

УДК 556.06:551.482.212

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОНОВЫХ И АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Савичев Олег Геннадьевич,

д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

Нгуен Ван Луен,

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: Luyennv@yahoo.com

Актуальность исследования определяется необходимостью объективного определения фоновых и аномальных гидрогеохимических показателей как при проведении геохимических поисков полезных ископаемых, так и при оценке геоэкологического состояния водных объектов и их водосборов. Применяемые на практике методики основаны на использовании методов математической статистики и теории вероятностей, но недостаточно обоснованы с точки зрения физического смысла исследуемых процессов. Вследствие этого в ряде случаев возрастает объём и стоимость полевых и лабораторных работ без адекватного увеличения эффективности исследований.

Цель исследования: разработка и обоснование методики определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей на основе анализа взаимосвязей между водным стоком и химическим составом вод.

Методы исследования: географо-гидрологический и статистические методы, методы химической термодинамики.

Результаты и выводы. Выполнен анализ взаимосвязей между гидрогеохимическими и гидрологическими показателями. На основе результатов разработана имитационно-статистическая модель формирования химического состава поверхностных и подземных вод и предложена методика определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей. Проведена её апробация по данным гидрологическим и гидрогеохимическим наблюдениям в водосборных бассейнах средних рек Сибири (Российская Федерация) с привлечением гидрогеохимических материалов, полученных в северной части Вьетнама. Показано, что: 1) гидрогеохимические показатели в общем случае подчиняются логнормальному распределению вероятностей; 2) математическое ожидание концентрации вещества, аппроксимируемое средним геометрическим, может рассматриваться как «фоновое» значение, которое отражает условно равновесное состояние системы «вода–порода» в статистически однородных условиях; 3) стандартное отклонение концентрации вещества является линейной функцией произведения соответствующего среднего геометрического значения и коэффициента вариации расходов воды. Практическое определение фоновых концентраций растворённых веществ сводится к определению доверительного интервала для среднего геометрического, а аномальных концентраций – по «правилу двух сигм» для логнормального распределения вероятностей. При этом: 1) среднее геометрическое тем больше, чем меньше среднееголетний модуль водного стока; 2) границы интервала расширяются при увеличении вариации водного стока (суммарного или подземного).

Ключевые слова:

Фоновые концентрации, аномальные концентрации, гидрогеохимические показатели, водный сток, имитационно-статистическая модель химического состава вод.

Введение

Объективное определение фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей – одна из важнейших задач гидрохимии, геохимических поисков полезных ископаемых и геоэкологии. Разработке соответствующих методов и их теоретическому обоснованию посвящено большое количество работ, среди последних из которых следует отметить [1–7]. На практике в последние десятилетия обычно применяется подход, в соответствии с которым: 1) по результатам статистического анализа или априори принимается гипотеза о нормальном или логнормальном законе; 2) для участков без явного антропогенного влияния рассчитывается среднее арифметическое C_a или среднее геометрическое C_g соответственно; 3) выполняется оценка заданного доверительного интервала

для C_a или C_g ; 4) в качестве фонового значения C_b принимается C_a или C_g , либо верхняя граница доверительного интервала; 5) аномальными считаются значения, выходящие за пределы доверительного интервала; 6) проводится комплексная оценка превышения концентраций веществ в иных водных объектах относительно установленного фона [8–11].

При всей простоте и логичности этой схемы не вполне очевиден её физический смысл, отражающий взаимосвязи между компонентами окружающей среды, гидрологическими и геохимическими процессами. Как следствие, объём гидрогеохимических работ может быть существенно завышен при том, что полученные материалы далеко не всегда убедительны и однозначны. В связи с этим авторами в рамках расширения ранее выполнен-

ных исследований [12–15] был проведён анализ взаимосвязей между гидрологическими и гидрохимическими показателями, на основе которого предложена методика определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей. Апробация этой методики проведена по материалам гидрогеохимических и гидрологических наблюдений в Сибири (Российская Федерация) и Северном Вьетнаме.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим систему «вода–порода», сформировавшуюся под влиянием природных и антропогенных факторов в течение статистически однородного периода. Состояние этой системы в целом неравновесно, но отдельные её компоненты квазиравновесны. Время изменения термодинамических параметров таких компонентов больше времени релаксации в них, но существенно меньше времени, за которое устанавливается равновесие во всей системе [3, 16]. При этом в отдельном компоненте (или комплексе компонентов) протекает N_s химических реакций, которые можно объединить в одну суммарную реакцию в соответствии с выражением:

$$\Delta G_T = RT \left(\sum_{i=1}^{N_s} \ln \Pi_i - \ln K_T^0 \right), \quad (1)$$

где ΔG_T и K_T^0 – общее изменение свободной энергии системы и суммарная константа равновесия при заданной температуре T ; Π_i – суммарное произведение активностей компонентов, участвующих в каждой из реакций (общее количество веществ – N_s+1). При использовании уравнения Дебая–Хюккеля для описания связей между активностью иона и его концентрацией уравнение (1) для концентрации искомого вещества C_p может быть упрощено и приведено к виду [12]:

$$\ln C_p \approx b_0 - \sum_j^{N_s} b_j \ln C_j, \quad (2)$$

где b_0, b_j – константы. Концентрация C_x может рассматриваться как случайная величина, причём параметр N_s в общем случае принимает достаточно большие значения. С учётом этого можно предположить, что имеет место нормальное распределение вероятностей $\ln C$ с математическим ожиданием $E(\ln C)$ и дисперсией $\sigma^2(\ln C)$, причём $E(\ln C)$ рассчитывается как среднее арифметическое для выборки из N_p значений $\ln C$ (N_p – количество фактически учитываемых веществ; как правило, $N_p < N_s$). Соответственно, распределение вероятностей концентраций C в изолированной системе «вода–порода» ориентировочно можно рассматривать как логнормальное с дисперсией $\sigma^2(c)$ и математическим ожиданием, равным среднему геометрическому C_g и связанным со средним арифметическим C_a соотношением [17]:

$$E(\ln C) = \ln(C_a) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma^2(C)}{C_a^2} + 1 \right). \quad (3)$$

