

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 556.16.047

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(32-43)

**ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА
В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ: ОЦЕНКА МЕТОДАМИ ТРАССЕРНОЙ
ГИДРОЛОГИИ ПО ДАННЫМ РЕЖИМНЫХ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ****Т.С. Губарева^{1,2}, Б.И. Гарцман¹, Н.Г. Василенко³**¹ *Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; Tgubareva@bk.ru*² *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия*³ *Государственный гидрологический институт, 199053, С.-Петербург, ул. 2-я линия В.О., 23, Россия*

С использованием данных архивных режимных гидрохимических и гидрологических наблюдений в бассейне р. Нелка установлена возможность моделирования взаимодействия различных источников питания речного стока на основе модели смешения, включающей инструмент многомерного статистического анализа – метод главных компонент. Для пяти малых водосборов выполнена адаптация и тестирование модели смешения трех источников питания, характеризующейся высокой точностью воспроизведения химического состава речных вод. Результаты моделирования позволили оценить число преимущественных источников питания речного стока и уточнить их характер (дождевой, почвенно-грунтовой и тало-мерзлотный), отражающий специфику стокоформирования в криолитозоне и связанный с присутствием в бассейне многолетнемерзлых пород. Количественно определены доли каждого из них и проанализирована их взаимная внутрисезонная динамика. Применение статистических критериев оценки и возможность содержательной интерпретации результатов показывают высокое качество моделирования.

Процессы стокоформирования, область многолетней мерзлоты, источники питания, модель смешения, метод главных компонент, химические трассеры

**SOURCES OF RIVER FLOW FORMATION IN THE ZONE OF PERMAFROST:
ESTIMATION BY THE METHODS OF TRACER HYDROLOGY ACCORDING
TO THE DATA OF REGIME HYDROCHEMICAL OBSERVATIONS****T.S. Gubareva^{1,2}, B.I. Gartsman¹, N.G. Vasilenko³**¹ *Water Problem Institute, RAS, 7, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia; Tgubareva@bk.ru*² *Pacific Institute of Geography, FEB RAS, 7, Radio str., Vladivostok, 690041, Russia*³ *State Hydrological Institute, 23, 2nd line V.O., St. Petersburg, 199053, Russia*

The possibility of modeling the interaction among various sources of the river flow in the Nelka River basin using data from archival regime hydrochemical and hydrological observations based on a mixing model, including the principal component analysis, has been confirmed. Adaptation and testing of the mixing model for three water sources characterized by high accuracy of the chemical composition of river waters is performed for five small watersheds. The results of the modeling made it possible to estimate the number of the dominant sources of the river runoff and clarify their nature – rain, soil water, and aufeis, reflecting the specificity of river runoff formation in the permafrost zone and associated with the presence of frozen ground. The proportions of each of them are estimated, and their inter-seasonal dynamics are analyzed. The application of statistical evaluation criteria and the meaningful interpretation of the results confirm the high quality of the modeling performed.

Runoff processes, permafrost zone, water sources, mixing model, principal component analysis, chemical tracers

ВВЕДЕНИЕ

Изучение источников питания и закономерностей формирования речного стока неизменно остается фундаментальной проблемой гидрологии суши, содержательно обновляясь на каждом этапе ее развития. Сложность таких исследований обусловлена локализацией процессов стокоформирования в подземной части водосбора, где прямые наблюдения практически невозможны. Поскольку

ключ к пониманию гидрологических процессов “лежит” под земной поверхностью [Соколов, 1996], перспективным инструментарием являются трассерные методы.

К настоящему времени значительный прогресс достигнут в оценивании источников питания речных вод [Гидрогеологическое прогнозирование, 1988; Эдельштейн, Смахтина, 1991; Kirkby,

1978; Dunne, 1983]. В основном это обеспечено использованием активно развивающихся с 1960-х гг. методов разделения гидрографа стока на базе модели смешения с использованием трассеров. После пионерной работы П.П. Воронкова [1963] химические трассеры стали успешно применяться для оценивания вкладов различных источников питания стока [Пусарский, Хаустов, 1973; Pinder, Jones, 1969; Christophersen et al., 1990; Hooper et al., 1990].

