

Домаренко В.А., Савичев О.Г., Улаева С.С.
(Национальный исследовательский Томский
политехнический университет)

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ БАЛАНС ВОДОСБОРА МАЛОЙ РЕКИ ИЛЬБОКИЧ (БАССЕЙН АНГАРЫ, СРЕДНЯЯ СИБИРЬ)

*Предложена методика составления и анализа геохимического баланса малой реки. Проведена ее апробация на примере р. Ильбокич. Показано, что накопление химических элементов в водных объектах, торфах и почвах возможно как при наличии, так и при отсутствии горных пород, обогащенных этими элементами. В частности, соединения Fe и редкоземельные элементы (РЗЭ) могут накапливаться в виде малорастворимых гидроксидов и соединений с фосфором в торфах и болотных водах при отсутствии в районе исследования выходов горных пород с высоким содержанием данных элементов. **Ключевые слова:** геохимический баланс водосбора, малая река Ильбокич, бассейн Ангары, Средняя Сибирь.*

Domarenko V.A., Savichev O.G., Ulaeva S.S. (National Research Tomsk Polytechnic University)

GEOCHEMICAL BALANCE OF THE MINOR RIVER ILBOKICH DRAINAGE BASIN (ANGARA RIVER BASIN, MIDDLE SIBERIA)

*A methodology for the compilation and analysis of the geochemical balance of a minor river is proposed. It was tested on the Ilbokich river in Middle Siberia. It is shown that the accumulation of chemical elements in water bodies, peat and soils is possible both in the presence and in the absence of rocks enriched by these elements. In particular, Fe and REE compounds can accumulate in the form of low soluble hydroxides and compounds with phosphorus in peat and swamp waters in the absence of rock outcrops with a high content of corresponding elements in the region of research. **Keywords:** geochemical balance of drainage basin, minor river Ilbokich, Angara river basin, Middle Siberia.*

Анализ баланса вещества и энергии — универсальный подход решения различных научных и инженерных задач, в том числе при проведении всех этапов поисков и использования полезных ископаемых. Однако методика такого анализа в настоящее время недостаточно проработана, что и определило цель исследования — разработку методики анализа геохимического баланса водосбора малой реки, который является, по сути, ключевым природно-территориальным комплексом регионального уровня, включающим, как минимум, два ландшафта (водораздельные пространства и речные долины).

В качестве объекта исследования выбран водосбор реки Ильбокич — элемента речной системы «Ильбокич — Чадобец — Ангара — Енисей — Карское море». Рассматриваемый объект расположен в пределах Красноярского края, в междуречье рек Ангара и Подкаменная Тунгуска. Рассматриваемая территория относится к Среднесибирскому плоскогорью, характеризуется распространением расчлененного рельефа возвышенных равнин и островной многолетней мерзлоты. Климат — резко континентальный. Площадь водосбора реки составляет 464 км², ее длина — 69 км. Анализ природных условий территории показал, что ее лесистость во второй половине 2000-х годов составляла 97.7 % с учетом зарастающих вырубок (на хвойный и смешанный лес приходилось 80.5 %), заболоченность (в долинах р. Ильбокич и ее притоков) — 1.2 %, открытые пространства — 1.1 % (в том числе нарушенные участки после вырубок леса и геологоразведочных работ — около 0.3 %).

В геологическом строении рассматриваемой территории участвуют отложения палеозойского и кайнозойского возрастов. Наиболее древними породами являются карбонатные и терригенно-карбонатные отложения кембрийской системы (зелеевская свита мощностью 100–110 м; наиболее распространенные породы — доломиты и известняки), на которых с угловым и стратиграфическим несогласиями залегают терригенные образования каменноугольной системы (тушамская и катская свиты). Породы тушамской свиты представлены зеленовато-серыми и серыми известковистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами с прослоями туфов и туфоалевролитов, в отложениях катской свиты преобладают песчаники, алевролиты, аргиллиты с пластами каменных углей, линзами сидеритов, реже — песчаных известняков [2, 10].

Палеозойские отложения местами прорваны основными породами формации сибирских траппов, местами перекрыты рыхлыми образованиями палеогеновой и неогеновой систем. Отложения олигоцена мощностью до 100 м распространены на водоразделе в западной части водосбора и представлены глинами с прослоями мелкозернистых песков, обломками кремней и включениями лигнитизированной древесины. Миоценовые отложения развиты также преимущественно на водораздельных пространствах и представлены песками с прослоями каолиновых глин, галечников и обломками песчаников и гравелитов на гематитовом цементе. Пески, из которых сформирована основная часть отложений миоцена состоят преимущественно из кварца и полевого шпата с включениями ильменита, лейкоксена, амфибола, пироксена, рутила, циркона, дистена, андалузита, силлиманита. На рассматриваемой территории широко распространены аллювиальные и элювиально-делювиальные отложения

плейстоцена и голоцена. В речных долинах аллювиальные образования, представленные кварцевыми песками с прослоями глин и супесей, имеют мощность около 4–18 м. На заболоченных участках долин местами формируется торф. Элювиально-делювиальные образования развиты повсеместно на водоразделах и склонах и представлены суглинками и супесями с примесью обломочного материала коренных пород [2, 10].

Исходная информация и методика исследования

Исследование включало в себя: 1) получение исходной геохимической информации до активного хозяйственного освоения территории; 2) расчет изменения выноса веществ с участков водосбора в летний и зимний периоды; 3) разработку и анализ математической модели водного и геохимического балансов водосбора малой реки. Первый этап включал проведение в августе 2008 г. и марте 2009 г. полевых и лабораторных работ.

