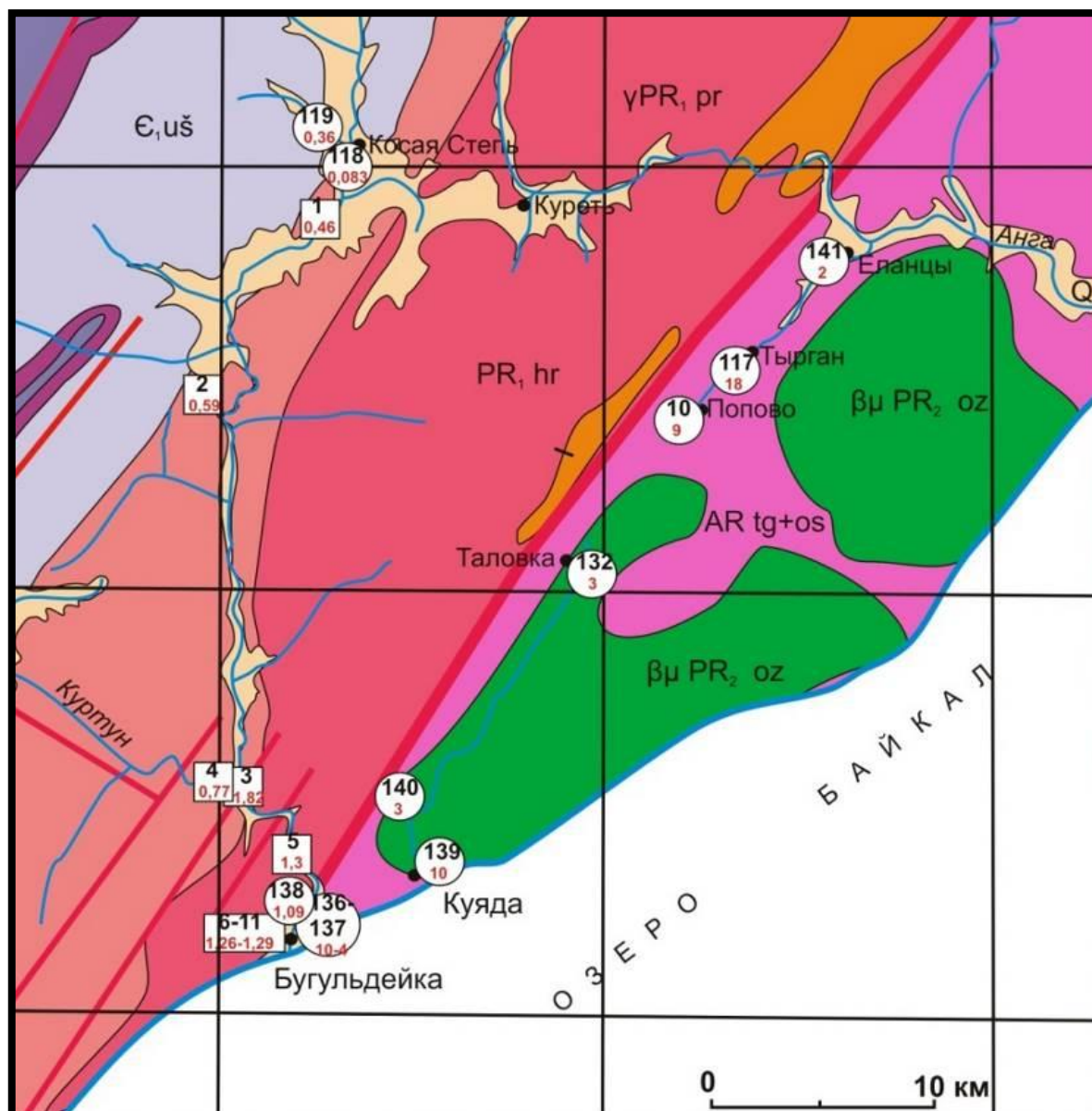


Рис. 9. Вариации концентрации U в опробованных водопунктах Бугульдейского полигона (в кружках сверху – номер пробы, внизу – концентрация U в $\mu\text{г}/\text{дм}^3$).

Fig. 9. Variations in the U concentration in the sampled water sites of the Buguldeyka polygon (in the circles at the top is the sample number, at the bottom is the U concentration in $\mu\text{g}/\text{dm}^3$).