Методический аппарат трассерной гидрологии реализован, в частности, в виде различных вариантов моделей смешения, построенных на решении системы уравнений баланса масс для воды и трассеров. Это направление получило существенное развитие за последние 20 лет с привлечением методов многомерного анализа данных, что привело к переходу от простейших моделей смешения двух источников к моделям смешения трех источников в качестве основного рабочего инструмента [Christophersen, Hooper, 1992; Bonell, Fritsch, 1997; Hooper, 2003].

Обобщение результатов натурных исследований с использованием моделей смешения, проводимых преимущественно в гумидном умеренном и тропическом поясах, продемонстрировало большую сложность процессов формирования речного стока [Соколов, 1996; Bonell, Fritsch, 1997]. Для криолитозоны уровень понимания процессов стокообразования остается далеко не достаточным, а объемы исследований на порядок меньше [Tetzlaff et al., 2015]. В указанной работе отмечено отсутствие публикаций по трассерным исследованиям, проведенным в России.

В настоящее время велик разброс оценок и интерпретаций результатов трассерных исследований, а в обобщающих работах сформулированы две ключевые задачи их развития. Первая заключается в выполнении целенаправленных натурных измерений на современном уровне [Гарцман, Шамов, 2015; Tetzlaff et al., 2015]. Вторая касается оценки адекватности применяемых моделей смешения и расчетных методов оценки времени добега в подземной составляющей системы [Соколов, 1996].

Цель исследования – оценить возможность установления источников питания речного стока в области многолетней мерзлоты по данным, полученным по стандартной программе режимных гидрологических и гидрохимических наблюдений (на примере р. Нелка). Методическую основу составляет трассерная модель смешения источников питания и соответствующие ей аналитические процедуры (End-Member Mixing Analysis – ЕММА), а также процедуры моделирования химического состава речной воды методом главных компонент (МГК) [Hooper, 2003]. Главные задачи:

установить, какие химических показатели могут рассматриваться в качестве трассеров; определить характер (тип) доминирующих источников питания речных вод; выявить особенности процессов смешения на частных водосборах бассейна р. Нелка; количественно оценить соотношения и динамику источников питания.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Объектами исследования являются малые водосборы экспериментального гидрологического полигона “Могот” Государственного гидрологического института (ГГИ), расположенного в пределах центрального участка трассы БАМ, примерно в 60 км к северу от г. Тынды. Полигон, включающий бассейн р. Нелка с притоками (рис. 1), находится в средней части южных склонов хребтов Станового и Тукурингра. Рельеф водосбора – среднегорный, абсолютные отметки не превышают 800–1000 м, диапазон высот составляет 523 м. Склоны сопки северной и северо-восточной экспозиции – крутые. На склонах развиты бугры пучения, в руслах – речные наледы.