В рамках первого этапа, охарактеризованного в работе [8], был проведен отбор проб поверхностных и подземных вод, снега, почв, торфов, донных отложений, растительности (подрост хвойных пород) с учетом требований [3]: почв — из почвенного горизонта А; торфа — из деятельного горизонта торфяной залежи с помощью торфяного бура ТБГ-1; донных отложений рек — из верхнего слоя толщиной 0.2 м с использованием штангового дночерпателя ГР-91; речных вод (в тех же точках, где проводился отбор проб донных отложений, но до него) — из верхнего слоя 0.3–0.5 м от поверхности с помощью батометр-бутылки ГР-16М на штанге ГР-56М; болотных вод — с помощью специально подготовленной емкости из слоя 0.1–0.3 м от поверхности болотных вод; подземных вод — из родников с помощью специально подготовленной емкости; снеговых вод — из проб снега по всему профилю снежного покрова (в марте 2009 г.; таяние снега осуществлялось в помещении при комнатной температуре); растительности (в августе 2008 г.) — в тех же пунктах, где и отбор проб почв (торфа), в основном — из фрагментов ветвей подроста сосны, а при ее отсутствии — пихты (пробы подвергались сжиганию в лабораторных условиях для получения массы после сжигания не менее 100 г). Водные пробы для определения микроэлементов, соединений азота и фосфора консервировались с учетом метода анализа согласно ГОСТу [4]. Одновременно с отбором речных вод в августе 2008 г. было проведено измерение расходов воды с помощью гидрометрической вертушки ГМЦМ-1.

Определение химического состава поверхностных, подземных и снеготалых вод, почв, торфов, донных отложений, золы фрагментов растений выполнено в аккредитованных лабораториях Томского политехнического университета (ТПУ) (химический и микробиологический анализ) и ООО «Плазма» (г. Томск, микроэлементы с применением масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой) с использованием следующих методов: рН, F⁻ — потенциометрический; удельная электропроводность — кондуктометрический; Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻,

CO₂, O₂, перманганатная (ПО) и бихроматная (БО) окисляемость, биохимическое потребление кислорода за 5 сут (БПК₅), углерод органический (C_{орг.}) по И.В. Тюрину и гидролитическая кислотность почв — титриметрический; SO₄²⁻ — турбидиметрический; Na⁺, K⁺ — атомно-абсорбционный; NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, фосфаты, Si, мутность — фотометрический; взвешенные вещества — гравиметрический; Fe, Zn, Cu, Pb, Sr, Cd, Mn, Hg, As, Al, Li, Ba, Co, Cr, Ni, V, Rb, Cs, Zr, Ti, Be, P, Ga, Se, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Ta, W, Au, Bi, Sc, Y, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb, Lu, Th, U — масс-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой (в донных отложениях и почвах определялись кислоторастворимые формы; анализ проводился для фракции менее 1 мм).

На втором этапе выполнен расчет приращения выноса взвешенных и растворенных веществ на участках среднего и нижнего течения р. Ильбокич при допущении, что в зимний период отсутствует или незначительно поступление продуктов эрозии почвогрунтов на поверхности водосбора. Следовательно, для некоторых веществ, непосредственно не связанных с жизнедеятельностью речной флоры, можно ориентировочно оценить вклад почвенных и эрозионных процессов на водосборе. Вынос рассчитывался путем умножения концентрации вещества на расход воды. Для расчета использованы данные, полученные в створах р. Ильбокич: 1) длина реки от истока L₁ = 33.1 км; площадь водосбора F₁ = 304 км²; распространенность в верхней части геологического разреза: траппов f_{мп,1} ≈ 23 %; отложений карбона f_{с,1} ≈ 72 %; миоценовых отложений f_{н,1} ≈ 2 %; четвертичных отложений f_{о,1} ≈ 3 %; 2) L₂ = 34.0 км; F₂ = 315 км²; f_{мп,2} ≈ 22 %; f_{с,2} ≈ 73 %; f_{н,2} ≈ 2 %; f_{о,2} ≈ 3 %; 3) L₃ = 52.6 км; F₃ = 430 км²; f_{мп,3} ≈ 26 %; f_{с,3} ≈ 65 %; f_{н,3} ≈ 2 %; f_{о,3} ≈ 4 %; распространенность кембрийских отложений f_{ε,3} ≈ 3 %. Полная длина реки — 69 км, общая площадь водосбора — 464 км². Лесистость водосбора во всех створах около 99 %. При расчете стока в створе реки учитывались только те значения, которые превышали 10 % от максимальных значений в расчетном и выше расположенном створе (в противном случае разница выноса в створах участка приравнялась к нулю).

На третьем этапе выполнен ориентировочный расчет элементов годового водного (1), (2) и геохимического (3) балансов водосбора в среднем за многолетний период:

$$H_{sm} + H_r - E_{sn} - E_{op} - Y_a \approx 0, \quad (1)$$

$$Y_a = Y_{sf} + Y_{gr-ip} + Y_{gr-op}, \quad (2)$$

$$F \cdot k_r \cdot C_{sn} \cdot (H_{sm} + H_r \cdot k_{sn-r} - E_{sn} - E_{op} \cdot k_{sn-r}) - F \cdot k_r \cdot Y_a \cdot C_{Ya} = -DG, \quad (3)$$

где H_{sm} — годовое поступление (слой, мм) в русловую сеть водоотдачи из снежного покрова на водосборе, определяемое как сумма месячных значений водоотдачи H_{sm,t} за t-месяц, которые в свою очередь рассчитываются по разнице влагозапасов в снежном покрове