Для подтверждения этой гипотезы была выполнена проверка согласия эмпирической и теоретических кривых распределения вероятностей суммы главных ионов Σ_{mi} ($\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{Cl}^-$) в водах средних рек Сибири (реки с площадью водосбора 2000–50000 км², отражающие зональные условия формирования стока), подтверждающая возможность использования подобного подхода [14]. Проверка проводилась согласно [18] с использованием критерия Колмогорова–Смирнова mKS и $n\omega^2$ при уровне значимости 5 %.

$$n\omega^2 = \sum_{i=1}^N (P_{e,i} - P_{t,i})^2, \quad (4)$$

$$mKS = \max_{i=1, \dots, N} |P_{e,i} - P_{t,i}| \sqrt{N}, \quad (5)$$

где $P_{e,i}$ и $P_{t,i}$ – эмпирическая и теоретическая вероятности; N – объём выборки. В результате наилучшее соответствие (минимальные фактические значения mKS и $n\omega^2$ меньше критических значений) было установлено именно для логнормального распределения, что согласуется с известными выводами ряда авторов [9] о логнормальном распределении многих химических элементов в горных породах (табл. 1).

Таблица 1. Результаты проверки согласия эмпирической и теоретических кривых распределения вероятностей суммы главных ионов в водах средних рек Сибири [14]

Table 1. Results of consent check of the empirical and theoretical curves of probabilities distribution of the sum of the main ions in river waters of Siberia [14]

Природная зона Natural zone	Среднее геометрическое (объём выборки) Geometrical mean (sample volume)	Критерий согласия (4, 5) Fitting criterion (4, 5)	Значения критериев, полученных для закона распределения вероятностей Values of the criteria obtained for the probability distribution law			
			нормальный normal	логнормальный lognormal	гамма gamma	экспоненциальный exponential
тундра tundra	24,9 (27)	$n\omega^2$	1,06	0,26	2,50	0,47
		mKS	1,63	1,09	3,10	1,33
лесотундра forest tundra	122,5 (22)	$m\omega^2$	0,90	0,46	1,31	0,59
		mKS	1,93	1,48	2,12	1,43
тайга taiga	187,3 (1370)	$n\omega^2$	5,28	0,36	33,83	0,83
		mKS	3,99	1,39	9,13	1,78
лесостепь forest steppe	429,5 (212)	$n\omega^2$	0,44	0,17	1,62	4,32
		mKS	1,06	0,89	1,92	3,74
степь steppe	697,2 (63)	$n\omega^2$	0,16	0,07	7,77	0,93
		mKS	0,80	0,59	4,17	1,70
горные районы mountainous regions	97,8 (690)	$n\omega^2$	3,84	0,32	0,82	5,36
		mKS	0,76	0,29	0,29	0,84

Для описания изменений концентрации вещества во времени t относительно условно устойчивого состояния (с математическим ожиданием, равным C_0) в гидрохимических исследованиях достаточно часто используется однородное дифференциальное уравнение (6), а в гидрологии для изменений расхода воды Q – уравнение (7). Используя так называемое «цепное правило» дифференцирования сложной функции, это позволяет записать уравнение (8):

$$\frac{dC}{dt} = k_c C, \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{dt} = k_Q Q, \quad (7)$$

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{k_c}{k_Q} \frac{C}{Q}, \quad (8)$$

где k_c и k_Q – значения удельной скорости изменения концентрации вещества и расхода воды соответственно. Величина k_c обычно рассматривается как экспоненциальная или степенная функция температуры воды и/или скорости течения [10, 19, 20]. Величина k_Q в общем случае является нелинейной функцией расхода воды, хотя часто принимается как константа [6, 17]. С учётом этого представим отношение k_c и k_Q в виде нелинейной функции от расхода воды (9), что позволяет в результате интегрирования (8) получить уравнение (10).

$$\frac{k_c}{k_Q} = k_0 + k_1 \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{k_2}, \quad (9)$$

$$Y = X^{k_0} \exp \left(\frac{k_1}{k_2} (X^{k_2} - 1) \right), \quad (10)$$

где k_0, k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты; $Y=C/C_0$ и $X=Q/Q_0$ – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды; C_0 и Q_0 – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды; математическое ожидание величин Y и X равно 1; стандартное отклонение X представляет собой коэффициент вариации расхода воды $Cv(Q)$.

Используя разложение в ряд Тейлора (до второй производной Y'' с учётом рекомендаций [21]) и принимая математическое ожидание для расхода воды равным его среднему арифметическому, получим выражение для среднего арифметического C_a и стандартного отклонения $\sigma(C)$ в виде:

$$\frac{C_a}{C_0} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{k_0(k_0 - 1) + k_0 k_1 + k_1^2}{k_1(k_0 + k_2 - 1) + k_1^2} \right) Cv^2(Q), \quad (11)$$

$$\sigma(C) \approx |k_0 + k_1| C_0 Cv(Q). \quad (12)$$

Очевидно, что (с учётом (3, 11) и приближения $\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$) величина C_0 в общем случае лучше аппроксимируется не средним арифметическим, а, как и в случае длительного контакта воды и породы в отсутствие выраженного течения, средним геометрическим (то есть $C_0 \approx C_g$).