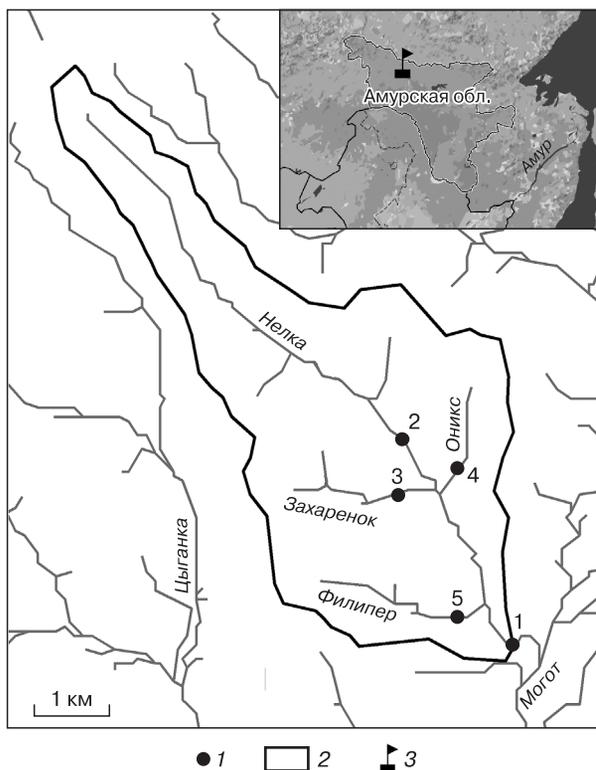


Рис. 1. Карта-схема исследуемого района.

1 – замыкающие гидростворы (названия см. в табл. 1); 2 – граница бассейна р. Нелка; 3 – местоположение полигона на фрагменте карты России.

Таблица 1. Список гидрологических створов, гидрохимические показатели речных вод и количество отобранных проб

Номер	Река-створ	F, км ²	Гидрохимические показатели	Количество проб за период					Общее кол-во
				1978–1979 гг.	1980 г.	1981 г.	1982 г.	1983 г.	
1	Нелка-2	30,8	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ + K ⁺ , Σи	11	21	19	49	22	122
2	Нелка-3	16,0		3	24	22	43	21	113
3	Захаренок-4	5,8		8	12	21	42	22	105
4	Ониск	3,0		12	19	19	38	21	109
5	Филлипер-1	4,7		10	18	20	38	21	107

Примечание. F – площадь водосбора до замыкающего створа; Σи – сумма главных ионов.

