

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ И ПОПУТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ВОДАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАСЕЙНА РЕКИ ОМУТНОЙ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ)

О. Г. Савичев¹, В. А. Домаренко²

¹Томский политехнический университет
Томск, Российская Федерация, OSavichev@mail.ru

²Российская академия естественных наук
Российская Федерация, Viktor_Domarenko@mai.ru

RARE EARTH AND PASSING ELEMENTS IN WATERS AND SEDIMENTS OF THE Omutnaya RIVER BASIN (TOMSK AREA, RUSSIAN FEDERATION)

O. G.Savichev¹, V. A.Domarenko²

¹Tomsk polytechnic university
Tomsk, Russian Federation, OSavichev@mail.ru

²Russian academy of natural sciences
Russian Federation, Viktor_Domarenko@mai.ru

The analysis of the data on a chemical composition of river waters and sediments in a the Omutnaya river (Omutnaya – Bol. Kirgizka – Tom – Ob) during 1998–2019. The main attention is given to the Omutnaya river. It is shown that intra-annual changes of a chemical composition of river waters are characterized by increase from a spring flood up to winter low flow contents of substances with prevalence of the dissolved form of migration. For substances with prevalence of the weighed form of migration (such as Fe, Y, La, Ce) maxima of the total contents in the spring flood and minima during the winter period are marked. Existential changes of a chemical composition of acid extracts from sediments are shown appreciably more poorly than in river waters.

Введение

Изучение процессов формирования и закономерностей проявления ореолов рассеяния – одна из важнейших задач теории и практики поисков и разведки твердых полезных ископаемых, что определяет направленность исследований в этом направлении в последние десятилетия, особенно с учетом недостаточного полного раскрытия многих вопросов [3, 4]. С учетом этого авторами с середины 1990-х гг. проводятся исследования на нескольких модельных объектах с целью раскрытия механизмов формирования первичных и вторичных ореолов. В данной работе рассматриваются условия аккумуляции и миграции редкоземельных и некоторых других химических элементов на участке Томского выступа палеозойского обрамления Западно-Сибирского мегабассейна.

Этой территории соответствует водосбор реки Омутной – элемента речной системы «Омутная – Большая Киргизка (Киргизка) – Томь – Обь», – расположенного в Томском административном районе Томской области. В его пределах и на прилегающих территориях расположены Северный, Малиновский, Южно-Александровский, Кусковско-Ширяевский и Чернореченский участки Туганского россыпного узла комплексных руд ильменита, циркона, рутила, монацита и кварцевых песков, формирование которых генетически связано со становлением шельфовой части эоцен-олигоценевого водного бассейна, расположенного в юго-восточной части Западной Сибири

[4, 7]. Указанный выше водоток пересекает Южно-Александровский участок Туганского узла с северо-востока на юго-запад в районе с. Александровское, что определяет потенциальную возможность оценки условий формирования геохимических ореолов в мезо-кайнозойе [1, 9], в том числе, цель, содержание и методику рассматриваемого исследования, направленного на выявление пространственно-временных изменений содержаний редкоземельных (РЗЭ) и некоторых попутных химических элементов в водах и донных отложениях реки Омутной в пределах Южно-Александровского участка.

Методика исследования

Методика исследования включала в себя: 1) отбор (одновременно с измерением расходов воды и содержания взвешенных наносов) и анализ проб воды и донных отложений реки Омутной в трех створах, расположенных в 11,6 (окраина с. Александровское, створ I в табл. 1, рис. 1), 13,5 (ниже по течению от с. Александровское, створ II), 18,4 км (с. Малиновка, створ III) от истока в основные фазы водного режима – в начале летне-осенней (23 июня) и зимней (3 ноября) межени 2018 г. и в весеннее половодье (10 мая) 2019 г. (рис. 1); 2) обобщение результатов 2018–2019 гг. и ранее полученных (при участии и/или под руководством авторов) данных о химическом составе вод р. Большой Киргизки (Киргизки) ее притоков с 1998 г. по 2018 г.