Апробация модели (10) проведена по данным совместных гидрологических и гидрохимических наблюдений на реках бассейна реки Обь (р. Андарма – с. Панычево; р. Бакчар – с. Гореловка; р. Большой Юган – с. Угут; р. Вах – с. Лобчинское; р. Верхняя Терсь – с. Осиновое Плёсо; р. Икса – с. Плотниково; р. Иня (нижняя) – с. Кайлы; р. Ишим – г. Петропавловск; р. Кенга – п. Центральный; р. Кеть – п. Максимкин Яр; р. Кия – г. Мариинск; р. Кондома – с. Кузедеево; р. Мрас-Су – г. Мыски; р. Обь – г. Калачинск; р. Пайдугина – с. Берёзовка; р. Парабель – с. Новиково; р. Песчаная – с. Точирино; р. Тайдон – п. Медвежка; р. Тара – с. Муромцево; р. Тобол – г. Кустанай; р. Тым – с. Напас; р. Уса – г. Междуреченск; р. Четь – с. Конторка; р. Чузик – с. Осипово; р. Шегарка – с. Бабарькино; р. Яя – пгт. Яя), а также р. Турухан – п. Янов Стан (левый приток реки Енисей, лесотундра). Количество использованных при расчётах проб совместных гидрологических и гидрохимических наблюдений – 983. Оценка параметров выполнена методом наименьших квадратов по линеаризованным рядам с предварительным выбором значения k_2 . В результате было получены следующие результаты: квадрат корреляционного отношения между фактическими и вычисленными значениями $R^2=0,63$ (критическое значение $R_k^2=0,36$ [22, 23]; $R^2 > R_k^2$); $k_0=-0,376 \pm 0,011$; $k_1/k_2=-0,010 \pm 0,002$. Параметр k_2 принят в размере $(-1,1)$ при условии достижения максимума R^2 . Фрагмент кривой связи Y и X представлен на рис. 1.

Таким образом, модель (10) может использоваться для объяснения материалов наблюдений, включая случаи, когда сумма главных ионов возрастает сначала одновременно с увеличением модулей водного стока M_Q (от истока реки до какого-либо створа), а затем (вплоть до устья) – обратно пропорционально M_Q . Например, подобное распределение отмечено для ряда малых горных рек, в частности, реки Актру в Российской Федерации (элемент речной системы «Актру–Чуя–Катунь–Обь») и малых водотоков в бассейне р. Хонгх во Вьетнаме [15, 24]. Однако чаще всего измерения и гидрохимические расчёты проводятся при значениях Y и X , соответствующих обратной степенной зависимости (рис. 1), когда экспоненциальной компонентой уравнения (10) можно пренебречь (рис. 2), что позволяет упростить выражение (12) для оценки стандартного отклонения концентраций веществ при отсутствии или недостаточности наблюдений.

В частности, для значений коэффициента вариации расходов воды изученных рек, полученных одновременно с измерением концентраций главных ионов (но при использовании среднепогодного стока именно этих водотоков), может быть использовано выражение $\sigma(C)=(0,348 \pm 0,009) C_g Cv(Q)$ при $R^2=0,59$. При этом отметим, что на практике обычно рассчитываются значения коэффициентов вариации характерных расходов воды (средних,

максимальных, минимальных заданной обеспеченности). В связи с этим уравнение (12) было приведено к виду (13) с учётом эмпирической формулы С.Н. Кривцова и М.Ф. Менкеля (по [25]), связывающей коэффициент вариации среднегодовых расходов воды со среднемноголетним модулем водного стока $M_{Q,a}$ и площадью водосбора F . В результате расчётная формула для определения стандартного отклонения суммы главных ионов в водах средних рек в бассейне Оби приобрела вид:

$$\sigma(C) \approx \frac{k_3 C_g}{F^{0,06} M_{Q,a}^{0,27}} \quad (13)$$

где k_3 – эмпирический коэффициент; для средних рек бассейна Оби $k_3=1,18470,106$ при $R^2=0,51$; F – в км², а $M_{Q,a}$ – в л/(с·км²).

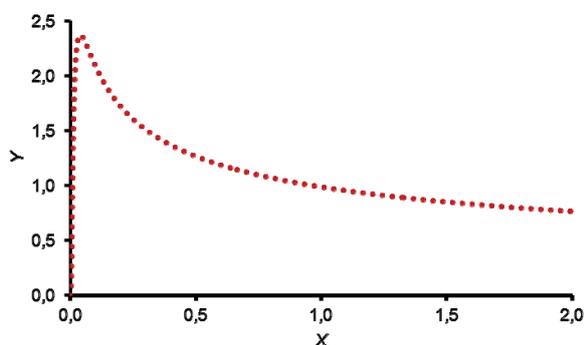


Рис. 1. Фрагмент кривой связи величин Y и X для средних рек в бассейне Оби; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

Fig. 1. Fragment of curve of relation between the parameters Y and X for the average rivers in the Ob river basin; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

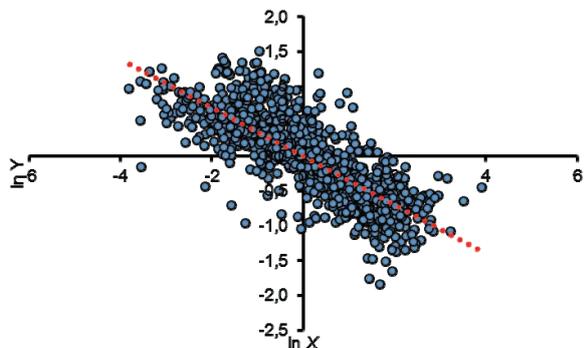


Рис. 2. Зависимость между модульными коэффициентами Y и X для средних рек в бассейне Оби; $\ln Y=(-0,348\pm 0,009)$ и $\ln X$; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