Подземные воды участка Куяда Бугульдейского полигона имеют значения $OA4/8$ выше значения окисленного компонента байкальской воды (ОКБВ), а участка Тырган Ольхон-Приольхонского полигона – ниже. Значения $OA4/8$ и $1/U$ возрастают от под-

земных вод участка Тырган через подземные воды участка Куяда и поверхностные воды р. Таловка к поверхностным водам р. Бугульдейка и р. Куртун. Относительно подземных вод поверхностные воды обеднены ураном с возрастанием $OA4/8$ (рис. 10).

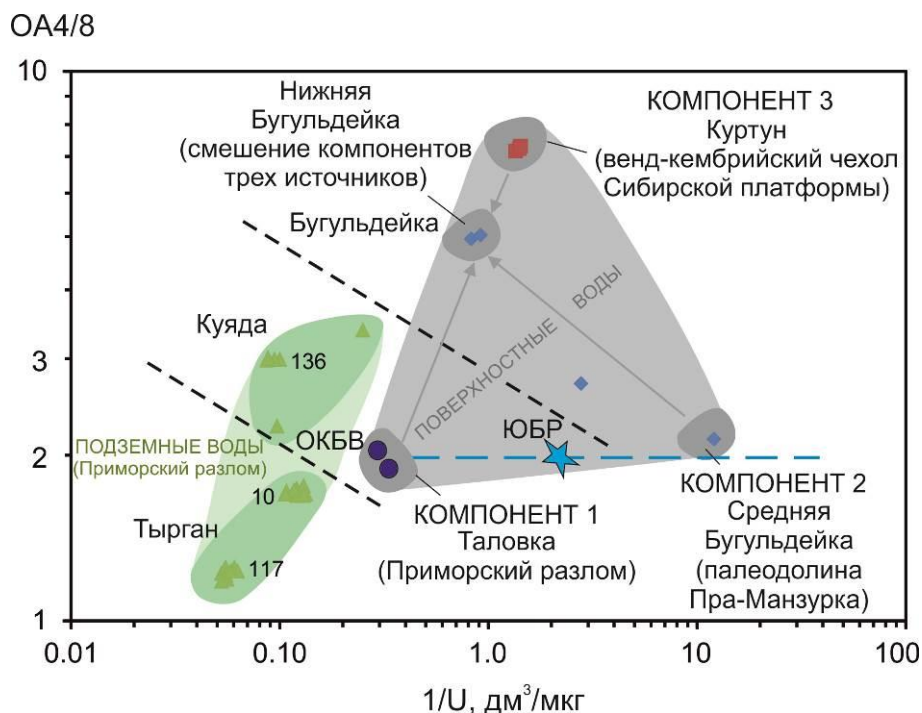


Рис. 10. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ поверхностных и подземных вод Бугульдейского и Ольхон-Приольхонского полигонов. Составы глубинной воды ЮБР (Южно-Байкальского резервуара) и ОКБВ (окисленного компонента байкальской воды с повышенным содержанием U, показаны по работе (Рассказов и др., 2020). Станции 10, 117 и 136 обозначают совокупности точек неоднократных измерений разновременных проб подземных вод.

Fig. 10. Diagram $AR4/8$ versus $1/U$ of surface waters and groundwaters in the Buguldeyka and Olkhon-Priolkhonye polygons. Compositions of South Baikal reservoir (ЮБР) and oxidized component of Baikal water (ОКБВ) with an elevated U content are shown after (Rasskazov et al., 2020). Stations 10, 117, and 136 designate sets of points of repeated measurements of different time groundwater samples.

Выделяются три конечных компонента смешения поверхностных вод. Компонент 1 с минимальным значением $OA4/8$ при максимальной концентрации U (минимальном значении $1/U$) дает вода бассейна р. Таловка, который дренирует участок Куяда, принадлежащий к зоне Приморского разлома. Этот состав соответствует окисленному компоненту байкальской воды (Рассказов и др., 2020). Компонент 2 с минимальным значением $OA4/8$ при минимальной концентрации U (максимальном значении $1/U$) представлен водой среднего течения р. Бугульдейка в полосе кембрийских терригенных отложений ушаковской свиты и плиоцен-четвертичного аллювия долины р. Пра-Манзурка. Компонент 3 с максимальным значением $OA4/8$ при промежуточной концентрации U проявлен в воде р. Куртун, взаимодействующей с венд-кембрийскими минерализованными (эвапоритовыми) отложениями усольской,