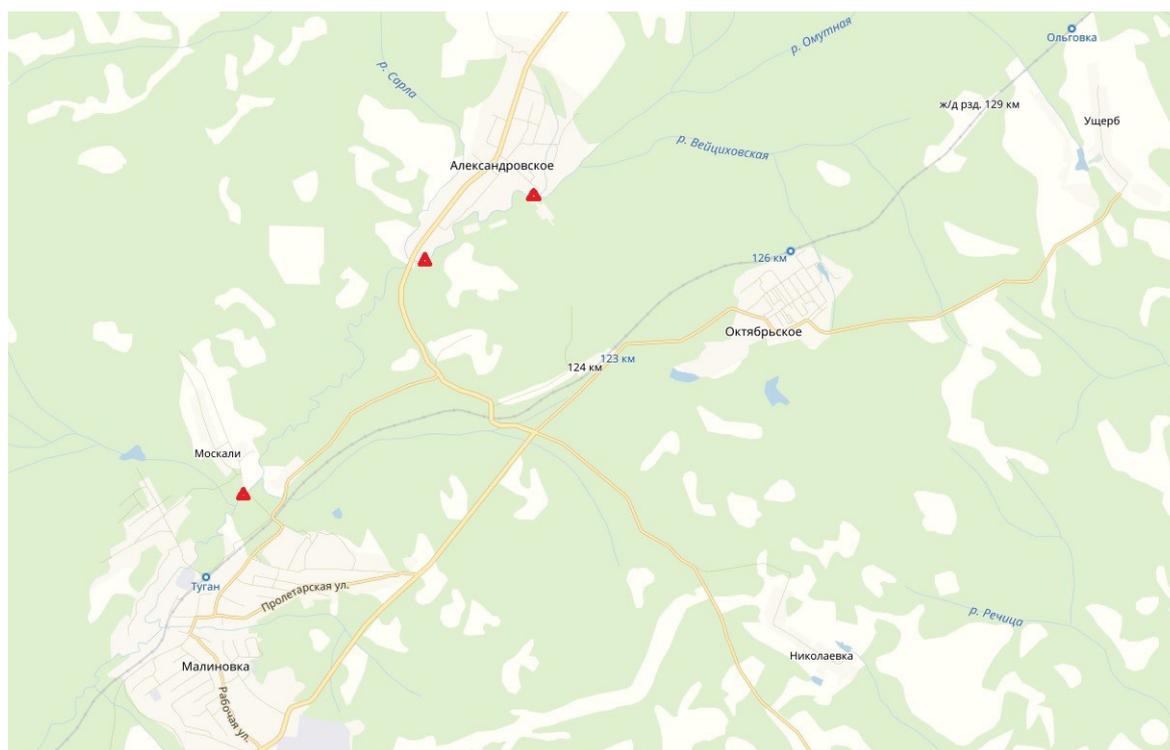


Рис. 1. Схема размещения пунктов отбора проб воды и донных отложений реки Омутной 23.06.18, 03.11.18, 10.05.19 гг

Отбор всех проб выполнен согласно следующим образом: а) пробы воды – на стрежне из верхнего слоя глубиной до 0,5 м; б) пробы донных отложений – интегральная проба из трех точек по створу (0,25, 0,50, 0,75 ширины в створе) из верхнего слоя толщиной до 0,2 м общим весом около 6 кг. Лабораторные работы по определению гранулометрического и химического состава донных отложений, химического состава речных вод проводились в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ) по аттестованным методикам (включая масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой для определения микроэлементов, в том числе РЗЭ). В донных отложениях определение проводилось в кислотной вытяжке из фракции до 1 мм согласно [6]. Более подробно методика исследования изложена в [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Воды реки Омутной как в 2018–2019 гг., так и в целом в последние 20–25 лет оцениваются как слабощелочные и нейтральные, по классификациям О. А. Алекина – пресные со средней (в межень) и малой (в половодье) минерализацией (табл. 1, 2), гидрокарбонатные кальциевые первого и второго типов. Общее содержание главных ионов в речных водах в целом увеличивается от весеннего половодья до зимней межени и по мере снижения водного стока, однако содержание взвешенных веществ, в том

числе, концентрации Fe, TR – Y, Zr, La, Ce, Sm, Eu, Th и ряда других элементов, напротив, снижаются. Величина рН достигает минимальных значений весной, а максимальных – в летне-осеннюю межень [9].