Fig. 2. Dependence between the parameters Y and X for the average rivers in the Ob river; $\ln Y=(-0,348\pm 0,009)$ и $\ln X$; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

Анализ структуры модели (10) и результатов её апробации показал, что наиболее значительные изменения химического состава вод (свыше 0,5 % по сравнению с предыдущим значением) приурочены к диапазону колебаний модулей водного стока до 0,5–1,0 л/(с·км²) с учётом специфики природных зон [13]. Так, изменения более 5 % наблюдаются при модулях водного стока менее:

0,03 л/(с·км²) – в лесостепи; 0,05 л/(с·км²) – в тайге; 0,04 – в горных районах. Это позволяет предположить, что базовые химические реакции и физико-химические процессы, определяющие основные особенности химического состава вод в соответствии с (1, 2), устанавливаются на стадии формирования склонового, подповерхностного и подземного стока. На стадии руслового стока перечень этих реакций, видимо, меняется в зависимости от скорости движения водных масс (например, в течение года), но уже не так значительно. Причём скорость течения, в свою очередь, зависит от шероховатости и уклонов поверхности (с учётом характерных значений этих параметров для разных природных зон). Вследствие этого при фиксированном модуле водного стока (в [13] было принято значение 1 л/(с·км²)) в зоне тайги время добегания и, соответственно, комплекс реакций и содержание растворённых солей в речных водах будут больше соответствующих показателей для горно-таёжных районов (за счёт меньших уклонов) и меньше, чем для лесотундры и тундры (из-за меньшей шероховатости водосборной поверхности).

Следующая важная задача – обоснование способа определения среднего геометрического значения при отсутствии гидрогеохимических наблюдений, необходимого при проведении гидрохимических расчётов и гидрогеохимических поисков полезных ископаемых. По мнению ряда авторов [5, 20, 26] и результатам анализа гидрогеохимических наблюдений в разных регионах Азии [12, 14], величины C_g и C_s , как и концентрации вещества в момент t , связаны с водным стоком, точнее – с его среднемноголетним значением. Характер этой зависимости может быть раскрыт следующим образом. Предположим, что, во-первых, работа, выполняемая геосистемой (под которой понимается обобщение социально-экономических, природных и природно-антропогенных экологических систем), пропорциональна геостоку (суммарному стоку воды, растворённых, коллоидных и взвешенных веществ, влекомых наносов, тепла, «живого» вещества), значительная часть которого представлена гидрохимическим стоком $G=CQ$. Во-вторых, при отсутствии изменений притока в геосистему вещества и энергии математическое ожидание геостока и его составляющей – гидрохимического стока G_0 с единицы площади водосбора F , не должны существенно меняться, то есть:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{G_0}{F} \right) = 0, \quad (14)$$

или

$$C_g \approx C_s \frac{M_{Q,s}}{M_{Q,a}}, \quad (15)$$

где $M_{Q,a}$ и $M_{Q,s}$ – среднее арифметическое модуля водного стока в настоящее время и в начале функционирования исследуемой геосистемы как единого целого; C_g и C_s – среднее геометрическое концентрации вещества, соответствующее $M_{Q,a}$ и $M_{Q,s}$.

В-третьих, предположим, что $M_{Q,s} = M_{Q,a}^z$, где z – эмпирический коэффициент. Следовательно, решение (14) можно записать:

$$C_g \approx C_s \cdot M_{Q,a}^{z-1} \quad (16)$$

Применительно к распределению суммы главных ионов в водах изученных 28 рек получено: $R^2=0,55$; $z-1=-0,579 \pm 0,081$; $C_s=383,0$ мг/дм³ (в диапазоне от 324,3 до 452,4 мг/дм³). Выражение (15) по смыслу сопоставимо с коэффициентами водной миграции в интерпретации А.И. Перельмана [9], но имеет более строгое обоснование и может использоваться при сравнении гидрохимических условий в различных водосборных бассейнах (как поверхностных, так и подземных).

Математическое ожидание концентрации вещества, отражающее условно равновесное состояние системы «вода–порода», которое сформировалось под влиянием преимущественно природных факторов, может рассматриваться как «природный фон», а под влиянием природно-антропогенных факторов – как «природно-антропогенный фон». Допустимость этого определения подтверждается при сопоставлении средних геометрических значений суммы главных ионов в водах 28 средних рек Сибири и результатов термодинамического моделирования, направленного на определение активности компонентов раствора, при которых достигается минимум энергии Гиббса. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса Solution [27]. В качестве исходного состава вод приняты средние арифметические значения рН, температуры воды, бихроматной окисляемости (БО) (по данным статистического анализа при $R^2 > 0,36$ концентрация фульвокислот принята в размере 31,2 % от величины БО, концентрация гуминовых кислот – 8,3 %), концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Si , Fe (для суммы главных ионов характерно соотношение $C_g \leq 0,861 \leq C_a$), а получены значения, составляющие в среднем 84 % от среднего геометрического (рис. 3).