за текущий (t) и предыдущий ($t-1$) месяцы с учетом таяния снега по температурным коэффициентам при температуре атмосферного воздуха больше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]; H_r — жидкие атмосферные осадки (слой, мм), вычисленные по разнице суммарных атмосферных осадков и водоотдачи из снежного покрова (для года и каждого t -месяца); E_{sn} — годовое испарение (слой, мм) с поверхности снежного покрова, рассчитываемое как сумма месячных значений $E_{sn,t}$, определяемых, согласно [7], по формуле (4); E_{op} — годовое испарение (слой, мм) с поверхности водосбора, свободное от снежного покрова, вычисляемое как сумма месячных значений $E_{op,t}$, определяемых по уравнению Харгрейва (5), согласно [13]; Y_a — суммарный водный сток (слой, мм) в расчетном створе реки; Y_{gr-ip} , Y_{gr-op} — подземная составляющая суммарного стока в период ледостава и период открытого русла, определяемые по формулам (6), (7); Y_{sf} — поверхностная составляющая суммарного стока — разность между суммарным стоком и его подземной составляющей; F — площадь водосбора; k_t — коэффициент размерности; C_{sn} — средняя концентрация рассматриваемого вещества ($\text{мг}/\text{дм}^3$) в снеготалых водах; k_{sn-r} — отношение концентраций в снеготалых и дождевых водах (целесообразность использования коэффициента k_{sn-r} определяется сложностью проведения наблюдений за составом дождевых вод; исходные данные получены в результате анализа выборки наблюдений за химическим составом снеготалых и дождевых вод по [9]); C_{Ya} — средняя концентрация рассматриваемого вещества ($\text{мг}/\text{дм}^3$) в речных водах в расчетном створе (в случае р. Ильбокич величина C_{Ya} получена как произведение среднего арифметического за август 2008 г. и март 2009 г. на отношение $(S_{mi^{*(8)}} + S_{mi^{*(3)}}) / (2 \times S_{mi^{*(год)}}) = 0.29$, где $S_{mi^{*(8)}}$, $S_{mi^{*(3)}}$, $S_{mi^{*(год)}}$ — расчетные значения суммы главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-), вычисленные по эмпирической зависимости (8) от среднемесячных модулей водного стока M_Q , установленной для р. Чадобец у с. Яркино; квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0.95$); DG — изменение вещества в пределах водосбора ($\text{г}/\text{с}$, $\text{мг}/\text{с}$):

$$E_{sn,t} = 0.34 \cdot D_t \cdot N_t, \quad (4)$$

$$E_{op,t} = k_1 \cdot R_0 \cdot (T_{a,t} + k_2) \cdot (T_{max,t} - T_{min,t})^{0.5}, \quad (5)$$

$$Y_{gr,t} = Y_{a,t}, \text{ если } t = 1, 2, 3 \quad (6),$$

$$Y_{gr,t} = Y_{a,12} + (Y_{a,3} - Y_{a,12}) \cdot (t - 12) / (3 - 12) \quad (7),$$

$$S_{mi^*} = 388.3 \cdot M_Q^{-0.636}, \quad (8),$$

где R_0 — суммарная радиация при безоблачном небе, $\text{кДж}/(\text{см}^2 \cdot \text{мес})$; $T_{a,t}$, $T_{max,t}$, $T_{min,t}$ — средние, максимальные и минимальные месячные значения температуры атмосферного воздуха ($^{\circ}\text{C}$); k_1 и k_2 — эмпирические коэффициенты; D_t — дефицит влажности атмосферного воздуха; N_t — число суток в месяце.

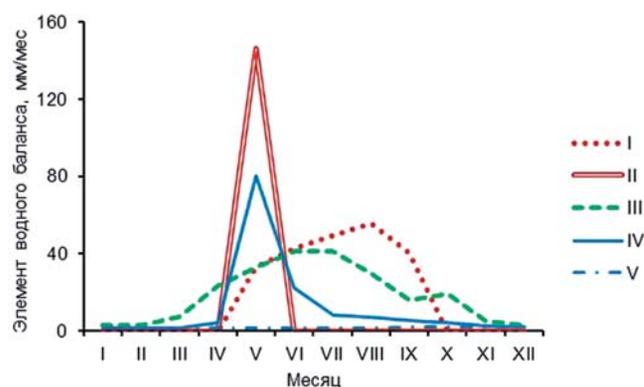
Исходная информация о температуре приземных слоев атмосферного воздуха и атмосферных осадках получена как среднее взвешенное из соответствующих значений для метеостанций Богучаны и Ванавара за

1971–2000 гг. Слой стока р. Ильбокич принят равным слою стока р. Чадобец у с. Яркино за тот же период. Дополнительно к уравнению (1) оценена доля снегового (Y_{sn}) и дождевого (Y_r) питания в речном стоке. Первая величина (Y_{sn}) оценивалась по разнице между суммой атмосферных осадков за период с отрицательной температурой атмосферного воздуха, испарением с поверхности снега по формуле (4) и долей подземного стока в период ледостава (6), вторая (Y_r) — по разнице между суммой атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха, испарением с поверхности водосбора по формуле (5) и долей подземного стока в период открытого русла (7).

Результаты исследования и их обсуждение

По сочетанию характеристик растительного (хвойные и смешанные леса — 80.5 %; лиственные леса — 17.2 %; болота — 1.2 %; открытые участки — 1.1 %) и почвенного покрова (мерзлотно-таежные, аллювиальные и болотные почвы), особенностям рельефа в пределах водосбора р. Ильбокич, согласно [3], выделяются природные ландшафты речных долин и водораздельных пространств. По характеру и степени антропогенного воздействия указанные ландшафты по состоянию на 2008–2009 гг. могут быть охарактеризованы как природные. Анализ водного баланса водосбора р. Ильбокич (в устье) показал, что снеговое питание составляет 50 %, дождевое — 36 %, подземное — 14 %. Основной объем водоотдачи из снежного покрова поступал в речную сеть в среднем за 1971–2000 гг. в мае, когда наблюдаются наибольшие среднемесячные значения суммарного водного стока. Максимальная разность между жидкими атмосферными осадками и испарением отмечена в августе — сентябре (рис. 1).