Таблица 2. Химический состав природных вод бассейна р. Нелка

Река-створ	Σи, мг/л	Содержание ионов											
		мг/л					% экв.						
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
<i>В речных водах во время весеннего половодья</i>													
Нелка-2	$\frac{11,1-44,6}{28,5}$	$\frac{0,9-3,7}{2,1}$	$\frac{5,2-26,4}{16,1}$	$\frac{0-7,2}{0,63}$	$\frac{1,0-3,8}{2,2}$	$\frac{0,6-2,3}{1,3}$	$\frac{0,3-12,8}{5,0}$	9,0	40,0	1,0	15,2	13,3	21,4
Нелка-3	$\frac{11,5-46,6}{27,3}$	$\frac{1,0-3,4}{2,1}$	$\frac{4,5-28,8}{16,7}$	$\frac{0-0,3}{0,001}$	$\frac{0,4-2,9}{1,8}$	$\frac{0,5-2,6}{1,2}$	$\frac{0,2-12,5}{5,5}$	7,9	42,0	0	11,2	12,9	25,9
Захаренок-4	$\frac{10,3-47,2}{27,1}$	$\frac{1,4-5,9}{2,3}$	$\frac{3,7-28,2}{15,4}$	$\frac{0-6,5}{0,6}$	$\frac{0,8-3,5}{2,1}$	$\frac{0,5-2,8}{1,3}$	$\frac{0,5-9,3}{4,91}$	9,9	39,2	0,9	13,5	13,7	22,8
Ониск	$\frac{13,0-57,0}{32,5}$	$\frac{0,6-7,3}{2,3}$	$\frac{3,0-34,8}{18,7}$	$\frac{0-7,3}{1,1}$	$\frac{1,6-5,2}{3,1}$	$\frac{0,5-3,0}{1,6}$	$\frac{0,3-17,0}{5,2}$	8,9	39,0	2,1	15,2	13,5	21,3
Филлипер-1	$\frac{12,1-61,6}{31,7}$	$\frac{1,2-6,8}{2,4}$	$\frac{4,5-40,8}{19,5}$	$\frac{0-0,9}{0,036}$	$\frac{1,2-3,9}{2,5}$	$\frac{0,7-3,3}{5,7}$	$\frac{0,2-13,2}{5,7}$	8,4	41,5	0,1	14,7	12,7	22,7
<i>В речных водах во время дождевых паводков</i>													
Нелка-2	$\frac{11,8-39,2}{26,4}$	$\frac{1,2-8,4}{2,9}$	$\frac{4,5-24,0}{13,4}$	$\frac{0-9,2}{2,2}$	$\frac{1,2-3,3}{2,0}$	$\frac{0,3-2,0}{1,0}$	$\frac{0,8-9,7}{5,3}$	10,1	35,8	4,1	12,7	10,7	26,6
Нелка-3	$\frac{14,2-40,4}{24,7}$	$\frac{1,2-6,2}{2,6}$	$\frac{5,1-28,7}{14,4}$	$\frac{0-4,9}{1,1}$	$\frac{0,6-2,6}{1,5}$	$\frac{0,1-2,2}{0,9}$	$\frac{0,8-16,0}{6,1}$	9,4	38,5	2,1	10,0	9,7	30,3
Захаренок-4	$\frac{11,1-40,3}{27,8}$	$\frac{1,0-6,6}{2,5}$	$\frac{5,1-25,8}{15,7}$	$\frac{0-4,3}{0,7}$	$\frac{1,0-3,0}{1,7}$	$\frac{0,5-1,9}{1,1}$	$\frac{0,5-10,2}{6,1}$	8,9	39,6	1,5	11,2	11,3	27,5
Ониск	$\frac{14,5-40,4}{31,5}$	$\frac{1,2-5,4}{2,3}$	$\frac{6,8-33,5}{16,9}$	$\frac{0-35,1}{2,5}$	$\frac{1,0-8,8}{2,4}$	$\frac{0,5-2,9}{1,3}$	$\frac{0,5-18,0}{6,2}$	7,3	39,3	3,4	13,3	11,7	25,0
Филлипер-1	$\frac{10,6-37,0}{27,8}$	$\frac{1,2-9,1}{2,9}$	$\frac{6,4-24,0}{15,4}$	$\frac{0-6,1}{0,7}$	$\frac{0,9-3,3}{1,9}$	$\frac{0,1-2,3}{1,1}$	$\frac{0,3-10,5}{5,8}$	10,4	38,4	1,2	11,1	10,0	28,9
<i>В речных водах во время летне-осенней межени</i>													
Нелка-2	$\frac{15,1-58,4}{28,4}$	$\frac{0,7-7,4}{2,2}$	$\frac{5,3-21,1}{10,7}$	$\frac{0-22,8}{7,5}$	$\frac{1,1-5,2}{2,4}$	$\frac{0,4-3,2}{1,3}$	$\frac{0,5-13,7}{4,5}$	7,1	28,7	14,2	15,2	12,8	22,0
Нелка-3	$\frac{11,0-42,2}{26,7}$	$\frac{0,5-9,1}{2,5}$	$\frac{6,4-23,3}{12,1}$	$\frac{0-18,6}{3,8}$	$\frac{0,5-4,0}{1,4}$	$\frac{0,2-2,3}{0,9}$	$\frac{1,0-11,5}{6,1}$	8,7	34,2	7,1	9,5	10,4	30,1