С учётом указанного выше определения расчёт фоновой концентрации C_b сводится к: 1) дифференциации веществ по генезису посредством расчёта соотношения суммарного поступления вещества по сосредоточенным (S_c) и распределённым по водосбору источникам загрязнения (S_d) к гидрохимическому стоку G ; к категории «природных» целесообразно отнести вещества, для которых величина $(S_c + S_d)/G$ меньше 5 %, к «преимущественно природным» – при $5 \% \leq (S_c + S_d)/G \leq 20 \%$ [13]; к «природно-антропогенным» – в прочих случаях (границные значения 5 и 20 % выбраны, исходя из допустимых невязок балансовых расчётов [19]); 2) оцениванию доверительного интервала для среднего геометрического:

$$\left[C_g \exp(-\beta) \frac{\sigma(\ln C)}{\sqrt{N}}; C_g \exp(\beta) \frac{\sigma(\ln C)}{\sqrt{N}} \right], \quad (17)$$

где N – объём выборки при наличии гидрохимических наблюдений, а при их отсутствии – объём вы-

борки, использованной для расчёта $M_{Q,a}$ исследуемой реки или реки-аналога; β – квантиль нормального распределения с вероятностью $\alpha/2$; α – уровень значимости. При допущении, что уровень значимости пропорционален минимальной погрешности измерения расходов воды (как важного фактора, определяющего изменчивость концентраций), принимается $\alpha=5\%$, а $\beta=1,96$. С учётом этого нижняя граница определения среднего геометрического суммы главных ионов в исследуемых речных водах в целом составляет 80 % от величины C_g , что примерно и соответствует условно равновесному состоянию (в среднем – 94,4 % от C_{eq}).

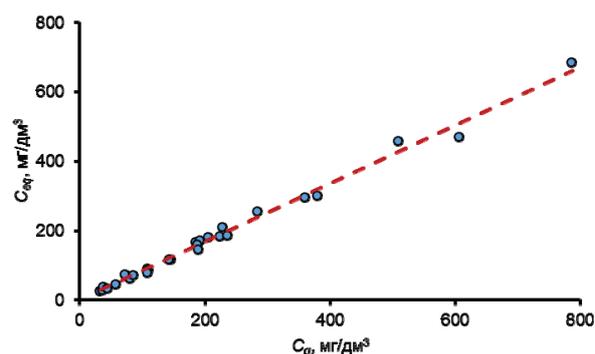


Рис. 3. Соотношение средних геометрических значений C_g и результатов термодинамического моделирования C_{eq} ; исходный состав: средние арифметические значения; результат моделирования: сумма главных ионов близка к среднему геометрическому значению при уравнении связи $C_{eq} = (0,840 \pm 0,010)C_g$; $R^2 = 0,91$

Fig. 3. Ratio of average geometrical values C_g and results of thermodynamic modelling C_{eq} ; initial structure: average arithmetic values; result of modelling: the sum of the main ions is close to average geometrical value at the constraint equation $C_{eq} = (0,840 \pm 0,010)C_g$; $R^2 = 0,91$

Указанная выше процедура является итерационной и предполагает возможность повторного определения среднего геометрического и его доверительного интервала после исключения аномальных значений, под которыми, с учётом логнормального распределения C , понимаются концентрации веществ, выходящие за пределы интервала:

$$[C_g \exp(-\beta\sigma)(\ln C); C_g \exp(\beta\sigma)(\ln C)]. \quad (18)$$

Проверка этого подхода по данным рек Сибири показала, что нижняя граница диапазона (18) составляет примерно на 7 % меньше соответствующих минимальных значений суммы главных ионов, а верхняя граница – в среднем на 26 % выше максимальных значений.

Охарактеризованная выше имитационно-статистическая модель (10, 12, 13, 16–18) позволяет в общих чертах охарактеризовать временные изменения химического состава природных вод, связанные с соответствующими колебаниями водного стока. Дополнительная информация о распределении средних концентраций по длине водотока или территории водосбора может быть получена в результате решения упрощённого уравнения распро-

странения вещества преимущественно за счёт адвективного переноса:

$$\frac{1}{Q_0} \frac{\partial(C_0 Q_0)}{\partial x} = -k_c C_0 \frac{w_0}{Q_0}, \quad (19)$$

где x – пространственная координата; w_0 – математическое ожидание площади сечения потока. Если предположить, что водосбор реки площадью F можно представить как часть кругового кольца внутри сектора с центральным углом γ и радиусом L , а движением водных масс происходит от дуги сектора по направлению к центру условной окружности, то решение уравнения (19) принимает вид:

$$C_0 = C_{0,u} \frac{Y_{0,u}}{Y_0} \left(\frac{F_u}{F} \right)^{1+\eta}, \quad (20)$$

где C_0 и Y_0 – математическое ожидание концентрации вещества и слоя водного стока с водосбора площадью F ; F_u – площадь участка водосбора в истоках реки без выраженного русла; $C_{0,u}$ и $Y_{0,u}$ – математическое ожидание концентрации вещества и слоя водного стока в истоках реки без выраженного русла; $1+\eta$ – коэффициент, отражающий комплекс гидрогеохимических и геоморфологических условий водосбора и соответствующий либо подъёму, либо спаду на кривой связи модульных коэф-

фициентов Y и X (рис. 1); $\eta = \frac{k_y k_c T}{a}$; k_y – коэф-

фициент перехода от слоя стока к условной средней глубине потока; a – коэффициент размерности; T – расчётный период (вывод (20) приведён в [28]).

Физический смысл уравнения (20), являющегося, по сути, уточнением формулы (16), заключается в том, что средние концентрации веществ в воде и донных отложениях при уменьшении дренарованности водосбора и прочих равных гидрологических условиях возрастают при положительных значениях k_c и снижаются при отрицательных. При этом важную роль в формировании химического состава вод играет ещё один важный фактор, учитываемый в (20) лишь косвенно, – сопряжённость в пределах водосбора речной сети и тектонических нарушений. Этот показатель может быть оценён по разности $P(rf) - P(r)P(f)$, где: $P(r)$ – густота речной сети (как вероятность руслового движения поверхностных вод); $P(f)$ – плотность распространения тектонических нарушений в пределах водосбора; $P(rf)$ – вероятность совместного проявления речной сети и тектонических нарушений. Анализ гидрогеохимических условий в Северном Вьетнаме показал следующее: 1) чем больше величина $P(rf) - P(r)P(f)$, тем теснее связь между размещением речной сети и тектонических нарушений ($P(rf) = P(r)P(f) = P(f)P(r)$) и, как правило, больше уровень содержания веществ в поверхностных и подземных водах; 2) указанный эффект усиливается при увеличении соотношения F_u/F [15].