бельской и мотской свит. Состав урана поверхностных вод, имеющих минимальные значения $OA4/8$, сопоставляется с составом урана глубинной воды Южно-Байкальского резервуара с характерными значениями $OA4/8$ 1.95–1.99 и концентрацией U 0.44–0.46 мкг/дм³. Такое соответствие может свидетельствовать о проникновении глубинной воды этого резервуара под побережье оз. Байкал.

В целом гидрогеохимическое опробование выявило существенное территориальное различие изотопного состава урана в поверхностных и подземных водах Бугульдейского полигона. Предполагается, что в смешении урановых компонентов природных вод отразилось распространение под побережье Южного Байкала глубинной воды Южно-Байкальского резервуара. Отклики $OA4/8$ на Голоустенское землетрясение, полученные по рядам наблюдений на станциях

10 и 117 (Семинский и др., 2022), свидетельствуют о возможности использования гидрогеохимического мониторинга этих станций для регистрации сейсмогенных деформаций коры.

Ольхон-Приольхонский полигон

К Ольхон-Приольхонскому полигону относятся водопункты по латерали Малого моря: на побережье (в Приольхонье) и на о. Ольхон. Представляет интерес сравнения гидрогеохимических параметров подземных

водах из зоны Приморского разлома (Приольхонье) и Морского разлома, ограничивающего в акватории о-в Ольхон с юго-востока (не показан).

В Приольхонье опробованием охвачено 8 родников на территории от Черноруда до Курмы. Выполненные измерения проб подземных вод в районе Сармы дали интервал $OA4/8$ от 1.54 (Щучья) до 2.63 (Сарма) (рис. 11).