Общее содержание растворенных солей в речных водах рассматриваемой территории изменяется обратно пропорционально внутригодовому распределению водного стока. В период открытого русла воды р. Ильбокич соответствуют пресным с малой и средней минерализацией, гидрокарбонатным кальциевым и гидрокарбонатным магниевыми-кальциевым (по класси-



Среднемесячные (за 1971–2000 гг.) значения слоя атмосферного увлажнения за счет дождей (I) и водоотдачи из снежного покрова (II), суммарного испарения с поверхности водосбора (III), стока р. Ильбокич в устье (IV) и его подземной составляющей (V)

Таблица 1
Химический состав снеготалых, речных, болотных и подземных вод в водосборе р. Ильбокич в 2008–2009 гг.

Показатель	Единицы измерения	Снеготалые воды	Речные воды в летний период	Речные воды в зимний период	Речные воды в целом	Болотные воды	Подземные воды в летний период
pH	—	6.15	7.73	7.39	7.60	6.38	7.51
CO ₂	мг/дм ³	—	<1	3.5	1.3	4.4	2.2
Взвешенные вещества	то же	17.7	21.0	11.2	17.3	53.4	160.2
Мутность	—//—	7.6	1.0	6.9	3.2	56.7	26.3
Σ _{ми}	—//—	30.8	297.5	612.1	415.5	161.2	290.9
Ca ²⁺	—//—	5.1	40.0	61.3	48.0	24.0	40.0
Mg ²⁺	—//—	1.4	13.4	28.9	19.3	9.6	19.1
Na ⁺	—//—	1.6	22.7	76.2	42.7	1.5	8.5
K ⁺	—//—	0.2	1.1	2.1	1.5	0.9	0.7
HCO ₃ ⁻	—//—	14.8	175.6	305.0	224.1	122.0	204.5
CO ₃ ²⁻	—//—	<1	12.0	<1	7.5	<1	8.3
SO ₄ ²⁻	—//—	2.7	7.8	37.4	18.9	1.0	9.0
Cl ⁻	—//—	5.1	24.9	101.2	53.6	2.2	0.8
NH ₄ ⁺	—//—	0.059	0.326	0.183	0.273	1.100	0.112
NO ₂ ⁻	—//—	0.108	0.006	0.007	0.007	0.016	0.009
NO ₃ ⁻	—//—	0.829	0.824	3.133	1.690	0.250	0.250
Si	—//—	0.36	6.45	7.81	6.96	8.51	7.03
БПК ₅	мгО/дм ³	0.43	0.49	0.68	0.56	0.48	0.71
C _{орг.}	мг/дм ³	0.75	11.66	0.75	7.57	16.13	2.18
БО	мгО ₂ /дм ³	2.00	31.08	2.00	20.18	43.00	5.82
F ⁻	—//—	-	0.212	0.300	0.245	0.050	0.175
P	—//—	0.028	0.067	0.061	0.065	0.370	0.028
Fe	—//—	0.872	0.562	0.157	0.410	4.350	1.828
Li	мкг/дм ³	0.55	17.20	29.67	21.88	2.00	11.00
Ba	то же	9.8	22.2	40.0	28.9	56.0	22.5
Al	—//—	270.8	21.8	22.0	21.9	65.0	741.3
Pb	—//—	1.38	0.49	0.80	0.61	1.60	1.51
Cu	—//—	3.64	1.40	2.93	1.97	5.40	12.33
Zn	—//—	32.3	96.4	62.7	83.8	24.0	62.3
V	—//—	1.00	1.07	2.43	1.58	0.60	0.66
Cs	—//—	0.024	0.003	0.017	0.008	0.039	0.019
Se	—//—	0.501	0.400	0.983	0.619	0.320	0.418
Sb	—//—	0.125	0.294	0.069	0.210	0.095	0.443
Ta	—//—	0.0020	0.0058	0.0077	0.0065	0.0020	0.0057
Y	—//—	0.4413	0.2300	0.1427	0.1973	0.6900	1.8098
La	—//—	0.3493	0.1020	0.0677	0.0891	0.7900	1.4835
Ce	—//—	0.7380	0.1660	0.1370	0.1552	1.7000	3.3725
Sm	—//—	0.0785	0.0984	0.0164	0.0676	0.1800	0.3624
Eu	—//—	0.0167	0.0068	0.0053	0.0062	0.0220	0.0766
Yb	—//—	0.0341	0.0127	0.0022	0.0088	0.0590	0.1618
Lu	—//—	0.0060	0.0027	0.0023	0.0026	0.0100	0.0263
U	—//—	0.0320	0.3660	0.6933	0.4888	0.0600	1.3760

Примечание: Σ_{ми} — сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); БПК₅ — биохимическое потребление кислорода за 5 сут; содержание углерода органических соединений C_{орг.} определено как 0.375×БО [5]

фикации О.А. Алекина), нейтральным и слабощелочным, в зимний период — пресным со средней и повышенной минерализацией, нейтральным, причем в нижнем течении указанного водотока отмечено достаточно резкое увеличение суммы главных ионов S_{ми}

3 %-экв.). Относительно районного фона минеральные почвы и торфы водосбора р. Ильбокич несколько обогащены Mn и As [3]. Повышенные концентрации указанных элементов отмечены и в кислотных вытяжках из донных отложений (табл. 2).