Необходимо отметить, что имитационно-статистическая модель (10, 12, 13, 16–18) с дополни-

ем (20) описывает процессы формирования химического состава не только поверхностных, но и подземных вод. В качестве примера можно привести результаты расчёта средних геометрических значений суммы главных ионов в подземной составляющей стока левых таёжных притоков Оби – рек Чая, Парабель и Васюган. Их анализ свидетельствует о том, что вычисленные средние геометрические значения суммы главных ионов в подземной составляющей речного стока (с учётом уменьшения среднего содержания растворённых солей в подземных водах в весенне-летний период) в целом соответствуют данным о химическом составе подземных вод, участвующих в формировании общего стока (табл. 2).

Выводы

Концентрация растворённого вещества в водной среде определяется сочетанием разных факторов, причём они по отдельности и как единый комплекс являются в целом случайными величинами. Соответственно, случайной величиной является и концентрация вещества. Это позволяет применять при проведении гидрохимических исследований аппарат теории вероятностей и математической статистики с учётом природы геохимических процессов, определяющей в общем случае логнормальное распределение вероятностей концентраций веществ в поверхностных и подземных водах. При этом математическое ожидание концентрации вещества аппроксимируется средним геометрическим и рассматривается как «фоновое» значение, отражающее условно равновесное состояние системы «вода–порода» в статистически однородных условиях.

Один из ключевых факторов формирования химического состава природных и природно-антропогенных вод – интенсивность водообмена, регулирующая время и условия взаимодействий в системе «вода–порода» [3–5]. Наиболее важными характеристиками интенсивности водообмена (с точки зрения его влияния на химический состав вод) являются модуль водного стока (сток воды в единицу времени с единичной площади) и модульные коэффициенты расходов воды (отношение расходов воды в конкретный момент времени или в среднем за какой-либо период к математическому ожиданию). Зависимость между модульными коэффициентами расходов воды и концентрациями вещества в водной среде по виду близка к функции гамма-распределения, но большая часть наблюдений, как правило, соответствует кривой спада, имеющей вид обратной степенной зависимости. Аналогичная зависимость характерна и для средних геометрических значений гидрохимических показателей, но уже с нормой модуля водного стока.

Наиболее значительные изменения химического состава природных вод происходят на стадии формирования склонового, подповерхностного и подземного стока, когда в зависимости от скорости

Таблица 2. Характеристика подземной составляющей водного и гидрохимического стока притоков реки Обь
Table 2. Characteristic of a ground component of water and hydrochemical runoff of tributaries of the Ob river

Показатель Index	Река – пункт River – point		
	р. Чай – с. Подгорное Счауа – Podgorное	р. Парабель – с. Новиково Parabel – Novikovo	р. Васюган – с. Средний Васюган Vasyugan – Sredny Vasyugan
Период расчёта водного стока Period of calculation of water runoff	1980– 2005	1958– 2005	1980– 2005
Средний модуль подземного стока $M_{Og,a}$ [29], л/с·км ² Average module of groundwater runoff $M_{Og,a}$ [29], l/s·km ²	1,07	1,27	1,58
Коэффициент вариации подземного стока $Cv(Q_g)$ [29] Variation factor of groundwater runoff $Cv(Q_g)$ [29]	0,17	0,17	0,45
Расчётное значение среднего геометрического C_g суммы главных ионов подземном стоке по формуле (16), мг/дм ³ Rating value of geometrical average C_g of the sum of the main ions Σ_{mi} in groundwater runoff by the formula (16), mg/dm ³	368,3	333,5	293,9
Среднее геометрическое C_g^* для Σ_{mi} ($C_g^*=0,861C_g^*$), мг/дм ³ Geometrical average C_g^* for Σ_{mi} ($C_g^*=0,861C_g^*$), mg/dm ³	474,8	360,1	330,2
Среднее арифметическое C_a^* для Σ_{mi} речных вод по данным измерений в декабре–марте [30], мг/дм ³ Arithmetic average C_a^* for Σ_{mi} of river waters by the data of measurements in December–March [30], mg/dm ³	551,5	418,2	383,5
Среднее арифметическое для Σ_{mi} подземных вод отложений неоген-четвертичного возраста [30], мг/дм ³ Arithmetic average for Σ_{mi} of underground waters of Neogene-Quaternary age sediments [30], mg/dm ³	335,6	229,0	122,4
Среднее арифметическое для Σ_{mi} подземных вод отложений палеогенового возраста [30], мг/дм ³ Arithmetic average for Σ_{mi} of underground waters of Paleogene age sediments [30], mg/dm ³	610,5	430,6	412,0
Доля подземных вод в речном стоке [30], % Part of underground waters in river runoff [30], %	29,7	42,7	25,6
Доля притока из отложений неоген-четвертичного возраста в общем подземном стоке [30], % Part of inflow from Neogene-Quaternary age sediments in total ground runoff [30], %	21	6	10
Доля притока из отложений палеогенового возраста в общем подземном стоке [30], % Part of inflow from Paleogene age sediments in total ground runoff [30], %	79	94	90

движения воды формируется комплекс базовых химических реакций и физико-химических процессов, определяющих гидрогеохимический «фон». На стадии руслового стока этот комплекс может меняться, но уже не так значительно. Причём стандартное отклонение гидрохимических показателей прямо пропорционально соответствующему среднему геометрическому и коэффициенту вариации расходов воды. Последняя величина обратно пропорциональна площади водосбора. Соответственно, можно сделать вывод о том, что изменчивость концентраций растворённых веществ несколько уменьшается для больших водных объектов (как поверхностных, так и подземных) по сравнению с меньшими по размеру.

