

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.114

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(170-179)

М. Ю. СЕМЁНОВЛимнологический институт СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, smu@mail.ru**ПОКАЗАТЕЛИ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЧНЫХ ВОД
В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Выявлены региональные особенности формирования химического состава вод притоков оз. Байкал в зависимости от ландшафтных и геологических условий. Определены показатели условий формирования химического состава и выполнена группировка вод по этим показателям. Показано, что концентрации растворенного органического углерода и суммы щелочных и щелочноземельных металлов (Ca + Mg + K + Na) могут быть использованы в качестве трассеров составляющих стока, а их отношение может служить показателем для группировки вод по степени их органогенности или минералогенности. Установлено, что график внутригодовой динамики отношения $C_{\text{орг}}/(Ca + Mg + K + Na)$ повторяет график расхода воды и может быть использован как его аналог для схематичного расчленения на генетические составляющие. Также установлено, что концентрации суммы анионов сильных кислот ($SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-$) и гидрокарбоната, хотя косвенно и указывают на химический состав минерального вещества почв и пород, но в качестве трассеров источников растворенного вещества использоваться не могут. Для этой цели их, с определенными допущениями, можно заменить отношением изотопов стронция $^{87}Sr/^{86}Sr$. Тем не менее отношение $(SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-)/HCO_3^-$ можно применять как показатель для группировки вод по степени кислотности или щелочности. В результате оценки статистической достоверности различий между средними величинами показателей по степени органогенности выделены три категории вод: органогенные, органоминеральные и минералогенные. По степени кислотности также выделены три категории вод, которые можно условно назвать водами кислотного, среднего и щелочного состава.

Ключевые слова: Байкал, притоки, природные условия, химический состав вод, показатели, группировка.

M. Yu. SEMENOVLimnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Ulan-Batorskaya, 3, Irkutsk, 664033, Russia, smu@mail.ru**INDICATORS OF CHEMICAL COMPOSITION FORMATION CONDITIONS IN RIVER WATERS
WITHIN THE LAKE BAIKAL DRAINAGE BASIN**

Regional specific features of chemical composition formation in the waters of the affluents to Lake Baikal depending on landscape and geological conditions have been identified. Indicators of chemical composition formation are determined, and the waters are grouped together according to the indicators. It is shown that concentrations of dissolved organic carbon and the sums of alkaline and alkaline-earth metals (Ca + Mg + K + Na) can be used as tracers of the components of flow, and their ratio can serve as the indicator for the grouping of the waters according to the degree of their organogenicity and mineralogenicity. It is established that the plot of intra-annual dynamics of the ratio $C_{\text{org}}/(Ca + Mg + K + Na)$ replicates the discharge plot and can be used as its analog for schematic separation into genetic components. It is also found that concentrations of the sum of anions of strong acids ($SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-$) and of the hydrocarbonate ion, although pointing indirectly to the chemical composition of mineral matter of soils and rocks, cannot be used as tracers of the sources of dissolved matter. For this purpose, they can be replaced, with certain assumptions, by the strontium isotope ratio $^{87}Sr/^{86}Sr$. Nevertheless, the ratio $(SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-)/HCO_3^-$ can be used as the indicator for the grouping of the waters according to the degree of acidity or alkalinity. Three categories of the waters were identified by assessing the statistical confidence of the differences between the mean values of the indicators according to the degree of organogenicity: organogenic, organomineral, and mineralogenic. Three categories of the waters were also identified according to the degree of acidity, which may be arbitrarily referred to as the waters of acidic, intermediate and alkaline composition.

Keywords: Baikal, affluents, natural conditions, chemical composition of the waters, indicators, grouping.

ВВЕДЕНИЕ

Установление зависимости химического состава речных вод от ландшафтных и геологических условий — важная задача как с научной, так и с практической точки зрения [1]. Состав вод определяется соотношением между составляющими стока и химическим составом источников растворимого вещества. Соотношения составляющих стока неодинаковы в разных природных обстановках. Так, в горах и в условиях гумидного климата преобладает поверхностный сток, а на равнинах и в условиях аридного климата — подземный. Воды поверхностного стока, дренирующие органогенные слои почвенно-грунтовой толщи, характеризуются высоким содержанием органического вещества, а воды подземного стока, дренирующие минеральные слои, — минерального. При этом в условиях карбонатных пород воды отличаются высокой минерализацией, а в условиях силикатных — низкой. Таким образом, для установления зависимости между составом вод и условиями среды необходимо выявить химические показатели составляющих стока и источников растворенного вещества.

Простейшим показателем какого-либо фактора, определяющего состав вод, является его трассер, т. е. вещество, присутствующее во всех смешивающихся растворах, но в значительно различающихся концентрациях [2]. Трассерами могут быть как макрокомпоненты раствора (Si , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , или Al^{n+} [3, 4]), так и микрокомпоненты (Sr , Rb [5]). Ими также могут служить отношения растворенных компонентов (Ca/Sr , Ba/Sr [6] и Ge/Si [7]), в том числе и стабильных изотопов ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [8] и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ [9]). Чаще всего при помощи трассеров изучалось участие вод различного происхождения в формировании химического и водного стока рек [10].

Оценка вклада составляющих стока в него основана на рассмотрении речной воды как двухкомпонентной (или более) смеси. В качестве состава ее компонентов — поверхностного и подземного стоков — часто используют состав почвенного раствора [11] или обменной фракции соответствующих горизонтов почв [12]. Концентрации трассеров являются координатной системой, в которой точки составляющих стока — вершины фигуры, ограничивающей область смешения их вещества, представленного точками проб воды [2]. Изучению роли источников растворенного вещества в формировании химического состава речных вод уделялось меньше внимания. В качестве источников рассматривались атмосфера, органическое вещество почв и минеральное вещество горных пород [13]. В качестве трассеров использовались величина кислотности вод, величина кислотнейтрализующей способности и отношение содержания растворенного органического углерода к величине кислотнейтрализующей способности воды [14].