В течение всех гидрологических сезонов сумма отношений фактических и предельно-допустимых концентраций (ПДК_{хп}) веществ первого и второго классов опасности, нормируемых для хозяйственно-питьевого водопользования, больше единицы (1,20–1,84), хотя концентрации соответствующих отдельных веществ нормативы не превышали. По состоянию на 23.06.18 г. основные формы миграции: Ca, Mg, Na, K, Cl, S, Si, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Au, Th, U – растворенная и коллоидная (тонкодисперсная); P, Fe, Al, As, Y, Hg, La, Ce – коллоидная и взвешенная; Ti, Zr, Pb, Sm представлены разными формами без явно преобладания какой-либо из них (табл. 2).

На спаде весеннего половодья начинается постепенное вымывание и/или разрушение частиц легкой фракции с показателем гипергенной устойчивости менее 1,26–12,7 и концентрирование более тяжелых частиц, что отражается на химическом составе донных отложений. В частности, в летне-осенний и зимний периоды, с одной стороны, возрастает изменчивость ряда геохимических показателей с учетом гидравлических условий потока, а с другой стороны – повышается вероятность обнаружения участков с локальным повышением концентраций. В целом же происходит расширение вторичного ореола по минералам Zr, РЗЭ, и концентрированию Fe в речных отложениях [1].

Таблица 1. Среднемноголетние значения физико-химических и геохимических показателей речных вод в водах р. Большой Киргизки и ее притоков (1998–2019 гг.)