Ещё один аспект влияния водного стока на химический состав вод заключается в увеличении уровней содержания веществ при: 1) усилении сопряжённости речной сети и тектонических нару-

шений; 2) уменьшении отношения общей площади водосбора (в числителе) к его части в истоках реки без выраженной русловой сети (в знаменателе). Обе особенности характеризуют условия взаимодействия воды с горной породой (с первичными алюмосиликатными минералами и продуктами химических реакций).

Практическое определение фоновых концентраций растворённых веществ сводится к определению доверительного интервала для среднего геометрического, а аномальных концентраций – по «правилу двух сигм» для логнормального распределения вероятностей. При этом: 1) среднее геометрическое тем больше, чем меньше среднемноголетний модуль водного стока (суммарного или подземного); 2) границы интервала расширяются при увеличении вариации водного стока (суммарного или подземного).

Указанные зависимости между интенсивно-

стью водообмена и химическим составом поверхностных и подземных вод необходимо учитывать при оценке качества последних и проведении гидрогеохимических поисков полезных ископаемых в различных природных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений / Б.А. Кологов, С.Р. Крайнов, В.З. Рубейкин, Б.Г. Самсонов. – М.: Недра, 1983. – 199 с.
2. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
3. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. В 5 т. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
4. Shvartsev S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
5. Зверев В.П. Подземная гидросфера. Проблемы фундаментальной гидрогеологии. – М.: Научный мир, 2011. – 260 с.
6. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
7. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 184 с.
8. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1965. – 228 с.
9. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1979. – 423 с.
10. Методические указания. Проведение расчётов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков: РД 52.24.622–2001. – М.: Росгидрометслужба, 2001. – 68 с.
11. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1: 200000. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
12. Савичев О.Г. Фоновые концентрации веществ в речных водах таёжной зоны Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета*. – 2010. – № 334. – С. 169–175.
13. Савичев О.Г. Методология оценки фактического и допустимого влияния хозяйственной деятельности на химический состав и качество пресных природных вод // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8 (3). – С. 704–708.
14. Савичев О.Г. Региональные особенности химического состава речных вод Сибири и их учёт при нормировании сбросов сточных вод // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 1 (66). – С. 41–46.
15. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. Гидроэкологическое состояние междуречья рек Гам и Кау (Северный Вьетнам) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 96–103.
16. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions // *Modelling in aquatic chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris: Nuclear energy agency, 1997. – P. 35–68.
17. Виссмен У. мл., Харбаф Т.И., Кнэпп Д.У. Введение в гидрологию. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 470 с.
18. Рождественский А.В., Чеботарёв А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
19. Мелиорация и водное хозяйство: В 5 т. Т. 5. Водное хозяйство / под ред. И.И. Бородавченко. – М.: Агропромиздат, 1988. – 399 с.
20. Справочник по гидрохимии / под ред. А.М. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
21. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 1 / под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 510 с.
22. Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
23. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
24. Савичев О.Г., Паромов В.В. Химический состав талых ледниковых и речных вод бассейна реки Актру (Горный Алтай) // *География и природные ресурсы*. – 2013. – № 4. – С. 94–100.
25. Чеботарёв Н.П. Учение о стоке. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 406 с.
26. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
27. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // *Геоэкология*. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
28. Савичев О.Г., Домаренко В.А. Закономерности изменения химического состава речных отложений и их использование в поисках полезных ископаемых // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6 (3). – С. 520–525.
29. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Ch. 4 / A.I. Shiklomanov, R.B. Lamers, D.P. Lettenmaier, Yu.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.G. Smith // *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – P. 111–154.
30. Савичев О.Г. Подземная составляющая стока рек бассейна Средней Оби // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2010. – № 1. – С. 36–39.

Поступила 10.09.2015 г.

UDC 556.06:551.482.212

THE TECHNIQUE OF DETERMINING BACKGROUND AND EXTREME VALUES OF HYDROGEOCHEMICAL PARAMETERS

Oleg G. Savichev,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: OSavichev@mail.ru

Nguyen Van Luyen,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Luyennv@yahoo.com

The relevance of the research is caused by the necessity of objective definition of background and extreme hydrogeochemical parameters both at geochemical searches of minerals, and at estimation of a geoecological condition of water objects and their basins. The techniques, which are applied, are based on use of methods of mathematical statistics and probability theory, but they are insufficiently proved from the point of view of physical sense of researched processes. Therefore, in some cases the volume and cost of field and laboratory works grow without adequate increase in efficiency of researches.

The aim of the research is to develop and substantiate a technique of determining the background and extreme values of hydrogeochemical parameters on the basis of the analysis of interrelations between a water runoff and chemical composition of waters.

Methods of the research: geography-hydrological and statistical methods, methods of chemical thermodynamics.

Results and conclusions. The authors have analyzed the interrelations between hydrogeochemical and hydrological parameters. On the basis of the results the physical-statistical model of formation of chemical composition of surface and ground waters is developed and the technique for defining background and extreme values of hydrogeochemical parameters is offered. It was approved by the data of hydrological and hydrogeochemical observations in basins of the average rivers of Siberia (Russian Federation) and the hydrogeochemical data obtained in northern part of Vietnam. It was shown that: 1) hydrogeochemical parameters generally submit to log-normal distribution; 2) the expected value of substance concentration, approximated by average geometrical, can be considered as «background» value which reflects conditionally the equilibrium condition of the system «water–rock» in statistically homogeneous conditions; 3) the standard deviation of substance concentration is the linear function of corresponding average geometrical value and the coefficient of water runoff variation. Practical definition of background concentration of the dissolved substances is reduced to definition of a confidence interval for average geometrical, and extreme concentration is reduced to definition by «the rule of two standard deviation» for log-normal distribution. Thus: 1) the average geometrical is more than less annual water runoff; 2) borders of the interval extend at increase in water runoff (total or ground) variation.