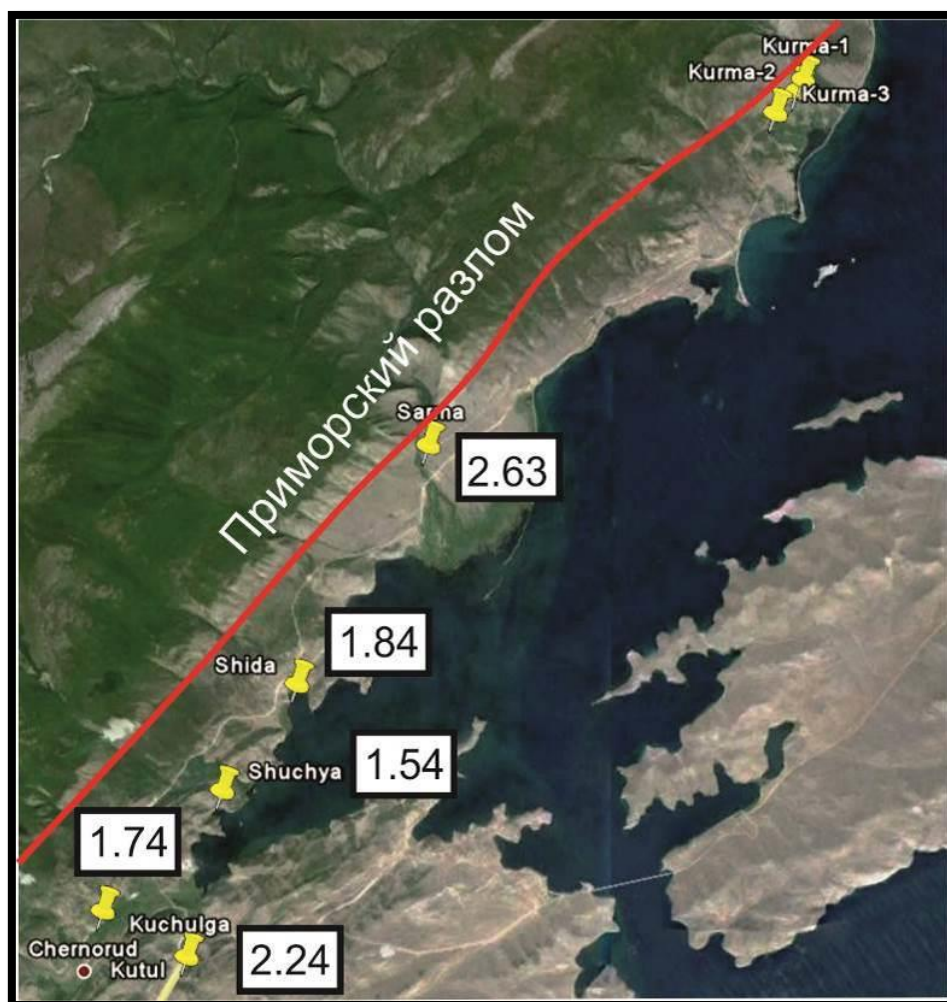


Рис. 11. Схема опробования и результаты измерений $OA4/8$ (в прямоугольниках) в водах родников района р. Сармы.

Fig. 11. Sampling scheme and $AR4/8$ measurement results (in rectangles) in waters of springs in the Sarma River area.

На о-ве Ольхон в основном опробованы водопункты северо-западного берега в удалении от Морского разлома (рис. 12). Полученные концентрации элементов существен-

но отличаются от концентраций глубинной байкальской воды (рис. 13).