| Показатель | р. Бол. Киргизка (а) | | р. Бол. Киргизка (паф) | | р. Каменка (паф) | | р. Омутная (а) | | р. Омутная (паф) | |
|----------------------------------|----------------------|------------|------------------------|------------|------------------|------------|----------------|------------|------------------|------------|
| | A | δ_A | A | δ_A | A | δ_A | A | δ_A | A | δ_A |
| pH | 8,01 | 0,03 | 8,01 | 0,04 | 8,18 | 0,13 | 7,78 | 0,08 | 7,57 | 0,09 |
| ПО, мгО/дм ³ | 5,20 | 0,20 | 3,74 | 0,84 | 3,93 | 0,81 | 8,15 | 0,57 | 5,88 | 0,53 |
| мг/дм ³ | | | | | | | | | | |
| $\Sigma_{\text{гн}}$ | 444,3 | 27,7 | 452,9 | 21,6 | 496,1 | 20,7 | 356,0 | 64,1 | 274,7 | 34,9 |
| Ca ²⁺ | 75,8 | 3,8 | 73,5 | 5,5 | 91,3 | 1,7 | 57,9 | 8,6 | 48,8 | 6,1 |
| Mg ²⁺ | 14,4 | 1,0 | 14,8 | 1,4 | 14,6 | 0,5 | 13,2 | 2,7 | 7,8 | 1,1 |
| Na ⁺ + K ⁺ | 16,3 | 3,4 | 14,8 | 1,8 | 11,0 | 0,4 | 12,2 | 5,9 | 9,3 | 1,5 |
| HCO ₃ ⁻ | 305,0 | 21,9 | 310,6 | 17,8 | 353,9 | 8,7 | 298,4 | 19,0 | 234,4 | 18,8 |
| Cl ⁻ | 13,8 | 1,8 | 8,7 | 1,6 | 11,9 | 8,0 | 19,2 | 5,0 | 8,1 | 2,8 |
| SO ₄ ²⁻ | 11,9 | 1,7 | 10,8 | 1,3 | 3,9 | 1,5 | 9,0 | 1,3 | 7,7 | 0,7 |
| NO ₃ ⁻ | 37,00 | 15,02 | 16,65 | 3,73 | 0,50 | 0,17 | 10,91 | 1,06 | 4,79 | 1,04 |
| NO ₂ ⁻ | 0,83 | 0,27 | 0,57 | 0,23 | 0,09 | 0,03 | 0,41 | 0,10 | 0,13 | 0,04 |
| NH ₄ ⁺ | 2,34 | 0,46 | 1,54 | 0,32 | 0,28 | 0,07 | 2,48 | 0,30 | 0,69 | 0,16 |
| Фосфаты | 0,58 | 0,20 | 0,29 | 0,08 | – | – | 1,03 | 0,32 | 0,38 | 0,14 |
| Si | 2,41 | 0,71 | 3,44 | 0,55 | 5,81 | 0,36 | 2,93 | 1,36 | 5,42 | 0,22 |
| Fe | 0,444 | 0,074 | 0,565 | 0,075 | 0,331 | 0,107 | 1,031 | 0,172 | 1,155 | 0,153 |
| мкг/дм ³ | | | | | | | | | | |
| Ti | – | – | 2,11 | 0,42 | 2,35 | 1,24 | – | – | 20,64 | 9,23 |
| Cu | 1,43 | 0,31 | 1,50 | 0,37 | 2,77 | 0,87 | 2,05 | 1,04 | 1,83 | 0,41 |
| Zn | 6,28 | 2,96 | 3,28 | 1,70 | 8,67 | 6,46 | 2,23 | 1,62 | 2,08 | 0,59 |
| Pb | 0,30 | 0,11 | 0,22 | 0,06 | 0,22 | 0,10 | 0,43 | 0,17 | 0,46 | 0,14 |
| La | – | – | 0,133 | 0,032 | 0,153 | 0,048 | – | – | 0,608 | 0,208 |
| Ce | – | – | 0,262 | 0,064 | 0,325 | 0,113 | – | – | 1,301 | 0,472 |
| Pr | – | – | 0,034 | 0,008 | 0,033 | 0,017 | – | – | 0,163 | 0,057 |
| Nd | – | – | 0,142 | 0,034 | 0,172 | 0,053 | – | – | 0,654 | 0,233 |
| Sm | – | – | 0,029 | 0,007 | 0,028 | 0,016 | – | – | 0,138 | 0,050 |
| Eu | – | – | 0,012 | 0,002 | 0,011 | 0,006 | – | – | 0,038 | 0,011 |
| Gd | – | – | 0,033 | 0,008 | 0,030 | 0,016 | – | – | 0,155 | 0,055 |
| Tb | – | – | 0,005 | 0,001 | 0,004 | 0,002 | – | – | 0,021 | 0,007 |
| Dy | – | – | 0,023 | 0,005 | 0,022 | 0,012 | – | – | 0,118 | 0,041 |
| Ho | – | – | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,003 | – | – | 0,022 | 0,007 |
| Er | – | – | 0,013 | 0,003 | 0,010 | 0,006 | – | – | 0,056 | 0,020 |
| Yb | – | – | 0,010 | 0,002 | 0,010 | 0,005 | – | – | 0,052 | 0,018 |
| U | – | – | 1,189 | 0,257 | 1,254 | 0,090 | – | – | 0,386 | 0,060 |

A и δ_A – среднее арифметическое и погрешность его определения; $\delta_A \approx \sigma/\sqrt{N}$, где σ и N – среднее квадратическое отклонение и объем выборки; ПО – перманганатная окисляемость; $\Sigma_{\text{гн}}$ – сумма главных ионов.

По длине реки валовое содержание большинства изученных элементов изменяется без ярко выраженных тенденций, хотя нельзя не отметить, что от истока к устью в среднем наблюдается некоторое увеличение концентраций Na, K, P, Fe, Al, Ti, Cr, Mn, Zn, As, Cd, Pb, Th, уменьшение – U и максимум в створе II – Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, Si, Ni, Cu, Y, Zr, Hg, La, Ce, Sm, а также перманганатной окисляемости. При этом по мере движения водных масс доли взвешенных и коллоидных форм миграции сульфатов и калия снижаются, а доли растворенных и коллоидных форм – возрастают. Доля взвешенной и коллоидной форм миграции фосфора, напротив, увеличивается вниз по течению. Для прочих изученных элементов тенденции изменения по длине реки форм миграции либо не выявлены, либо отмечено определенное увеличение доли взвешенной формы в створе II (Ca, Si, Fe, Al, Ti, Mn, Ni, Y, Zr, La, Ce, Sm, U) [9].