Захаренок-4	9.2–40.3 23.6	0.8–8.0 2.7	5.1–18.5 11.2	0–9.2 2.7	0.4–3.8 1.5	0.2–2.2 0.9	0.3–9.5 4.8	9.9	34.8	5.3	11.3	11.5	27.3
Ониск	15.0–41.5 28.7	0.7–6.9 2.8	4.1–20.2 12.1	0–17.1 5.3	1.4–4.0 2.6	0.2–2.8 1.3	1.0–8.7 4.5	8.9	31.1	10.0	15.5	13.0	21.5
Филлипер-1	9.4–40.5 23.9	0.7–7.3 2.8	6.0–17.7 12.0	0–6.6 1.7	0.5–3.6 1.5	0.4–2.3 1.1	0.5–9.0 4.6	10.5	35.9	3.7	11.2	13.7	25.2
<i>В пробах почвенно-склоновых вод, отобранных на в/б площадках</i>													
В/б № 1	15.4–67.9 34.2	1.2–17.5 3.49	4.4–34.2 14.2	0–23.4 6.28	2.2–6.7 3.37	0.5–4.0 1.54	1.0–15.1 5.39	9.7	32.3	8.1	20.0	12.9	17.1
В/б № 2	17.9–76.9 29.9	1.0–3.8 1.89	5.2–28.2 12.9	0–41.6 6.7	1.2–4.7 2.92	0.4–5.0 1.73	0.5–15.5 3.66	6.8	32.5	10.7	18.8	15.9	15.3
В/б № 3	18.9–88.3 44.9	0.9–2.6 1.95	7.2–29.4 13.9	0–52.0 17.0	2.7–15.1 6.2	0.3–2.7 1.46	0.8–9.0 4.36	5.4	26.6	18.1	24.2	10.4	15.4
<i>В наледных водах</i>													
Могот	34.8–88.3 44.9	2.3–5.9 3.48	15.4–31.4 21.2	0–9.6 5.18	0.6–3.1 1.45	1.0–1.7 1.23	6.8–19.5 11.4	7.6	35.1	7.3	6.3	8.3	35.4
<i>В пробах атмосферных осадков (снег)</i>													
Градиентная площадка	17.4–23.4 20.2	1.7–4.1 2.7	8.3–13.0 10.2	Н/о	Н/о	Н/о	6.3–8.2 7.3	13.1	36.9	0	0	0	50.0

Примечание. Концентрация, выраженная в мг/л: числитель – пределы изменения, знаменатель – средние значения; в %-экв. – средние значения. Н/о – не обнаружено.

Почвы представлены различными сочетаниями мерзлотных горно-таежных почв с укороченным профилем и обилием гравелистых включений. Для них характерно наличие двух типов почвенного льда – цемент (в крупнообломочных несвязных грунтах) и миграционный лед (главным образом в мелкодисперсных грунтах, в виде прослоек и линз толщиной 1–5 мм). На дне долин распространены торфяные мари, для которых характерна высокая насыщенность льдом. Сплошная многолетняя мерзлота на полигоне имеет мощность 100–250 м, средний слой сезонного протаивания достигает 1.2–1.5 м. Залесенность водосборов составляет 80–90 %.

Детальное описание бассейнов, материалы натуральных наблюдений и результаты исследований гидрологического режима приведены в [Василенко, 2013]. Гидрологические наблюдения за стоком (измерение уровней и расходов воды) выполнялись на пяти гидростворах (см. рис. 1, табл. 1) в период с 1978 по 1983 г. по стандартной программе водно-балансовых станций, наблюдения за осадками проводились на метеостанции и сети осадкомерных пунктов. В рамках стандартной программы режимных гидрохимических наблюдений отбирались пробы воды, анализ которых позволил осветить основные фазы стока: начало стока в весенний период, подъем, пик и спад половодья и дождевых паводков. Количество проб по годам приведено в табл. 1, их обработка выполнялась сотрудниками экспедиции Новочеркасского гидрохимического института в соответствии с [Руководство..., 1977]. Результаты сведены в табл. 2.

Систематические наблюдения за химическим составом источников питания (за исключением внутриводных вод) не проводились, имеются лишь отдельные пробы атмосферных осадков (снега). В 1982 г. были отобраны пробы наледных вод из обширной наледи на р. Могот в нескольких точках, а в 1983 г. опробованы русловые и пойменные наледи на различных участках бассейна р. Нелка. Поверхностный сток на склонах бассейна не наблюдался, а преобладающее значение имеет внутриводный сток, или сток по “каменным трубкам” [Василенко, 2013]. Для характеристики химического состава почвенных вод использовались пробы, отобранные со склоновых водно-балансовых (в/б) площадок на типичных склонах бассейна: в/б № 1 – на делювиальном шлейфе, в/б № 2 – в нижней части светового склона, в/б № 3 – на теневом склоне восточной экспозиции.