Различия между концентрациями одних и тех же трассеров в разных реках часто статистически недостоверны, поэтому выявить связь состава речной воды с природными условиями при помощи одних лишь трассеров невозможно. Цель настоящего исследования — разработка комплексных показателей условий формирования химического состава вод на основе трассеров составляющих стока и источников растворенного вещества.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили притоки оз. Байкал. Данные по химическому составу вод семи притоков взяты из работы К. К. Вотинцева с соавторами [15], а р. Верхней Ангары — из работы В. Т. Богданова [16]. Данные по составу вод р. Крестовки получены в 2010–2012 гг. автором и сотрудниками лаборатории гидрохимии Лимнологического института СО РАН [14]. Единственным значимым несоответствием между двумя наборами данных было использование в [15, 16] величин перманганатной окисляемости (ПО) вместо концентраций органического углерода ($C_{\text{орг}}$). Величины ПО и концентрации $C_{\text{орг}}$ численно различаются незначительно, а корреляция между ними тесная [17]. Потому величины ПО из [15] и [16] были пересчитаны на $C_{\text{орг}}$ по уравнению зависимости, полученному для Крестовки и Олхи [14]: $C_{\text{орг}}$, мг/л = $0,8682\text{ПО}$ (мг О/л) + $0,634$ ($R^2 = 0,8185$). Данные по расходу воды приведены по [18]. В качестве показателей химического состава рек также использовались концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- и SiO_2 .

Вариабельность химического состава вод оценивалась при помощи метода главных компонент (МГК) [2]. Критерием выбора потенциального трассера служила отрицательная корреляция между его концентрацией и концентрациями других растворенных веществ [10]. Критерием выбора показателя связи состава вод с природными условиями, представляющего собой отношение концентраций трассеров, был диапазон его величин в исследованных реках. Чем он шире, тем более вероятна возможность классифицирования вод по этому показателю. На этапе выбора показателей об их величинах в разных реках судили по коэффициентам регрессии в уравнении зависимости концентраций трассеров.

В случае положительной корреляции между концентрациями компонентов раствора, т. е. невозможности их использования в качестве трассеров, главным критерием выбора показателя служил диапазон отношений их концентраций.

КРАТКАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД ИССЛЕДУЕМЫХ РЕК

Природные условия бассейна оз. Байкал чрезвычайно разнообразны. Почвы западного побережья развиты преимущественно на метаморфизованных породах осадочного происхождения, что отражается в химическом составе вод. Воды малых рек северо-западного побережья Бугульдейки и Голоустной характеризуются максимальными величинами минерализации среди всех исследованных — до 120 мг/л. Особенность их состава — высокие концентрации ионов магния (в среднем 17 мг/л в период открытой воды и 28 мг/л в подледный) и сульфатов (19 и 30 мг/л соответственно). В горном обрамлении юго-восточного побережья доля метаморфических пород значительно меньше, а в водах меньше сульфатов и магния. В малой реке Крестовке их содержание даже в подледный период не превышает 14 и 8 мг/л соответственно. Химические свойства почв восточного побережья Байкала, сформировавшихся на кислых магматических и метаморфических породах, обуславливают сходный химический состав и низкую минерализацию вод. Летние концентрации преобладающих ионов (гидрокарбоната и кальция) в главных притоках Байкала — больших реках Верхняя Ангара, Баргузин и Селенга — варьируют в пределах 50–65 и 14–30 мг/л соответственно. Особое место в горном обрамлении озера занимает хр. Хамар-Дабан. Большое количество осадков, выпадающих на его северо-западный макросклон, определяет крайне низкую минерализацию малых рек Хара-Мурин, Утулик и Снежная. В период открытой воды она не превышает 30 мг/л. Максимальные зимние концентрации ионов HCO_3^- и Ca^{2+} составляют 60 и 17 мг/л соответственно, а минимальные летние — всего 16 и 4 мг/л. По содержанию органического углерода четких различий между реками нет, за исключением Крестовки. В ее водах углерода заметно больше.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты МГК-анализа показали, что $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$ являются единственной парой компонентов, расположенных диаметрально противоположно вдоль первой главной компоненты (ГК1) (рис. 1, а), что говорит о существовании между ними отрицательной корреляции. Причиной этого является приуроченность высоких концентраций $\text{C}_{\text{орг}}$ к поверхностному стоку, а высоких концентраций $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$ — к подземному. Физический смысл ГК1 как фактора, определяющего