При этом выявлена (ориентировочно) связь между расходами воды и содержаниями взвешенных веществ, с одной стороны, и валовыми концентрациями ряда веществ (обратная с главными

ионами и прямая с P, Si, Fe, Al, Ti, Cr и рядом других элементов), что позволяет предположить о вероятном увеличении валовых концентраций веществ с высокой долей миграции во взвешенной и коллоидной формах с ростом твердого стока (вследствие увеличения как общего выноса взвешенных частиц, так и сорбции на них ряда элементов). Для веществ с преобладанием растворенной формы миграции пространственно-временные изменения, видимо, в значительной мере связаны с изменениями соотношений поверхностной и подземной составляющих водного и гидрохимического стока, а также гидрогеохимической обстановкой [2, 8, 9, 10].

Заключение

Внутригодовые изменения макро- и микро-элементного состава речных вод рассматриваемой территории в целом характеризуются увеличением от весеннего половодья до зимней межени содержания веществ, для которых характерна, прежде всего, растворенная форма миграции (например, Ca, Mg, Na, K, Cl, S). Для веществ с преобладанием взвешен-

Таблица 2. Расходы воды (Q), гидрохимические и геохимические показатели вод и донных отложений реки Омутная по состоянию на 23.06.2018, 03.11.2018 и 10.05.2019 гг. (Томский район, Западная Сибирь) [9]

| Показатель | Створ | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| | I (с. Александровское) | | | II (ниже пункта I) | | | III (с. Малиновка) | | |
| Дата | 23.06 | 03.11 | 10.05 | 23.06 | 03.11 | 10.05 | 23.06 | 03.11 | 10.05 |
| Q, м ³ /с | 0,14 | 0,03 | 1,05 | 0,20 | 0,05 | 1,49 | 0,35 | 0,07 | 4,97 |
| мг/дм ³ | | | | | | | | | |
| Σ _{тп} | 287,5 | 375,8 | 96,1 | 272,3 | 346,6 | 89,6 | 339,1 | 354,9 | 106,6 |
| P | 0,075 | 0,035 | 0,080 | 0,103 | 0,041 | 0,100 | 0,131 | 0,042 | 0,150 |
| Fe | 0,876 | 0,587 | 1,700 | 1,671 | 0,872 | 2,000 | 1,462 | 1,071 | 2,830 |
| мкг/дм ³ | | | | | | | | | |
| Ti | 3,31 | 0,95 | 59,00 | 8,75 | 0,90 | 59,40 | 1,75 | 1,00 | 69,40 |
| Zr | 0,23 | 0,11 | 2,27 | 0,36 | 0,10 | 2,31 | 0,19 | 0,10 | 2,46 |
| La | 0,292 | 0,090 | 1,200 | 0,708 | 0,060 | 1,500 | 0,215 | 0,080 | 1,800 |
| Ce | 0,532 | 0,141 | 2,500 | 1,501 | 0,110 | 3,200 | 0,400 | 0,162 | 4,200 |
| Sm | 0,060 | 0,017 | 0,260 | 0,157 | 0,013 | 0,340 | 0,040 | 0,015 | 0,450 |
| U | 0,581 | 0,447 | 0,140 | 0,588 | 0,412 | 0,150 | 0,490 | 0,277 | 0,160 |
| мг/кг | | | | | | | | | |
| P | 158,3 | 134,4 | 97,6 | 144,7 | 115,3 | 191,1 | 106,0 | 174,5 | 167,6 |
| Fe | 1876 | 2405 | 3178 | 2046 | 2129 | 5140 | 1624 | 2193 | 4009 |
| Ti | 3,21 | 8,11 | 25,80 | 4,36 | 7,36 | 33,23 | 1,74 | 14,83 | 40,21 |
| Zr | 0,63 | 0,71 | 0,47 | 0,67 | 0,66 | 0,98 | 0,60 | 1,28 | 0,79 |
| La | 3,47 | 3,24 | 5,65 | 3,24 | 2,89 | 6,93 | 3,28 | 4,35 | 5,87 |
| Ce | 6,40 | 6,35 | 12,05 | 6,18 | 5,78 | 14,81 | 6,02 | 8,81 | 12,33 |
| Sm | 0,61 | 0,59 | 1,08 | 0,61 | 0,58 | 1,33 | 0,55 | 0,80 | 1,11 |
| U | 0,07 | 0,06 | 0,15 | 0,09 | 0,07 | 0,18 | 0,05 | 0,16 | 0,16 |