МЕТОДЫ ТРАССЕРНОГО АНАЛИЗА

Применяемые методы анализа подробно описаны авторами ранее [Губарева и др., 2015, 2016]. Количественное оценивание долей источников

питания речного стока возможно на основе двух-трассерной модели смешения трех источников:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_T, \\ C_1^1 Q_1 + C_2^1 Q_2 + C_3^1 Q_3 = C_T^1 Q_T, \\ C_1^2 Q_1 + C_2^2 Q_2 + C_3^2 Q_3 = C_T^2 Q_T, \end{cases} \quad (1)$$

где Q – расход воды; C – концентрации трассеров; верхний индекс – номер трассера; нижний – номер источника питания; индексом T обозначены характеристики речного потока. Решение этой системы записывается в виде

$$Q_1 = \frac{(C_T^1 - C_3^1)(C_2^2 - C_3^2) - (C_2^1 - C_3^1)(C_T^2 - C_3^2)}{(C_1^1 - C_3^1)(C_2^2 - C_3^2) - (C_2^1 - C_3^1)(C_1^2 - C_3^2)} Q_T,$$

$$Q_2 = \frac{C_T^1 - C_3^1}{C_2^1 - C_3^1} Q_T - \frac{C_1^1 - C_3^1}{C_2^1 - C_3^1} Q_1, \quad (2)$$

$$Q_3 = Q_T - Q_1 - Q_2.$$

В качестве трассеров могут выступать различные химические показатели природных вод, например: общая минерализация, концентрации главных ионов, микрокомпонентов, изотопов кислорода и водорода, растворенного органического вещества и др.

Отдельные химические показатели редко проявляют хорошие трассерные свойства, поэтому в настоящее время широко используется специальная статистическая процедура ЕММА-анализа [Christophersen, Hooper, 1992]. Ее суть заключается в формировании двух сложных модельных трассеров, значения концентраций каждого из которых представляют собой линейную комбинацию концентраций исходных трассеров. Ядро процедуры – метод главных компонент, который проецирует матрицу исходных данных в пространство взаимно ортогональных главных компонент (U -пространство) [Эсбенсен, 2005].

Коэффициенты перехода из исходного в U -пространство (нагрузки) применяются для исследования роли переменных и анализа их взаимных зависимостей. Доли объясненной дисперсии данных для каждой компоненты определяются величиной собственных характеристических значений λ . Эти значения вычисляются как суммы квадратов проекций всех измерений на каждую ось U -пространства, показывая вклад главных компонент в общую вариабельность исходных данных.

Далее при решении модели смешения трех источников вместо концентраций двух обычных трассеров используются значения первых двух главных компонент. Оценочный критерий качества модели с тремя источниками – доля суммар-

ной дисперсии данных, объясненной первыми двумя главными компонентами λ_{11} , которая должна составлять не менее 90 %.

Гипотеза консервативности трассеров проверяется с помощью методики, основанной на моделировании химического состава воды по МГК [Hooper, 2003]. По описанной выше модели смешения трех источников рассчитывают концентрации исходных химических показателей. Разности фактических и расчетных значений концентраций (остатки) при условии консервативности трассеров должны представлять собой случайный “шум”. Проверка консервативности выполняется построением зависимости “остатки – измеренные значения” для каждого гидрохимического показателя.

Интерпретация модели смешения трех источников, построенной с помощью ЕММА-анализа, предполагает, что химический состав речных вод контролируется смешением трех водных масс различного и относительно стабильного состава. Для их установления отбираются пробы воды в разных пунктах, характеризующих потенциальные источники питания: атмосферные воды, различные типы почвенных и подземных вод (с помощью ловушек, лизиметров, скважин, из родников и т. п.). Репрезентативные по отношению к источникам пункты определяются путем анализа диаграмм смешения [Christophersen et al., 1990]. Средние значения концентраций трассеров по каждому пункту проецируются в точки двумерного U -пространства модельных трассеров.