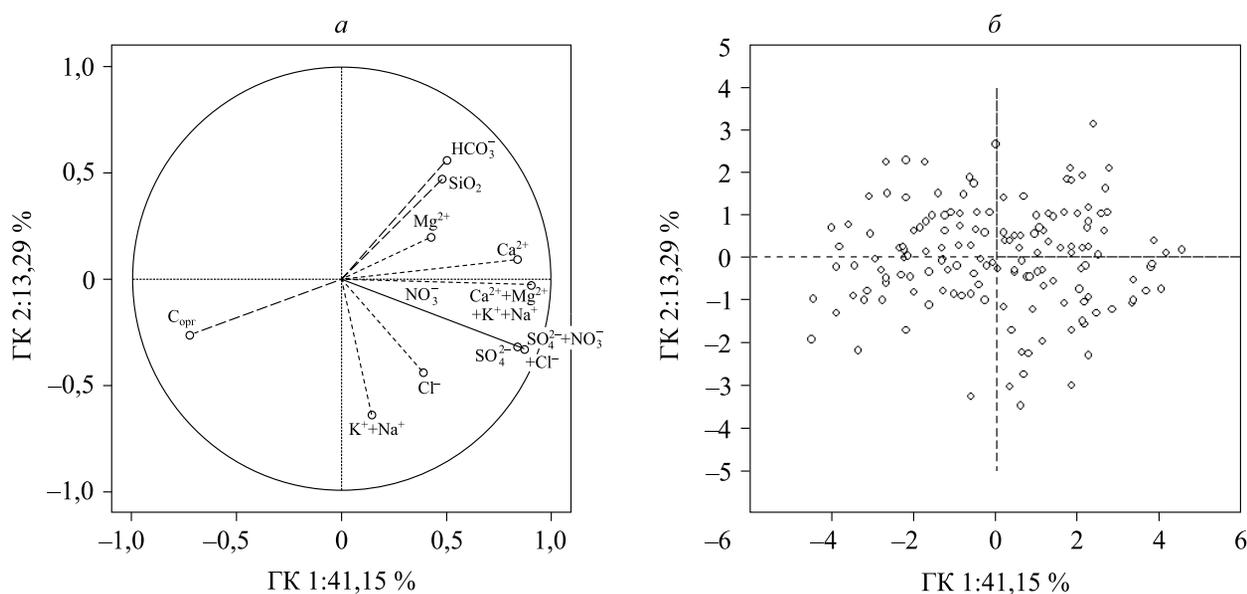


Рис. 1. Факторы, определяющие химический состав вод рек бассейна оз. Байкал (а) и его варьирование в пробах воды (б).

состав вод, заключается в изменении уровня грунтовых вод и воды в русле. Физический смысл второй главной компоненты (ГК2) состоит в изменении площади распространения подземных вод, питающих реку. Различия в химических свойствах грунтов и пород по вертикали обуславливают разброс точек проб вдоль ГК1, а по горизонтали — вдоль ГК2 (см. рис. 1, б). Это дает основание для использования $C_{орг}$ и $Ca + Mg + K + Na$ в качестве трассеров составляющих стока. Коэффициенты уравнения регрессии (рис. 2), связывающие концентрации $C_{орг}$ и $Ca + Mg + K + Na$, в первом и последнем членах ранжированного ряда рек различаются в три с лишним раза, что позволяет использовать величины $C_{орг}/(Ca + Mg + K + Na)$ в качестве показателя группировки вод по степени их органиченности или минералогенности. Такая группировка согласуется с выделением типов геохимических ландшафтов по степени биогенности (интенсивности биологического круговорота) [19].

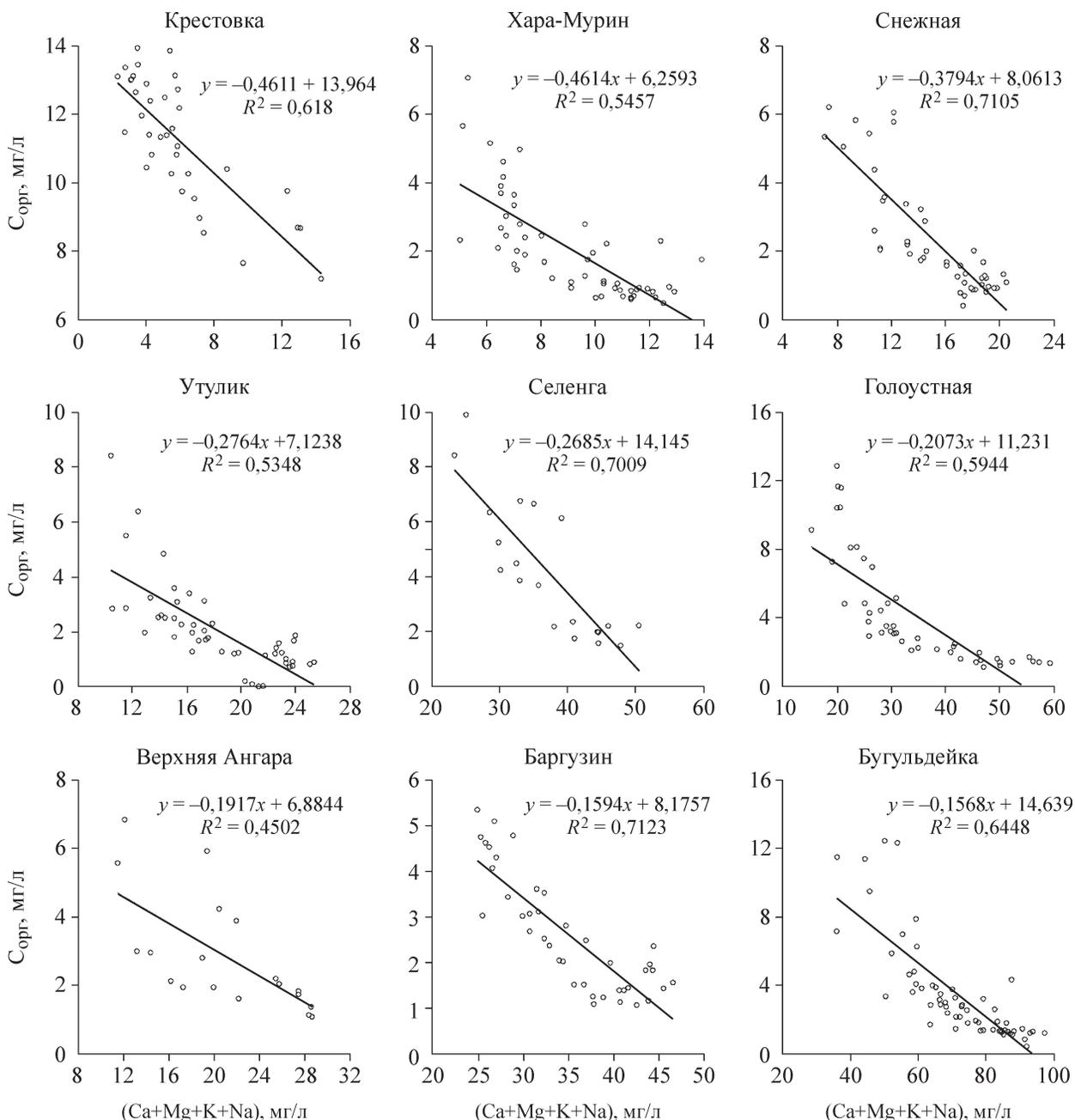


Рис. 2. Зависимости между содержанием органического углерода ($C_{орг}$) и содержанием щелочных и щелочноземельных металлов ($Ca + Mg + K + Na$) в водах рек бассейна оз. Байкал.