ной формы миграции (таких, как Fe, Y и ряд РЗЭ – в частности, La, Ce) отмечены максимумы валового содержания весной и минимумы – в зимний период. При этом в среднем течении р. Омутной прослеживается также прослеживается общий рост взвешенной формы миграции веществ при увеличении общего содержания взвешенных частиц и твердого стока. По сравнению с водами р. Большой Киргизки и р. Каменки концентрации РЗЭ в водах р. Омутной заметно выше (табл. 1), что объясняется не антропогенным, а природным влиянием, а именно – формированием геохимического ореола на протяжении мезо-кайнозоя.

Пространственно-временные изменения химического состава кислотных вытяжек из донных отложений (фракция с диаметром частиц менее 1 мм) проявляются заметно слабее, чем в речных водах, что связано с нелинейными связями между геохи-

мическими показателями речных вод и донных отложений. Для более очевидного проявления этих связей для рек Сибири требуется время, примерно соответствующее движению водных масс на участке не менее 11–20 км, когда аккумуляции многих химических элементов, включая РЗЭ, происходит на участках с наименьшей интенсивностью водообмена (участки долины, в настоящее время практически не затопливаемые, но подверженные затоплению в другие геологические периоды) [1, 5, 9]. Таким образом, можно предположить, что благоприятным условием концентрирования рудных элементов в пределах ореолов россыпных месторождений юго-востока Западной Сибири является относительно устойчивое и длительное уменьшение общей водности.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-55-80015 и № 19-45-700001 р_а.

Литература

1. Домаренко В. А., Савичев О. Г., Перегудина Е. В., Лепокурова О. Е., Вильгельм Е. А. Вещественный состав донных отложений реки Омутная в пределах Туганского россыпного узла (Томская область) // Разведка и охрана недр, 2020. – № 4. – С. 48–53.
2. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
3. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
4. Россыпные месторождения России и других стран СНГ. Минералогия, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы / отв. ред. Н. П. Лаверов и Н. Г. Патык-Кара. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.
5. Савичев О. Г., Домаренко В. А., Перегудина Е. В., Лепокурова О. Е. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 43–56.
6. Савичев О. Г., Мазуров А. К., Рудмин М. А., Хвощевская А. А., Даулетова А. Б. Изменения химического состава кислотных вытяжек по глубине торфяной залежи внутриболотных экосистем Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 101–116.
7. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л. П. Рихванов, С. С. Кропанин, С. А. Бабенко, А. И. Соловьев, В. М. Советов, Т. Ю. Усова, М. А. Полякова / под ред. Е. Н. Трибунского, М. С. Паровинчака. – Кемерово: ООО «Сарс», 2001. – 214 с.
8. Шилькрот Г. С. Механизмы, управляющие химическим составом речных и озерных вод // Известия РАН. Серия географическая. – 1998. – № 4. – С. 42–59.
9. Savichev O. G., Domarenko V. A., Lepokurova O. L. Spatiotemporal changes in river waters and bottom sediments composition within the tugan placer deposit (Tomsk oblast) // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya, 2020. – № 5. – P. 715–727. DOI: 10.31857/S2587556620050143.
10. Shvartsev S. L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International, 2008. – Vol. 46. – № 13. – P. 1285–1398.