(до 969 мг/дм³ в конце зимней межени) и изменение геохимического типа (преобладающие ионы — Na⁺ и Cl⁻).

Относительно районного фона, рассчитанного для р. Чадобец и ряда ее притоков (реки Ильбокич, Боткич, Верхняя и Нижняя Немба, Бешамей) как верхний предел погрешности определения среднегеометрического, в водах р. Ильбокич (и в августе 2008 г. и в марте 2009 г.) зафиксированы повышенные концентрации повышенные концентрации Zn, Se, Ta, Cs, V, Sb и РЗЭ [8]. Аналогичная картина в целом отмечена и для подземных вод, отобранных из родников в долине р. Ильбокич в августе 2008 г. и характеризующихся как пресные с малой и средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые и кальциево-магниевые, нейтральные и слабощелочные (табл. 1).

Водные вытяжки из минеральных (мерзлотно-таежных, подзолистых, дерново-подзолистых и аллювиальных) почв — в основном пресные с малой и средней минерализацией, слабощелочные или нейтральные, с преобладанием в составе Mg²⁺ (47–71 %-экв.), органических кислот, в меньшей степени — HCO₃⁻ (18–24 %-экв.). Водные вытяжки из торфов отличаются более высоким суммарным содержанием растворенных солей (613–784 мг/дм³), меньшими значениями pH (3.5–6.2), более высоким относительным содержанием Mg²⁺ (78–85 %-экв.) и органических кислот (HCO₃⁻ — 5–7 %-экв., прочие изученные анионы — не более

Таблица 2
Химический состав донных отложений, золы растений, почв, торфов и водных вытяжек из них в водосборе р. Ильбокич в 2008 г.

Показатель	Единицы измерения	Донные отложения	Почвы и торф в среднем	Почвы, горизонт A ₁	Торф	Ветви подроста сосны и пихты
pH _(в.в)	Единицы pH	—	5.90	6.33	4.85	—
Σ _{mi(в.в)}	мг/дм ³	—	288.4	151.7	698.6	—
Ca ²⁺ _(в.в)	мг/кг	—	164.4	87.1	396.0	—
Mg ²⁺ _(в.в)	то же	—	705.4	218.4	2166.6	—
Na ⁺ _(в.в)	—//—	—	6.1	6.4	5.0	—
K ⁺ _(в.в)	—//—	—	10.9	12.8	5.1	—
HCO ₃ ⁻ _(в.в)	—//—	—	468.0	369.7	762.9	—
SO ₄ ²⁻ _(в.в)	—//—	—	22.3	22.5	21.5	—
Cl _(в.в)	—//—	—	65.1	41.5	135.8	—
NO ₃ ⁻ _(в.в)	—//—	—	7.80	1.00	28.20	—
NO ₂ ⁻ _(в.в)	—//—	—	0.01	0.01	0.01	—
Si	—//—	—	—	—	—	726.06
C _{орг}	%	—	12.01	4.32	35.10	—
P	то же	725.2	608.0	540.5	810.5	1189.4
Fe	—//—	76403.0	28381.1	33653.3	12564.5	87.5
Ba	—//—	—	—	—	—	49.20
Al	—//—	—	—	—	—	155.42
Pb	—//—	9.36	13.10	16.00	4.40	—
Cu	—//—	57.00	40.29	47.67	18.15	2.46
Zn	—//—	84.60	73.13	85.00	37.50	42.27
Cd	—//—	0.19	0.23	0.23	0.22	0.04
As	—//—	12.88	5.75	4.48	9.55	1.94
Mn	—//—	2632.6	1492.5	1383.8	1818.5	508.4
Co	—//—	36.80	14.79	17.07	7.95	0.22
Cr	—//—	291.00	52.88	62.67	23.50	2.00
Ni	—//—	70.80	32.78	37.20	19.50	1.80
V	—//—	392.40	106.14	129.20	48.50	0.75
Rb	—//—	—	—	—	—	2.995
Cs	—//—	—	—	—	—	0.015
Zr	—//—	—	—	—	—	0.084
Ti	—//—	—	—	—	—	4.517
Be	—//—	0.876	1.080	1.270	0.510	0.005
Ga	—//—	15.600	12.450	14.733	5.600	0.098
Se	—//—	0.500	0.644	0.692	0.500	0.137
Nb	—//—	5.260	6.538	7.967	2.250	0.008
Mo	—//—	1.062	0.655	0.657	0.650	0.019
Ag	—//—	0.124	0.196	0.211	0.150	0.013
Sn	—//—	0.948	1.090	1.317	0.410	0.025
Sb	—//—	0.412	0.370	0.418	0.225	0.008
Hf	—//—	1.094	1.607	1.977	0.498	—
Ta	—//—	0.300	0.444	0.537	0.164	—
W	—//—	0.408	0.706	0.852	0.270	—
Au	—//—	0.0025	0.0012	0.0011	0.0015	—
Bi	—//—	0.080	0.155	0.190	0.050	—
Sr	—//—	—	—	—	—	17.654
Y	—//—	—	—	—	—	0.027
La	—//—	—	—	—	—	0.031
Ce	—//—	—	—	—	—	0.053
Ca	—//—	—	—	—	—	5382.7
Mg	—//—	—	—	—	—	1144.7
Na	—//—	—	—	—	—	12.3
K	—//—	—	—	—	—	5266.1
Количество проб	—	5	8	6	2	10

Примечание: в.в. – водная вытяжка

Сопоставление изменений геохимического стока р. Ильбокич на участках ее среднего и нижнего течения (табл. 3) показало, что вынос Ca, Mg, Na, K, углерода органических соединений, Cl, F, Fe, Li, Ba, Al, Pb, Cu, As, Mn, Co, Ni, V, Rb, Cs, Ti, Be, B, Se, Mo, Br, Sr, Y, La, Ce, Pr, Eu, U с речными водами увеличивается от верховий к устью и в летний, и в зимний периоды, причем наибольшие значения обычно отмечены в первом случае. С учетом данных о химическом составе изученных компонентов окружающей среды (табл. 1, 2), это позволяет сделать вывод о существенной роли в формировании геохимического стока и химического состава речных вод разрушающихся коренных пород, почв и торфов, поступающих в русловую сеть в весенний и летне-осенний периоды с поверхностным и субповерхностным стоком с водосбора.