Исследование внутригодовой динамики отношения $C_{\text{орг}}/(Ca + Mg + K + Na)$ показало, что график его изменения (хемограф) повторяет график расхода воды (гидрограф) и может быть использован как его аналог: коэффициент корреляции между изменениями расхода воды (Q) и $C_{\text{орг}}/(Ca + Mg + K + Na)$ близок к единице (рис. 3). Соответственно, хемограф можно схематично расчленить, подобно тому как это делают с гидрографом [20], и выделить на нем поверхностный, почвенно-грунтовой и глубокий подземный стоки (см. рис. 3). В отличие от гидрографа, площадь фигур составляющих стока на хемографе не пропорциональна их вкладу в сток (площади всей фигуры под хемографом). Тем не менее концентрации $C_{\text{орг}}$ и $(Ca + Mg + K + Na)$, наблюдаемые в сроки максимальных вкладов поверхностного, почвенно-грунтового и подземного стоков (см. рис. 3), можно использовать в качестве координат соответствующих вершин треугольника смешения (рис. 4). Существование различных соотношений между органической (поверхностной), минералогенной (подземной) и органоминеральной (почвенной) составляющими стока в разных реках (см. рис. 4) подтверждает возможность группировки вод по величине $C_{\text{орг}}/(Ca + Mg + K + Na)$.

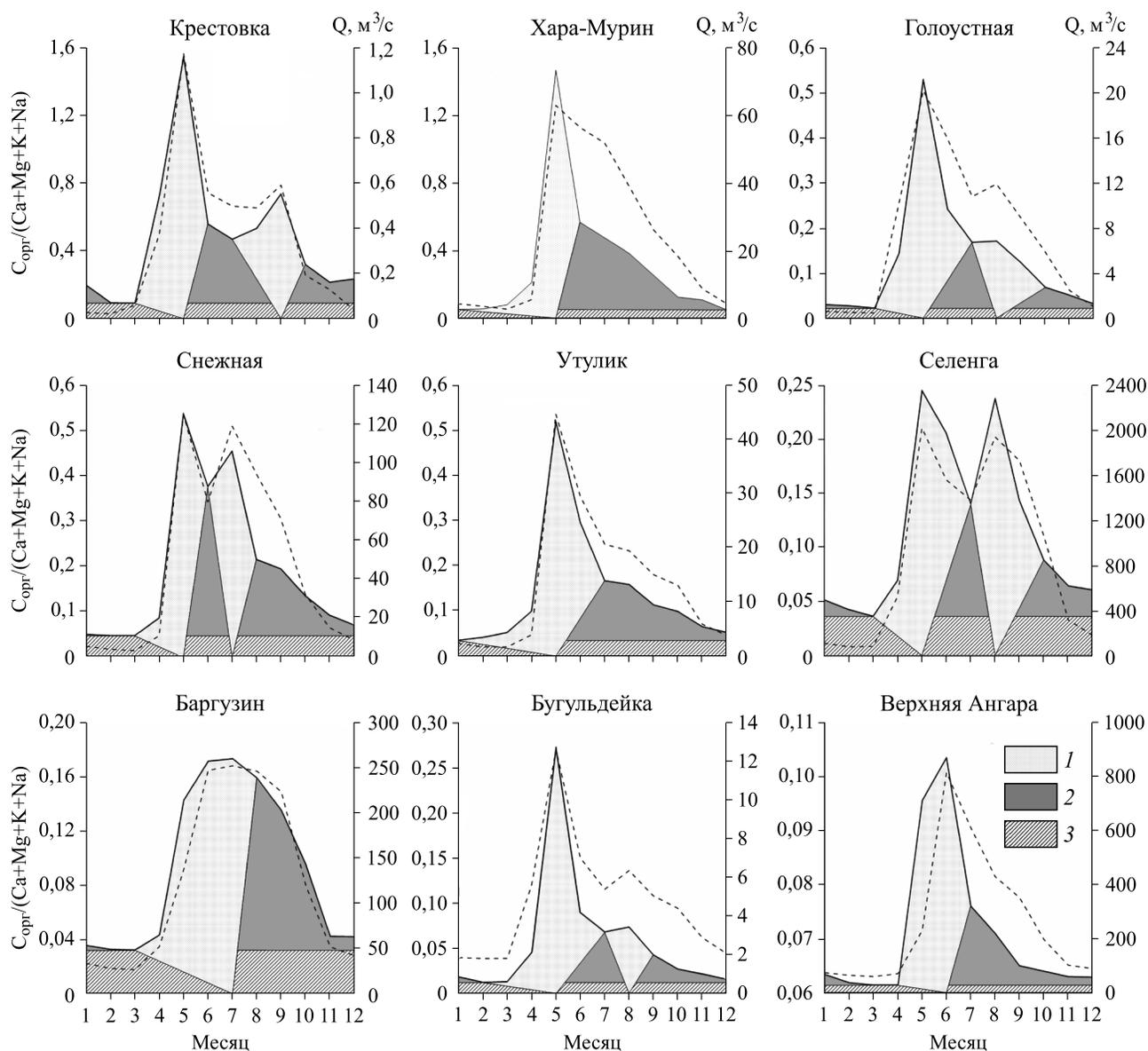


Рис. 3. Зависимости между хемографами ($C_{\text{орг}}/(Ca + Mg + K + Na)$) (сплошная линия) и гидрографами ($Q, \text{ м}^3/\text{с}$) (штриховая линия) стока рек бассейна оз. Байкал.