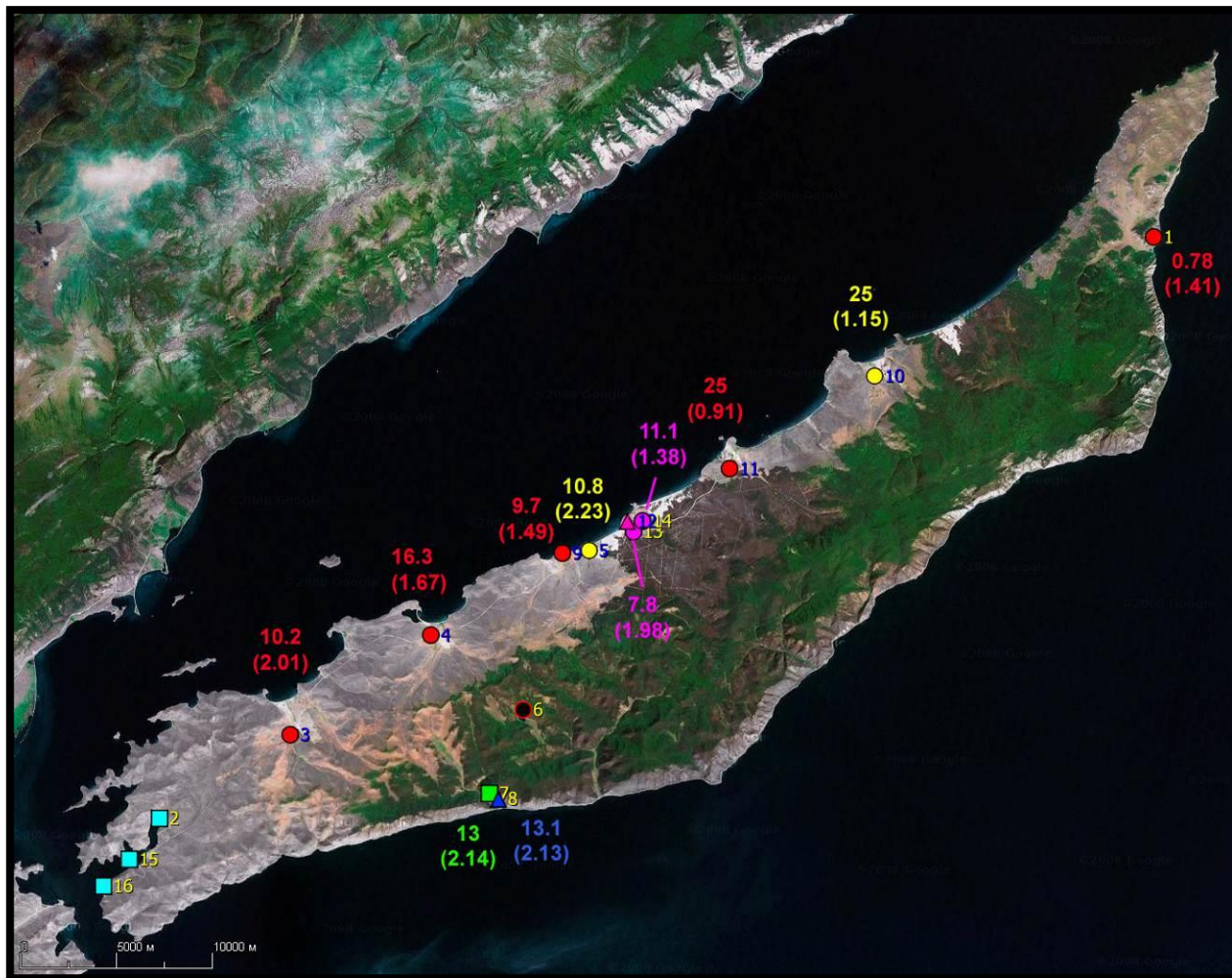


Рис. 12. Схема опробования водопунктов о-ва Ольхон 30 июля – 04 августа 2019 г. Голубые квадраты – прибрежная вода в заливах (ст. 2 – оз. Нурское, ст. 15 – залив Загли, ст. 16 – Ольхонские ворота, у причала паромной переправы), зеленый (ст. 7) – ручей в пади Идиба; красные кружки – вода из скважин в частных домах (ст. 1 – п. Узурь, скв. 14 м, запах H_2S ; ст. 3 – ферма, глубина скв. неизвестна; ст. 4 – п. Ялга, скв. 45 м; ст. 9 – п. Малый Хужир, глубина скв. неизвестна; ст. 11 – п. Харанцы, взято погружным насосом с глубины 7 м), желтые – на турбазах (ст. 5 – т/б «Baikal View», скв. ~ 80 м; ст. 10 – т/б «Халгай», глубина скв. неизвестна), розовые – водокачки в п. Хужир (ст. 13 – водокачка № 2, скв. ~ 70 м (45 м – по другим данным); ст. 14 – водокачка № 1, скв. 60-70 м), черный – оз. Шара Нур; синий треугольник – родник в пади Идиба (ст. 8), розовый треугольник (ст. 12) – привозная вода в частном доме п. Хужир из водокачки № 2. Цифрами в цвет символов даны концентрации урана (мкг/л), в скобках даны значения *OAA/8*.

Fig. 12. Scheme of water sampling sites in Olkhon Island for the period July 30 – August 04, 2019. Blue squares – coastal water in the bays (st. 2 – Nurskoe Lake, st. 15 – Zagli bay, st. 16 – Olkhonskie vorota, near the ferry terminal), green (st. 7) – stream in Idiba valley; red circles – water from wells in private homes (st. 1 – Uzury village, hole 14 m, H_2S smell; st. 3 – Farm, hole depth unknown; st. 4 – Yalga village, hole 45 m; st. 9 – Malyi Khuzhir village, hole depth unknown; st. 11 – Kharantsy village, taken by a submersible pump from a depth of 7 m), yellow – at camp sites (st. 5 – camp «Baikal View», hole ~ 80 m; st. 10 – camp «Khalgay», hole depth unknown), pink – water pumps in the Khuzhir village (st. 13 – water pump № 2, hole ~ 70 m (45 m according too other information); st. 14 – water pump № 1, hole 60-70 m), black – lake Shara Nur; blue triangle – a spring in the Idiba valley (st. 8), pink triangle (st. 12) – brought water into a private house in the Khuzhir village from water pump No. 2. Digits the same color as the symbols show uranium concentration (mg/l), values of *OAA/8* are given in brackets.