Анализ среднемноголетнего геохимического баланса р. Ильбокич также подтверждает этот вывод. В частности, для взвешенных и коллоидных частиц получено отрицательное значение величины ΔG, что указывает на преобладание массопотоков внутри водосбора над расчетным твердым стоком реки в устье, то есть о перераспределении твердого вещества внутри водосбора (табл. 4). В то же время для углерода органических веществ, кремния и растворенных форм миграция большинства главных ионов (за исключением K⁺ и SO₄²⁻) величина ΔG больше нуля, что свидетельствует о значительной роли в формировании геохимического стока не только поступления с

Таблица 3
Изменение стока взвешенных и растворенных веществ на участках среднего и нижнего течения р. Ильбокич в августе 2008 г. и марте 2009 г.

Показатель	Август 2008 г.		Март 2009 г.	
	Участок в створах 33.1–34.0 км от истока	Участок в створах 34.0–52.6 км от истока	Участок в створах 33.1–34.0 км от истока	Участок в створах 34.0–52.6 км от истока
Приращение площади водосбора, км ²	11	115	11	115
Приращение расхода воды, м ³ /с	0.004	0.102	0.004	0.008
Приращение стока, г/с				
Взвешенные вещества	239.0	17586.4	320.0	мп
Мутность	139.1	334.2	мп	743.0
$\Sigma_{ми}$	мп	128308.3	1587.3	26041.5
Ca ²⁺	мп	10128.0	мп	1424.0
Mg ²⁺	2756.4	2923.2	143.6	521.8
Na ⁺	мп	35041.5	мп	7351.0
K ⁺	мп	591.3	мп	75.0
HCO ₃ ⁻	мп	мп	1268.0	мп
CO ₃ ²⁻	6819.0	2142.0	мп	мп
SO ₄ ²⁻	1035.5	7136.1	63.7	3000.8
Cl ⁻	мп	66557.2	0.0	12644.9
NH ₄ ⁺	28.540	мп	0.100	20.150
NO ₂ ⁻	9.293	мп	мп	0.166
NO ₃ ⁻	мп	1618.350	1.200	359.400
Фосфаты	мп	мп	1.080	2.580
Si	мп	555.6	33.4	мп
C _{орг.}	2538.5	2642.6	3.0	6.0
F ⁻	0.000	42.600	1.120	4.760
P	5.251	мп	мп	0.806
Fe	мп	148.410	0.860	3.640
Li	мп	5.517	мп	1.564
Ba	мп	4.362	мп	0.160
Al	мп	7.239	мп	0.632
Pb	0.070	0.080	мп	0.030
Cu	мп	0.198	0.011	0.138
As	мп	0.269	мп	0.089
Mn	5.556	19.269	3.050	3.880
Co	мп	0.094	0.005	0.035
Cr	0.147	0.982	0.047	мп
Ni	мп	0.537	мп	0.108
V	мп	1.180	0.004	0.189
Rb	мп	0.383	мп	0.061
Cs	мп	0.006	мп	0.002
Zr	0.083	мп	0.001	0.002
Ti	мп	1.006	мп	0.126
Be	мп	0.005	мп	0.025
Se	0.037	0.383	мп	0.069
Nb	мп	0.011	0.001	0.000
Mo	0.024	0.108	мп	0.006
Sr	мп	96.630	1.560	20.760
Y	мп	0.033	мп	0.001
La	мп	0.041	0.001	мп
Ce	мп	0.085	мп	0.009
Eu	мп	0.001	мп	0.001
Lu	мп	0.001	мп	мп
Th	мп	0.010	мп	мп
U	0.042	0.078	0.008	0.016

Примечание: мп — меньше погрешности определения геохимического стока (ориентировочно — 10 %)

атмосферными осадками или концентрирования за счет испарения влаги, но и других процессов.

Очевидно, что в случае главных ионов и кремния к таким процессам относятся выщелачивание и растворение подстилающих и водовмещающих горных пород, речных отложений и наносов, атмосферного аэрозоля, а в случае органических веществ — фотосинтез. Следует отметить, что формирование растительного и почвенного покрова по своей сути заключается в избирательной временной аккумуляции тех или иных химических элементов из коренных пород, атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод (например, среднее содержание фосфора в золе ветвей подрастающей хвойных пород — 1189.4 мг/кг, в торфах — продуктах неполного разложения растительных остатков — 810.5 мг/кг, в минеральных почвах — питательной среде растений — 540.5 мг/кг, в донных отложениях — 752.2 мг/кг). После завершения характерного времени функционирования растительного или почвенного объекта аккумуляция сменяется выносом, но уже не исходных веществ, а продуктов их трансформации.