Сток: 1 — поверхностный, 2 — почвенно-грунтовой, 3 — подземный.

Среди оставшихся и коррелирующих друг с другом компонентов раствора наибольший разброс величин коэффициентов регрессии наблюдается для концентраций суммы анионов сильных кислот (кислотности) и гидрокарбонат-иона (щелочности). В ранжированном ряду рек они изменяются пятикратно (рис. 5). Это позволяет использовать отношение $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ в качестве показателя для группировки вод по степени кислотности или щелочности, что согласуется с принципом выделения классов геохимических ландшафтов [19]. Исследование внутригодовой динамики величины $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ показало возможность ее применения в качестве показателя происхождения растворенного вещества. Максимумы $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ у всех рек приуро-

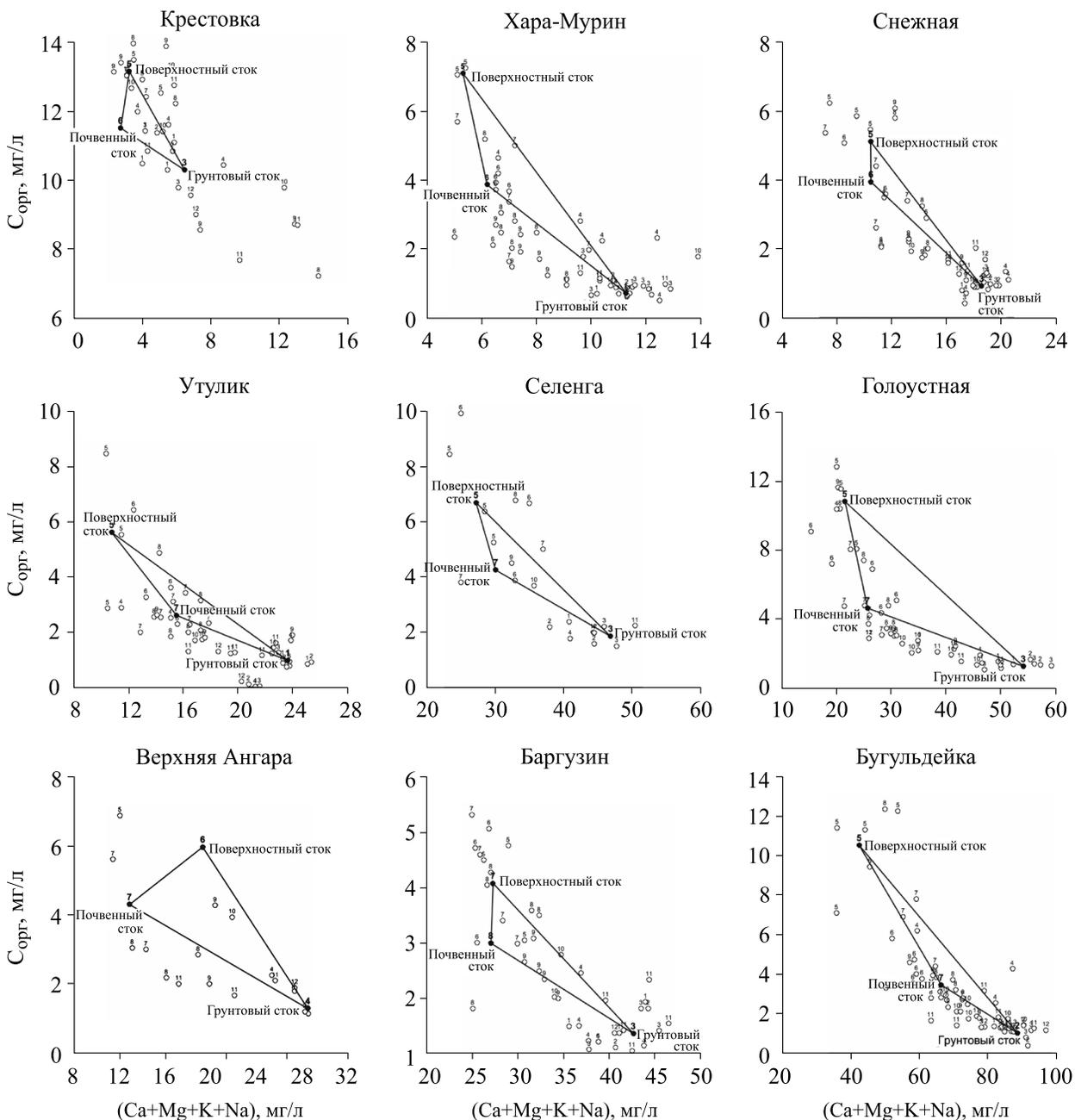


Рис. 4. Диаграммы смешения составляющих стока (число над точкой — месяц отбора пробы).

Месяцы над вершинами треугольника соответствуют месяцам пиков составляющих стока на рис. 3. Нахождение точки-пробы внутри треугольника означает вклад в нее всех трех составляющих стока, нахождение точки за пределами треугольника — вклад составляющих, ограничивающих прилежащую к точке сторону треугольника.

ченны к максимумам расхода воды, когда источниками растворенного вещества выступают почва и атмосфера (рис. 6). Минимальные значения величин $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ совпадают с минимальными значениями расхода воды в период грунтового питания, когда источником вещества являются горные породы. Хотя в качестве трассеров источников растворенного вещества $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)$ и HCO_3^- использоваться не могут, для этой цели их можно заменить отношением изотопов стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Низкие отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($<0,710$) свойственны карбонатным породам, высокие ($>0,714$) — силикатным [21]. Промежуточными значениями могут характеризоваться смеси продуктов их разрушения.