Key words:

Background concentration, extreme concentration, hydrogeochemical parameters, water runoff, physical-statistical model of a chemical composition of waters.

The research was financially supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Z50.31.0012), Tomsk Polytechnic University (project VIU_VAF_144_2014) and Russian Foundation for Basic Research (grant RFBR 13-05-98045_p_cубурь_a).

REFERENCES

- Kolotov B.A., Krainov S.R., Rubeikin V.Z., Samsonov B.G. *Osnovy gidrokhemicheskikh poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Bases of hydrogeochemical searches of ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 199 p.
- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental Aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
- Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 1. Sistema voda–poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [Geological evolution and self-organizing of water–rock system. Vol. 1. Water–rock system in earth crust: interaction, kinetic, equilibrium, modelling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SB RAS Press, 2005. 244 p.
- Shvartsev S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
- Zverev V.P. *Podzemnaya gidrosfera. Problemy fundamentalnoy gidrogeologii* [Ground hydrosphere. Problems of fundamental hydrogeology]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2011. 260 p.
- Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- Kopylova Yu.G., Guseva N.V. *Gidrogeokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Hydrogeochemical methods of searching ore deposits]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2014. 184 p.
- Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 228 p.
- Perelman A.I. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 423 p.
- Metodicheskie ukazaniya. Provedenie raschetov fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodotokov* [Methodical instructions. Carrying out the calculations of background concentration of chemical substances in river waters]. RD 52.24.622–2001. Moscow, Rosgidromet publ., 2001. 68 p.
- Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselovogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000 and its results]. Moscow, IMGRE Press, 2002. 92 p.
- Savichev O.G. Fonovye kontsentratsii veshchestv v rechnykh vodakh taehznoy zony Zapadnoy Sibiri [Background concentration of substances in river waters of taiga zone of Western Siberia].

- Vestnik Tomskogo universiteta – Bulletin of Tomsk state university*, 2010, no. 334, pp. 169–175.
13. Savichev O.G. Metodologiya otsenki fakticheskogo i dopustimogo vliyaniya khozaystvennoy deyatel'nosti na khimicheskiy sostav i kachestvo presnykh prirodnykh vod [The methodology of estimation of actual and allowable influence of economic activities on chemical composition and quality of fresh natural waters]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2013, no. 8 (3), pp. 704–708.
 14. Savichev O.G. Regionalnye osobennosti khimicheskogo sostava rechnykh vod Sibiri i ikh ucheta pri normirovaniy sbrosov stochnykh vod [Regional features of chemical composition of river waters in Siberia and their account at normalization of dumps of sewage]. *Voda: khimia i ekologiya – Water: chemistry and ecology*, 2014, no. 1 (66), pp. 41–46.
 15. Savichev O.G., Nguen V.L. Gidroekologicheskoe sostoyaniye mezhdurechya rek Gam i Kau (Severnyy Vyetnam) [Hydroecological condition of Gam and Kau rivers interfluvium (Northern Vietnam)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 96–103.
 16. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions. *Modelling in aquatic chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, Nuclear energy agency, 1997. pp. 35–68.
 17. Viessman W., Jr, Harbaugh T.E., Knapp J.W. *Vvedenie v gidrologiyu* [Introduction to hydrology]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1979. 470 p.
 18. Rozhdestvenskiy A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in a hydrology]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1974. 424 p.
 19. *Melioratsiya i vodnoye khozaystvo*. T. 5. Vodnoye khozaystvo [Land improvement and water management. Vol. 5. Water management]. Ed. by I.I. Borodavchenko. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 399 p.
 20. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook in hydrochemistry]. Ed. by A.M. Nikanorov. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1989. 391 p.
 21. *Spravochnik po prikladnoy statistike* [Handbook in applicable mathematics]. Eds. W. Lederman, E. Lloyd. Moscow, Finansy i statistika, 1989. Vol. 1, 510 p.
 22. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
 23. Kritsky S.N., Menkel M.F. *Gidrologicheskie osnovy upravleniya vodokhozaystvennyimi sistemami* [Hydrological bases of management of water-economic systems]. Moscow, Nauka, 1982. 271 p.
 24. Savichev O.G., Paromov V.V. Khimicheskiy sostav talykh lednikovyykh i rechnykh vod basseyna reki Aktru (Gornyy Altay) [Chemical composition of thawed glacial and river waters of the Aktru river basin (Mountain Altai)]. *Geographiya i prirodnye resursy – Geography and natural resources*, 2013, no. 4, pp. 94–100.
 25. Chebotarev N.P. *Uchenie o stoke* [The doctrine about a runoff]. Moscow, Moscow university Press, 1962. 406 p.
 26. Alyokin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
 27. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesiye donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologiya – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 28. Savichev O.G., Domarenko V.A. Zakonomernosti izmeneniya khimicheskogo sostava rechnykh otlozheniy i ikh ispolzovanie v poiskakh poleznykh iskopaemykh [Laws of change in chemical composition of river sediments and their use in searches of minerals]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 6 (3), pp. 520–525.
 29. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.G. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 111–154.
 30. Savichev O.G. Podzemnaya sostavlyayushchaya stoka rek basseyna Sredney obi [Ground composition of river runoff of the Middle Ob river basin]. *Melioratsiya i vodnoye khozaystvo – Land improvement and water management*, 2010, no. 1, pp. 36–39.

Received: 10 September 2015.