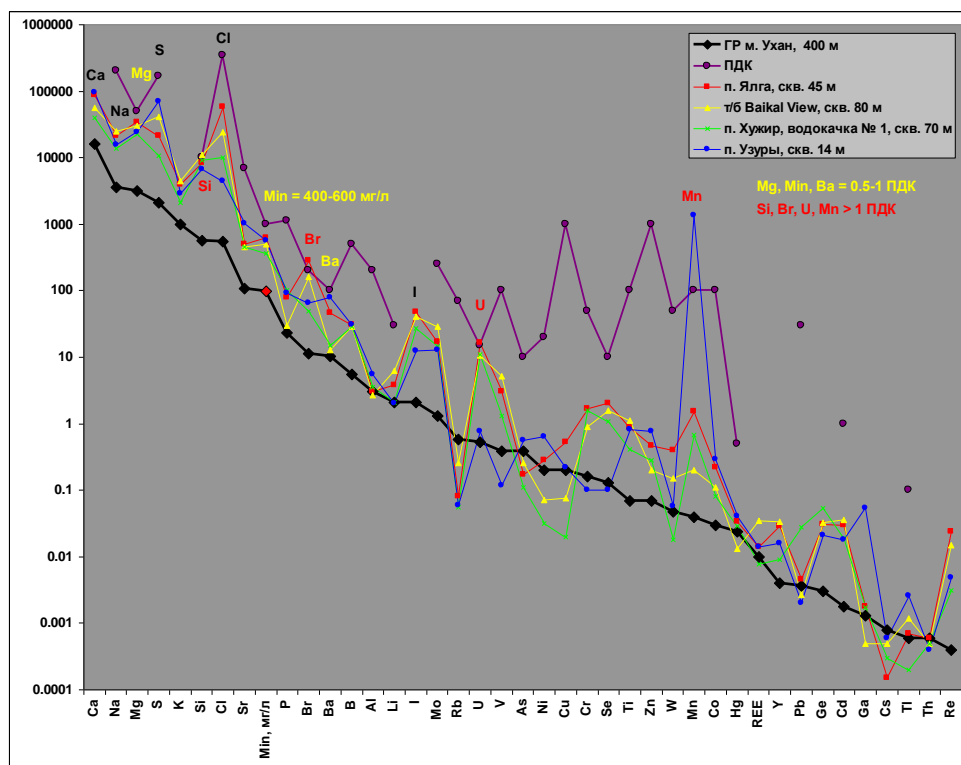


Рис. 13. Концентрации элементов выборочных проб воды о-ва Ольхон в сопоставлении с концентрациями в глубинной байкальской воде (ГР м. Ухан, 400 м) и значениями ПДК.

Fig. 13. Concentrations of elements in selected water samples from Olkhon Island in comparison with concentrations in deep Baikal water (Cape Ukhan, 400 m) and Maximum Allowable Concentration values.

Подземная вода и водотоки о. Ольхон характеризуются высокой минерализацией – 330–720 мг/дм³, существенно превышающей минерализацию воды оз. Байкал (около 100 мг/дм³). В составе катионов преобладает Ca, в составе анионов – гидрокарбонат-ион, за исключением ст. 1 (с Узурь), в воде которой концентрация сульфатов (210 мг/дм³) немного превышает концентрацию гидрокарбонат-ионов (187 мг/дм³). Особенностью вод острова является высокое содержание Mg, Si, Br, U, и в некоторых подземных водах – Ba. Содержание Mg в поверхностной воде (ст. 7, 8) и в воде некоторых скважин (ст. 4, 5, 10, 11) составляет 0.6-0.9 ПДК хозяйственно-питьевых объектов (50 мг/дм³) (Гигиенические нормативы..., 2003). Содержание Si во всех водах, за искл. скв. в п. Харанцы на территории аэродрома (ст. 11), составляет более 0.7 ПДК (10 мг/л), а в скважине на территории т/б «Baikal View» превышает ПДК в 1.1 раза. Превышение ПДК по Br (200 мг/дм³) обнаружено в п. Ялга – 1.4 ПДК и на

т/б в п. Халгай – 3.1 ПДК (там же высокое содержание Se – 0.6 ПДК). В п. Малый Хужир и на т/б «Baikal View» содержание Br составляет 0.6 и 0.8 ПДК соответственно, а в поверхностной воде (ст. 7, 8) ~0.5 ПДК. В остальных скважинах – 0.3 ПДК. Превышение ПДК по U (15 мг/дм³) обнаружено в п. Ялга (1.1 ПДК), в п. Харанцы (1.7 ПДК) и на т/б в п. Халгай (1.7 ПДК). В остальных случаях, за исключением п. Узурь, концентрация урана в воде находится на опасном уровне (0.5–0.9 ПДК). В п. Узурь вода из скважины 14 м имеет запах сероводорода и очень высокие концентрации Mn – 1370 мг/дм³, что в 13.7 выше ПДК (100 мг/дм³). Превышение ПДК по Ba (100 мг/дм³) обнаружено в скважине на аэродроме в п. Харанцы – 1.5 ПДК. Содержание Ba достигает высокого уровня в п. Ялга (0.5 ПДК) и в п. Узурь (0.8 ПДК). По общей жесткости (сумма мг-экв Ca и Mg) значение ПДК (7 мг-экв/л) превышает вода из общественной водокачки п. Ялга (7.2 мг-экв/дм³), а все другие образцы воды острова

характеризуются величинами более 0.5 ПДК.