Точки, репрезентативные по отношению к источникам, образуют поле смешения треугольной формы, внутри которого оказываются все (почти все) точки, соответствующие речным пробам, – при соблюдении консервативности смешивания, правильном отборе трассеров и адекватности интерпретации источников. Далее рассчитываются доли источников в каждом измеренном расходе по уравнениям (2). В заключение выполняется валидация модели путем расчета по уравнениям модели смешения (1) модельных концентраций трассеров в речных водах и сравнения их с наблюдаемыми концентрациями.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО СОСТАВА РЕЧНЫХ ВОД

Общая минерализация речных вод бассейна невелика и колеблется от 10 до 62 мг/л. В году прослеживается два пика минерализации, первый – при прохождении весеннего половодья (максимальные значения 40–62 мг/л), второй – в период перед ледоставом или перемерзанием (37–45 мг/л).

Содержание SO_4^{2-} в речных водах относительно высокое – в период весеннего половодья оно достигает наибольших значений 15–26 мг/л.

При затяжном и распластанном половодье максимальное содержание SO_4^{2-} отмечается при прохождении первых дождевых паводков, достигая 40–47 %-экв. Наименьшее содержание SO_4^{2-} отмечается в августе–сентябре – 5–10 мг/л (25–28 %-экв).

Сезонная динамика содержания SO_4^{2-} обусловлена миграцией незамерзшей воды и водорастворимых веществ в сторону более низких температур: в зимний период к поверхности деятельного слоя, летом – вниз по профилю грунта [Попов, 1967; Иваник, 1978]. Особенно ярко это проявляется в районах неглубокого залегания сульфидных руд, где интенсивность физико-химических процессов в мерзлых грунтах усиливается процессами окисления сульфидов [Шварцев, 1965]. Для иона SO_4^{2-} прослеживаются статистически значимые тенденции снижения концентрации по мере увеличения мощности сезонноталого слоя и количества выпадающих осадков за теплый сезон (рис. 2).

Анализ соотношения $\text{SO}_4^{2-} / \text{Ca}^{2+}$ показывает, что для всех водотоков полигона оно в среднем составляет 4–6, достигая максимальных значений (10–16) в период половодья. Повышенное относительное содержание SO_4^{2-} свидетельствует о присутствии сульфидных руд в пределах полигона Могот. В бассейнах рек Тимптон и Чульман, в 40–60 км к северу от полигона, эти руды имеют достаточно широкое распространение [Фотиев, 1965; Шварцев, 1965]. Возможными источниками ионов SO_4^{2-} могут быть также атмосферные осадки, содержащие до 8–13 мг/л SO_4^{2-} , и сера из белковых веществ, образующаяся при их разложении в результате окисления сероводорода.

Другой отличительной чертой ионного состава является минимальное содержание HCO_3^- в период весеннего половодья и далее до середины лета, когда оно нередко уменьшается до аналитического нуля. Рост содержания HCO_3^- фиксируется в период межени до 10–20 мг/л, эпизодически достигая 25–27 мг/л в период глубокой межени. Можно предположить, что главным источником поступления HCO_3^- являются почвенные воды оттаявшего деятельного слоя. При просачивании воды в почвенном покрове вследствие окисления органического вещества содержание кислорода уменьшается, а количество CO_2 увеличивается. Углекислота служит источником образования ионов HCO_3^- , наличие которых в речных водах является индикатором начала активного участия почвенных вод в питании рек.

Изменение содержания ионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ определяется фазой водного режима. В период повышенной водности по всем створам отмечается преобладание катионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ при повышенном содержании катионов Ca^{2+} . При относительных

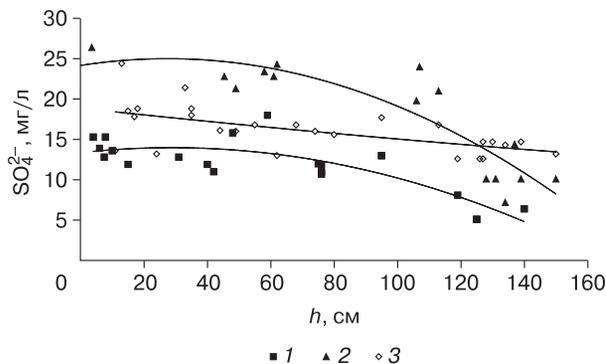


Рис. 2. Зависимости содержания SO_4^{2-} в речных водах р. Нелка от глубины протаивания почв h и суммы осадков за сезон X в теплый период года.