С учетом этого наиболее вероятный механизм перераспределения и трансформации вещества в водосборе выглядит следующим образом:

1) при выпадении дождей и таянии снега активизируются водно-эрозионные процессы, в результате которых на спаде паводков и половодья на поверхности водосбора и в русловой сети аккумулируются значительное количество твердого вещества [11];

Таблица 4
Элементы среднегоголетнего геохимического баланса водосбора р. Ильбокич, мг/с

Показатель	Приток со снего-талыми водами G_{sm}	Приток с дождевыми водами G_r	Подземный сток в период ледостава G_{ic}	Подземный сток в период открытого русла G_{oc}	Суммарный сток G , без поправки	Разница ΔG без поправки	G , с поправкой	ΔG с поправкой
Взвешенные вещества	18378.2	29478.1	1882.0	18855.7	35977.0	-32617.0	10433.3	-58160.7
Мутность	7860.4	12607.8	1162.9	3095.7	6678.8	-18048.0	1936.8	-22789.9
Σ_{mi}	31983.1	51300.0	102676.7	34241.2	863862.6	643661.6	250520.2	30319.1
Ca^{2+}	5278.7	6696.5	10287.6	4708.3	99791.8	72820.8	28939.6	1968.6
Mg^{2+}	1436.1	2994.4	4853.0	2251.1	40020.7	28486.0	11606.0	71.3
Na^+	1615.9	1449.1	12775.6	1000.5	88825.1	71984.1	25759.3	8918.2
K^+	254.7	408.6	346.6	86.8	3066.5	1969.8	889.3	-207.4
HCO_3^-	15326.5	26818.2	51158.3	24065.1	465954.9	348586.7	135126.9	17758.7
CO_3^{2-}	<1	<1	<1	971.1	15592.5	14621.4	4521.8	3550.7
SO_4^{2-}	2796.1	7094.2	6274.9	1059.4	39269.6	22045.2	11388.2	-5836.3
Cl^-	5275.2	5115.2	16980.6	98.9	111341.6	83871.6	32289.1	4819.1
NH_4^+	61.08	73.93	30.75	13.15	566.53	387.61	164.29	-14.63
NO_2^-	111.68	26.87	1.17	1.00	13.64	-127.08	3.96	-136.77
NO_3^-	859.80	614.32	525.56	29.43	3513.50	1484.39	1018.92	-1010.19
Фосфаты	60.05	96.31	45.85	25.60	636.69	408.88	184.64	-43.17
Si	375.73	602.66	1309.99	827.48	14472.41	11356.55	4197.00	1081.14
$C_{орг.}$	777.97	567.20	125.80	256.92	15728.90	14001.01	4561.38	2833.49
F^-	—	—	50.32	20.60	509.35	—	147.71	#ЗНАЧ!
P	28.81	46.22	10.29	3.28	134.36	45.76	38.96	-49.63
Fe	904.75	804.75	26.28	215.11	852.39	-1098.50	247.19	-1703.69
Li	0.57	0.91	4.98	1.29	45.48	37.73	13.19	5.44
Ba	10.13	14.26	6.71	2.65	60.03	26.29	17.41	-16.33
Al	280.88	450.52	3.69	87.25	45.43	-776.91	13.17	-809.16
Pb	1.43	3.62	0.13	0.18	1.26	-4.10	0.37	-5.00
Cu	3.78	5.76	0.49	1.45	4.10	-7.38	1.19	-10.29
As	0.18	0.28	0.18	0.06	2.12	1.43	0.61	-0.07
Mn	67.15	139.03	27.45	33.46	173.70	-93.39	50.37	-216.72
Co	0.70	1.13	0.09	0.15	0.71	-1.36	0.21	-1.87
Ni	2.35	2.05	0.98	0.35	7.61	1.89	2.21	-3.52
V	1.04	1.66	0.41	0.08	3.29	0.11	0.95	-2.23
Rb	0.355	0.569	0.211	0.074	1.637	0.428	0.475	-0.734
Cs	0.025	0.041	0.003	0.002	0.017	-0.054	0.005	-0.066
Ti	5.651	9.064	1.062	0.953	7.334	-9.397	2.127	-14.604
Be	0.060	0.096	0.046	0.006	0.278	0.070	0.081	-0.127
Se	0.520	0.834	0.165	0.049	1.286	-0.281	0.373	-1.195
Nb	0.0106	0.0170	0.0034	0.0059	0.0379	0.0010	0.011	-0.026
Mo	0.0795	0.1276	0.0794	0.0892	0.9381	0.5625	0.272	-0.104
Sr	13.5	21.6	88.9	22.2	779.6	633.4	226.1	79.8
Y	0.4578	0.7343	0.0239	0.2130	0.4101	-1.0189	0.1189	-1.3101
La	0.3624	0.5812	0.0113	0.1746	0.1852	-0.9443	0.0537	-1.0758
Ce	0.7655	1.2279	0.0230	0.3970	0.3226	-2.0908	0.0935	-2.3198
Lu	0.0063	0.0101	0.0004	0.0031	0.0053	-0.0145	0.0015	-0.0183
Th	0.0217	0.0348	0.0008	0.0037	0.0245	-0.0366	0.0071	-0.0539
U	0.0332	0.0532	0.1163	0.1620	1.0161	0.6514	0.2947	-0.0700

2) вследствие механических разрушений увеличивается суммарная площадь твердых частиц и, следовательно, площадь контакта с атмосферным воздухом, речными водами и верховодкой. Соответственно усиливается

выщелачивание и растворение твердых частиц, минеральный и химический состав которых сформировался в условиях, заметно отличающихся от условий их нахождения в рассматриваемый период времени;

3) дополнительное усиленное выщелачивание и растворение твердых частиц может быть связано с поступлением органических веществ в речную сеть с поверхностным стоком; в ряде случаев образование органоминеральных соединений может приводить к существенному увеличению суммарного выноса химических элементов с речными водами (например, увеличение выноса железа в виде коллоидных соединений с фульвокислотами, а в других, напротив, к выведению из раствора малорастворимых соединений, например, гуматов кальция, обнаруживаемых в виде фракции гуминовых кислот ГК-2 в составе пойменных почв [6];