Во всех исследованных скважинах, кроме п. Узуры (ст. 1), обнаружены высокие концентрации урана, которые варьируют в интервале 10.2–25 мкг/л, при этом значения $OА4/8$ варьируют в интервале 0.91–2.23 (рис. 12). Вода с обедненным изотопным составом $OА4/8 = 0.91$ и максимальным содержанием U (25 мкг/л) обнаружена в подземных водах п. «Харанцы» вблизи летного поля (ст. 11). Высокие концентрации урана (~ 13 мкг/дм³) характерны также для поверхностных и родниковых вод пади Идиба (ст. 7, 8), которые имеют изотопный состав $OА4/8 = 2.13$ – 2.14 , близкий к значению глубинной байкальской воды ($OА4/8 = 1.96$). Наименьшая концентрация урана обнаружена в п. Узуры – 0.78 мкг/дм³ с величиной $OА4/8 = 1.41$.

Обсуждение

Выполнено обзорное исследование поверхностных и подземных вод на Листвянском, Бугульдейском и Ольхон-Приольхонском полигонах. Предполагается, что в смешении изотопных урановых компонентов природных вод отразилось распространение под побережье Южного Байкала глубинной воды Южно-Байкальского резервуара.

Для организации гидроизотопного сейсмопрогностического мониторинга на Листвянском полигоне наиболее перспективны скважины в долине р. Большие Коты. Здесь имеет место тренд смешения компонента воды из зоны Обручевского разлома с высоким $OА4/8$ (~ 2.5) и компонента ВКБВ.

На Бугульдейском полигоне в повторное опробование вовлечены ст. 10, 117 и 136, позавшие отклики на Голоустное землетрясение 2015 г. (Семинский и др., 2022). С этой частью Приморского разлома перекликаются данные по временным вариациям компонентов на его маломорском отрезке, в Приольхонье. Здесь весьма перспективен на опробование родник р. Сарма, в котором определено максимальное значение $OА4/8$ (2.63).

Полученные гидрогеохимические данные для подземных вод северо-западной прибрежной части о-ва Ольхон пока имеют

предварительный характер. Для регистрации откликов на сейсмогенные деформации в Морском разломе необходимо вовлечение в дополнительное опробование водопунктов его юго-восточной прибрежной части.

Заключение

На Листвянском полигоне наиболее существенное изменение состава подземных вод обнаружено в пос. Б. Коты. Вода из скважин на бортах речных долин существенно отличается по составу от воды из скважин и естественных выходов родников в долинах рек Б. Коты и М. Коты. На Бугульдейском и Ольхон-Приольхонском полигонах, в зоне Приморского разлома, получен интервал значений $OА4/8$ от 1.25 до 2.63, характеризующий общий деформационный режим в крупных активных разломах центральной части Байкальской рифтовой системы. На о-ве Ольхон определена подземная вода, существенно отличающаяся по элементному составу от глубинной байкальской воды и характеризующаяся интервалом $OА4/8$ с более низким верхним пределом значений (2.23), чем в подземных водах Приольхонья в зоне Приморского разлома. Кроме того, на о. Ольхон обнаружена вода с составом, обедненным нуклидом ^{234}U при $OА4/8$ (0.91) и максимальном содержании U (25 мкг/л).

Аномально высокое значение $OА4/8 = 5.03$ в воде р. Бугульдейка на ее устье соответствует аномальным концентрациям элементов в притоке р. Куртун, бассейн которого дренирует породы осадочного чехла с карбонатами, содержащими гипс и ангидрит. Эта аномалия изотопов урана сопоставляется с аномалией, выявленной на гидроизотопном профиле Иркутск–Байкал. Определено существенное территориальное различие изотопного состава урана в поверхностных и подземных водах. Вода р. Бугульдейка отличается по микроэлементному составу и значениям $OА4/8$ от воды ее притока Куртун в связи с переходом от пород обнаженного фундамента Сибирской платформы к ее осадочному чехлу, включающего эвапоритовые карбонатные отложения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Литература

Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27 апреля 2003 г.) Дата введения 15 июня 2003 г. (ред. от 13.07.2017)

Ильясова А.М., Снопков С.В. Косейсмические вариации термфильного элемента Si подземных вод на западном побережье оз. Байкал // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 72–105.