С целью классифицирования была оценена статистическая достоверность различий между средними величинами показателей органогенности и щелочности рек по критерию Стьюдента (при уров-

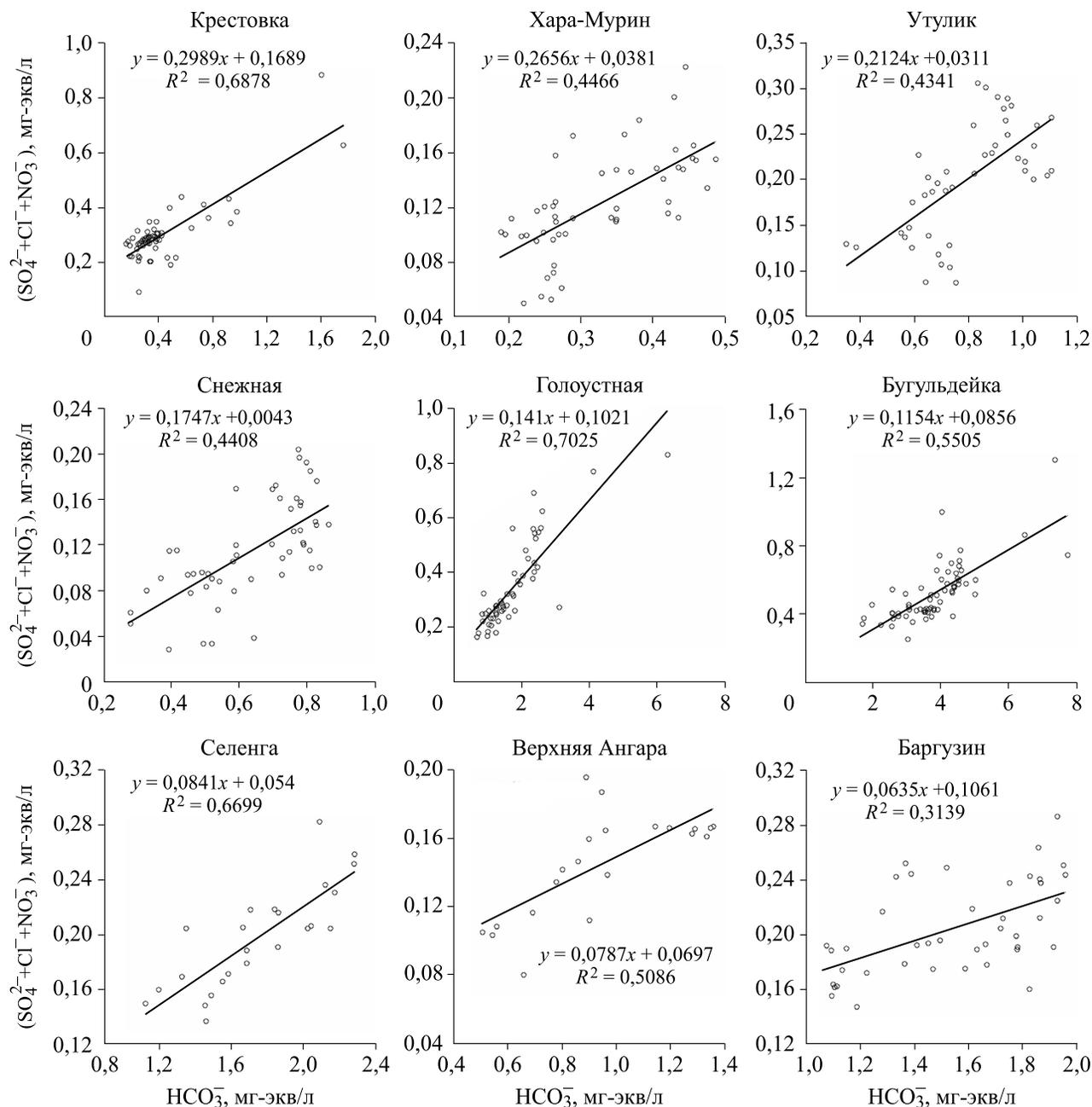


Рис. 5. Зависимости между содержанием гидрокарбонат-иона (HCO_3^-) и содержанием анионов сильных кислот ($\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$) в водах рек бассейна оз. Байкал.

не значимости 5 %). В результате оценки по степени органогенности выделены три категории вод. К первой отнесены воды Крестовки и Хара-Мурина (средние величины показателя — 0,50 и 0,41 соответственно), ко второй — воды Голоустной, Снежной и Утулика (0,26, 0,24 и 0,18), к третьей — Селенги, Баргузина, Бугульдейки и Верхней Ангары (0,10, 0,09, 0,07 и 0,07). Эти категории мы назвали органогенными, органоминеральными и минералогенными водами соответственно. Выявленные различия между категориями рек объясняются, с одной стороны, уменьшением доли поверхностного стока и увеличением подземного в направлении от Крестовки к Верхней Ангаре, а с другой — химическим составом пород и органического вещества почв водосборного бассейна. Бассейны Крестовки и Хара-Мурина сложены преимущественно кислыми бескарбонатными породами, обуславливающими низкую растворимость минерального вещества почв и высокую растворимость гумусовых соединений. В бассейнах остальных рек увеличивается присутствие карбонатных пород, характеризующихся высокой растворимостью и превращающих гумусовые кислоты в нерастворимые кальциевые соли. Широкая распространенность легкорастворимых пород в бассейне Бугульдейки ставит ее в один ряд с крупными реками, такими как Селенга, Баргузин и Верхняя Ангара.