4) при увеличении температур атмосферного воздуха (5–10 °С и более) активизируются процессы фотосинтеза, сопряженные с временной аккумуляцией соединений углерода, фосфора, азота, кремния. При этом важным источником вещества являются продукты водно-эрозионных процессов предыдущих этапов геохимического цикла;

5) при отмирании наземных и водных растений часть аккумулированных ранее веществ участвует в формировании почвенного покрова, часть выносятся с водным стоком или поступает в атмосферный воздух (например, увеличение концентраций Si в речных водах в зимний период после отмирания диатомовых водорослей [5]);

6) эти вещества и в том, и в другом случае с большой вероятностью мигрируют в форме, отличающейся от исходной. В некоторых случаях происходит концентрирование веществ, например, осаждение малорастворимых гидроксидов Fe³⁺ [12], гуматов кальция, магния и ряда других металлов, фосфатов РЗЭ [14, 15].

Заключение

Предложена методика составления и анализа геохимического баланса водосбора малой реки с целью выявления и/или обоснования факторов формирования химического состава компонентов окружающей среды. Апробация методики выполнена на примере водосбора малой р. Ильбокич в междуречье Ангары и Подкаменной Тунгуски (Средняя Сибирь) — перспективной территории для поисков твердых полезных ископаемых. Показано, что в пределах водосбора указанной реки происходит концентрирование ряда химических элементов в некоторые фазы гидрологического режима и вегетационного цикла растений с последующей трансформацией их форм нахождения и частичным выносом с водным стоком. Благодаря этому их аккумуляция в поверхностных и подземных водных объектах возможна как при наличии, так и при отсутствии какого-либо относительно мощного источника. В частности, соединения Fe и, видимо, РЗЭ могут накапливаться в виде малорастворимых гидроксидов и соединений с фосфором в торфах и болотных водах при отсутствии в

районе исследования выходов горных пород с высоким содержанием соответствующих элементов. Если же гидрологические и климатические условия, определяющие водно-эрозионные процессы и вовлеченность в биогеохимические процессы, в течение длительного времени (в геологическом масштабе) существенно не меняются, то вероятно накопление веществ, вплоть до региональных геохимических аномалий.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 17–05–00042, 18–55–80015.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфан, А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. / А.Н. Гельфан. — М.: Наука, 2007. — 279 с.
2. Геологическая карта СССР масштаба 1: 200000. Сер. Ангаро-Ленская. Лист О-47-IX. Объяснительная записка. — М.: Мингео СССР, 1980.
3. Головин, А.А. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1: 200000 / А.А. Головин, Н.Н. Москаленко, А.И. Ачкасов и др. — М.: ИМГРЭ, 2002. — 92 с.
4. ГОСТ Р 51592–2000. Вода. Общие требования к отбору проб. — 2001.
5. Молчанова, Я.П. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / Я.П. Молчанова, Е.А. Заика, Э.И. Бабкина, В.А. Сурнин / Под ред. Т.В. Гусевой. — М.: «ФОРУМ», «ИНФРА-М», 2007. — 192 с.
6. Орлов, Д.С. Органическое вещество почв Российской Федерации / Д.С. Орлов, О.Н. Бирюкова, Н.И. Суханова. — М.: Наука, 1996. — 256 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Т. 15. — Вып. 2. Алтай и Западная Сибирь. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 408 с.
8. Савичев, О.Г. Эколого-геохимическое состояние окружающей среды в Северном Приангарье (Восточная Сибирь) / О.Г. Савичев, Ю.Г. Копылова, А.А. Хващевская // Изв. ТПУ — 2010. — Т. 316. — № 1. — С. 129–136.
9. Савичев, О.Г. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек / О.Г. Савичев, А.О. Иванов // Изв. РАН. Сер. географическая. — 2010. — № 1. — С. 63–70.
10. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2012 г. / Информационный бюллетень, вып. 9 / Под ред. В.А. Лыготина. — Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», ООО «СтандАрт», 2013. — 184 с.
11. Чалов, Р.С. Руслые процессы (руслеведение) / Р.С. Чалов. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 569 с.
12. Шварцев, С.Л. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода — порода / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев и др. / Т. 2. Система вода — порода в условиях зоны гипергенеза / Отв. ред. Б.Н. Рыженко. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 389 с.
13. Allen, R.G. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements — FAO Irrigation and drainage paper 56 / R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith // Water Resources, Development and Management Service FAO. FAO — Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. — 1998. — 276 p.
14. López-Buendía, A.M. Origins of mineral matter in peat marsh and peat bog deposits, Spain / A.M. López-Buendía, M.K.G. Whateley, J. Bastida, M.M., Urquiola // International Journal of Coal Geology. — 2007. — Vol. 71. — P. 246–262. / doi:10.1016/j.coal.2006.09.001.
15. Vodyanitskii, Yu.N. Geochemistry of carbonatic/sulphatic soils in the southern Angara region, Russia / Yu.N. Vodyanitskii, N.D. Kiseleva, O.G. Lopatovskaya, A.T. Savichev // Annals of agrarian science. — 2016. — No. 14. — p. 140–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.016>.

© Домаренко В.А., Савичев О.Г., Улаева С.С., 2019

Домаренко Виктор Алексеевич // Viktor_Domarenko@mail.ru
Савичев Олег Геннадьевич // OSavichev@mail.ru
Улаева Светлана Сергеевна // ulaeva.s.s@gmail.com