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Перельман А.И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 154 с.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 632–650.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554.

Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты //

Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. С. 0677.

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития, 2012, Т. 20, № 5, С. 613–631.

References

Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Yu.A. Method for determining the isotopic composition of authigenic uranium in the bottom sediments of Lake Baikal // *Geology and Geophysics*. 2007. Vol. 48, No. 6. P. 604–616.

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ monitoring in waters from active faults on the western coast of the Southern Baikal // *Doklady of Earth Sciences*. 2015. V. 460, No. 4. P. 464–467.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodger T.V., Grachev M.A. The current state of the waters of the river. Selenga in Russia on the main components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. Vol. 20, No. 5. P. 613–631.

Hygienic standards GN 2.1.5.1315-03 "Maximum Permissible Concentrations (MPC) of chemicals in the water of water bodies for drinking and domestic water use" (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on April 27, 2003) Date of introduction June 15, 2003 (as amended on July 13, 2017)

Ilyasova A.M., Snopkov S.V. Coseismic variations of the thermophilic element Si in groundwaters on the western coast of Lake Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 72–105.

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Ge-

ophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Perelman A.I. Geochemistry of natural waters. M.: Nauka, 1982. 154 p.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgil'yanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E. .P. Hydrogeochemical zonation of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the south of the Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the formation of groundwater // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2020. V. 11, No. 3. P. 632–650.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechelnitsky V.V., Gileva N.A. Development of the Kultuk seismic prognostic polygon: ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in groundwater from active faults on the western coast of the Baikal // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–554.

Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospiev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A., 2022. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: Pilot network and first results // *Geodynamics & Tectonophysics*. Vol. 13, No. 5. P. 0677. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0677

Aries, S., Valladon, M., Polve, M., Dupre, B., 2000. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples. *Geostandard. Newslett.* 24, No. 1, 19-31.

Bagard, M.-L., Chabaux, F., Pokrovsky, O.S., Viers, J., Prokushkin, A.S., Stille, P., Rihs, S., Schmitt, A.-D., Dupre, B., 2011. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 3335-3357.

Bjorkvald, L., Buffam, I., Laudon, H., Morth, C.-M., 2008. Hydrogeochemistry of Fe and Mn in small boreal streams: the role of seasonality, landscape type and scale. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 2789–2804.

Pokrovsky, O.S., Schott, J., Kudryavtzev, D.I., Dupre, B., 2005. Basalt weathering in Central Siberia under permafrost conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 69. P. 5659–5680.

Pokrovsky, O.S., Schott, J., Dupre, B., 2006. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 70. P. 3239–3260.

Suturin, A.N., Paradina, L.E., Epov, V.N., Semenov, A.R., Lozhkin, V.I., Petrov, L.L., 2003.

Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake BAIKAL deep water. *Spectrochimica Acta Part B*. Vol. 58. P. 277–288.

Yarincik, K.V., Murrae, R.W., Lyons, T.W., Peterson, L.C., Haug, G.H., 2000. Oxydation history, of bottom waters in the Cariaco Basin, Venezuela, over past 578,000 years: results from redox-sensitive metals (Mo, V, Mn, and Fe). *Paleoceanography*. Vol. 15. P. 593–604.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
email: epcheb@yandex.ru.

Chebykin Evgeny Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,

664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, Ulan-Batorskaya st., 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
заведующий кафедрой динамической геологии,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,
тел.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilievich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664003 Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Dynamic Geology Char,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,
tel.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru.

Ильасова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: ila@crust.irk.ru.

Пыасова Аигул Маратовна,
candidate of geological and mineralogical sciences,
leading engineer,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ila@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент,
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,
Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru.
Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru.

Коваленко Сергей Николаевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,
email: igpug@mail.ru.

Kovalenko Sergei Nikolaevich,
candidate of geological and mineralogical sciences,
664003 Irkutsk, Lenin, str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
assistant professor,
email: igpug@mail.ru.