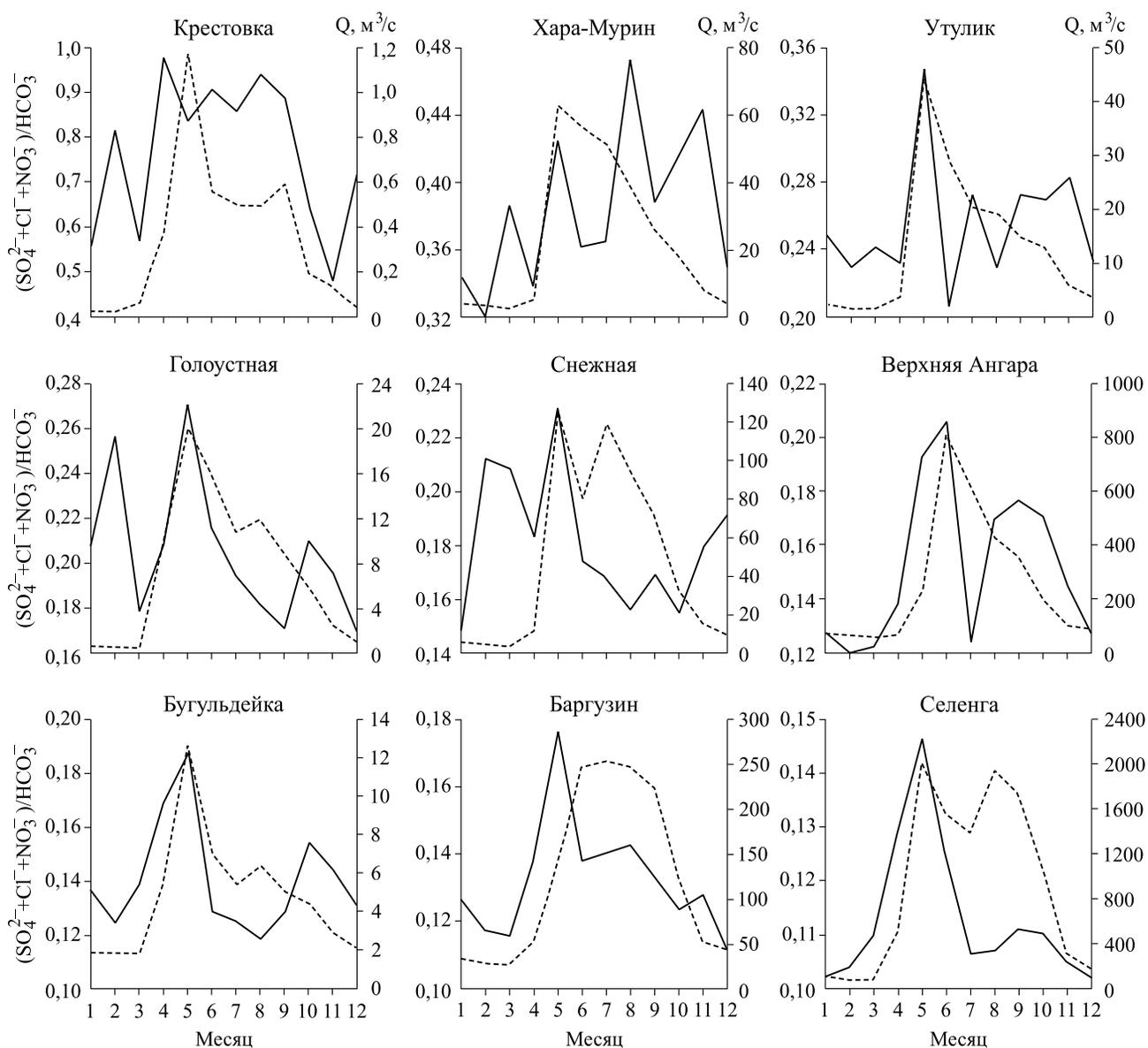


Рис. 6. Зависимости между показателями кислотности ($(SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-) / HCO_3^-$) (сплошная линия) и гидрографами ($Q, m^3/c$) (штриховая линия) стока рек бассейна оз. Байкал.

По степени щелочности также были выделены три категории вод. К первой отнесены воды Крестовки и Хара-Мурина (средние величины показателя — 0,71 и 0,42 соответственно), ко второй — Утулика, Голоустной, Снежной, Верхней Ангары, Бугульдейки и Баргузина (0,22, 0,20, 0,18, 0,15, 0,15 и 0,15), к третьей — Селенги (0,09). Эти категории можно условно назвать водами кислотного, среднего и щелочного состава. Как и в случае с показателем органогенности, выявленные различия связаны с составом дренируемых пород и развитых на них почв. Воды Верхней Ангары, Баргузина и Селенги, в бассейнах которых широко распространены карбонатные породы, характеризуются низкими значениями показателя. Для них также характерно более низкое содержание изотопа ^{87}Sr [22] по сравнению с Хара-Мурином и Снежной, стекающими по северному макросклону хр. Хамар-Дабан, где распространённость карбонатных пород невелика [23]. Присутствие карбонатных пород в бассейнах малых рек Утулик, Голоустная и Бугульдейка также является причиной их включения в категорию рек среднего состава вместе с главными притоками Байкала. Данные о содержании изотопов стронция в их водах отсутствуют. Река Снежная по площади бассейна и длине русла занимает пограничное положение между малыми и крупными реками, и ее включение в ту же группу обусловлено присутствием карбонатных пород в водосборном бассейне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные показатели комплексно отражают условия формирования вод, поскольку устанавливают связь между их химическим составом, происхождением растворенного вещества и гидрологическим режимом. Наибольшими величинами $C_{\text{орг}}/(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na})$ и $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ характеризуются воды малых рек, а наименьшими — крупных. Воды малых рек, в бассейнах которых широко распространены легкорастворимые породы, по выявленным показателям сходны с водами больших рек. Меньшая органогенность и кислотность крупных рек объясняются меньшей долей поверхностной составляющей в стоке и большей протяженностью путей добегания воды с подземным стоком. Значительное расстояние обеспечивает длительный контакт вод с минеральным веществом и, следовательно, большее его содержание в воде. Кроме того, чем обширнее площадь водосборного бассейна, тем выше вероятность присутствия легкорастворимых карбонатных пород, обогащающих воды рек щелочным минеральным веществом. Обнаруженные различия между водами указывают на возможность их классифицирования по выявленным показателям. Критерием выделения групп вод самой крупной таксономической категории (например, семейств) может служить показатель органогенности, так как он одновременно отражает наиболее значимые гидрологические и географические характеристики реки — соотношение составляющих стока и размер водосборного бассейна. Критерием выделения групп вод в пределах семейства (например, типов) может служить показатель кислотности, комплексно отражающий химический состав дренируемых почв и горных пород. Согласно полученным данным, к семействам органогенных и органоминеральных вод бассейна Байкала относятся воды кислотного и среднего типов соответственно. В семейство минералогенных входят воды двух типов — среднего и щелочного.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 0345–2016–0008) и при поддержке правительства Иркутской области и Российского фонда фундаментальных исследований (17-45-388054, 17-29-05068).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулин В. А. Воды нефтяных месторождений в системе природных вод. — М.: Гостоптехиздат, 1946. — 95 с.
2. Christophersen N., Hooper R. P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem // *Water Resources Research*. — 1992. — Vol. 28. — P. 99–107.
3. McGlynn B. L., McDonnell J. J. Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics // *Water Resources Research*. — 2003. — Vol. 39, Issue 4 [Электронный ресурс]. — <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002WR001525/epdf> (дата обращения 23.05.2017).
4. Inamdar S., Mitchell M. J. Hydrologic and topographic controls on storm-event exports of dissolved organic carbon (DOC) and nitrate across catchment scales // *Water Resources Research*. — 2006. — Vol. 42, Issue 3 [Электронный ресурс]. — <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005WR004212/epdf> (дата обращения 23.05.2017).
5. Petelet-Giraud E., Negrel P. Geochemical flood deconvolution in a Mediterranean catchment (Herauld, France) by Sr isotopes, major and trace elements // *Journ. of Hydrology*. — 2007. — Vol. 337 (1–2). — P. 224–241.

6. Land M., Ingri J., Andersson P. S., Ohlander B. Ba/Sr, Ca/Sr and Sr-87/Sr-86 ratios in soil water and groundwater: implications for relative contributions to stream water discharge // Applied Geochemistry. — 2000. — Vol. 15, Issue 3. — P. 311–325.
7. Derry L. A., Pett-Ridge J. C., Kurtz A. C. Ge/Si and Sr-87/Sr-86 tracers of weathering reactions and hydrologic pathways in a tropical granitoid system // Journ. of Geochemical Exploration. — 2006. — Vol. 88 (1–3, SI). — P. 271–274.
8. Negrel P., Fouillac C., Brach M. A strontium isotopic study of mineral and surface waters from the Cezallier (Massif Central, France): implications for mixing processes in areas of disseminated emergences of mineral waters // Chemical Geology. — 1997. — Vol. 135, Issue 1–2. — P. 89–101.
9. Hogan J. F., Blum J. D. Tracing hydrologic flow paths in a small forested watershed using variations in (87)Sr/(86)Sr, [Ca]/[Sr], [Ba]/[Sr] and delta O-18 // Water Resources Research. — 2003. — Vol. 39 (10). — 1282 p. [Электронный ресурс]. — <http://www.agu.org/journals/wr/wr0310/2002WR001856/9> (дата обращения 06.05.2017).
10. Liu F., Williams M. W., Cain N. Source waters and flow paths in the alpine catchment, Colorado Front Range, United States // Water Resources Research. — 2004. — Vol. 40 [Электронный ресурс]. — <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004WR003076/epdf> (дата обращения 23.05.2017).
11. Robson A., Neal C. Hydrograph separation using chemical techniques: an application to catchments in mid-wales // Journ. of Hydrology. — 1990. — Vol. 116. — P. 345–363.
12. Billet M. F., Cresser M. S. Evaluation of the use of soil ion exchange properties for predicting streamwater chemistry in upland catchments // Journ. of Hydrology. — 1996. — Vol. 186. — P. 375–394.
13. Семёнов М. Ю., Зимник Е. А. Использование химического состава поверхностных вод для оценки вкладов источников растворенного вещества // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 2. — С. 132–139.
14. Семёнов М. Ю., Снытко В. А. Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // Докл. РАН. — 2013. — Т. 453, № 6. — С. 686–689.
15. Вотинцев К. К., Глазунов И. В., Толмачева А. П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. — М.: Наука, 1965. — 494 с.
16. Богданов В. Т. Формирование гидрохимического режима Северного Байкала. — Новосибирск: Наука, 1978. — 135 с.
17. Скопинцев Б. А. Органическое вещество в природных водах: Труды Государственного океанографического института. — Л.: Гидрометеиздат, 1950. — Вып. 17 (29). — 290 с.
18. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики / Под ред. И. А. Зильберштейна, И. С. Столярчука. Т. 16: Ангаро-Енисейский район; вып. 3: Забайкалье — Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 178 с.
19. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. — М.: Астрейя-2000, 1999. — 610 с.
20. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты. — Л.: Гидрометеиздат, 1946. — 480 с.
21. Кузьмин М. И., Дриль С. И., Сандимиров И. В., Сандимирова Г. П., Гелетий В. Ф., Чуканова В. С., Калмычков Г. В., Бычинский В. А. Вариации изотопного состава Sr в осадочном разрезе оз. Байкал // Докл. РАН. — 2007. — Т. 412, № 4. — С. 530–534.
22. Falkner K., Church M., Measures C. I., Lebaron G., Thouron D., Jeande C., Stordal M. C., Gill G. A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.-H. Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs // Limnology and Oceanography. — 1997. — Vol. 42 (2). — P. 329–345.
23. Семёнов М. Ю., Сандимирова Г. П., Коровякова И. В., Троицкая Е. С., Храпцова Т. И., Донская Т. В. Сравнительная оценка скоростей внутриводного выветривания в ландшафтах северного макросклона хребта Хамар-Дабан // Геология и геофизика. — 2005. — № 1. — С. 50–59.

Поступила в редакцию 6 июня 2017 г.