1 – 1979–1980 гг., $X = 350$ мм, $R^2 = 0.58$; 2 – 1981 г., $X = 495$ мм, $R^2 = 0.78$; 3 – 1982 г., $X = 595$ мм, $R^2 = 0.35$.

значениях $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ менее 15 %-экв. преобладающим катионом становится Ca^{2+} , что наиболее ярко проявляется в зимнюю межень. Концентрация Mg^{2+} колеблется от 0.3 до 3 мг/л, заметна тенденция повышенного их содержания во время половодья и в периоды низкого стока осенью. Концентрация ионов Cl^- в течение теплого периода невелика и колеблется от 1 до 5 мг/л, не изменяясь при росте минерализации.

В весенний период, когда деятельный слой почвогрунтов еще не оттаял, питание стока определяется преимущественно таянием снежного покрова и обширных наледей. Выпадающие жидкие осадки ускоряют процессы протаивания. Образовавшаяся вода поступает в русла в виде поверхностно-склонового стока (по классификации П.П. Воронкова). Химический состав этих вод формируется под влиянием суточных колебаний температуры почвы, миграции солей в сторону более низких температур, перераспределения их в растворе при периодическом замораживании и размораживании в течение суток. Преобладание иона SO_4^{2-} в составе речных вод может рассматриваться в качестве трассера специфичной водной массы, связанной с этими процессами.

В периоды повышенной водности (дождевые паводки) водотоки относятся к сульфатному классу группы $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ при минимальном содержании ионов HCO_3^- . Питание стока осуществляется преимущественно поверхностно-склоновыми и почвенно-поверхностными водами. В меженные периоды базисный сток питается собственными почвенно-грунтовыми водами, сформированными в нижней части склоновой толщи рыхлых отложений на контакте с коренными породами, индикатором которых является ион HCO_3^- .

АНАЛИЗ ТРАССЕРОВ И ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В МОДЕЛИ СМЕШЕНИЯ

Число определяемых по обычной программе режимных наблюдений химических показателей невелико, и возможности подбора природных трассеров ограничены. Тем не менее удалось найти наилучший вариант МГК-разложения для набора исходных гидрохимических показателей, включающего ионы SO_4^{2-} , HCO_3^- , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ и сумму главных ионов ($\Sigma\text{и}$), при котором суммарная доля объясненной дисперсии первыми двумя компонентами составляет более 90 % (табл. 3). Это означает возможность определения трех источников питания и оценки пропорций их смешения, обуславливающих различия в химическом составе речных вод. Примеры диаграмм смешения в пространстве первых двух главных компонент представлены на рис. 3, графики нагрузок показаны на врезках. Для всех водотоков максимальная нагрузка по первой главной компоненте приходится на $\Sigma\text{и}$ и $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Максимальная нагрузка по второй компоненте всегда приходится на ион HCO_3^- .

Таким образом, первая главная компонента объясняет варьирование химического состава воды, проявляющееся в изменении минерализации, вторая – в изменении содержания иона HCO_3^- . Можно предположить, что физический смысл первой компоненты состоит в отображении изменений положения области питания (поверхностное, почвенное и т. д.), которое тесно связано с фазой водного режима, а второй компоненты – в отображении изменений мощности деятельного слоя в результате протаивания. Это совпадает с полученной ранее интерпретацией главных компонент для рек Байкальского региона в работе [Семенов, Снытко, 2013].

Анализ графиков “остатки–измеренные значения” (рис. 4) по каждому трассеру показывает отсутствие структурированности и низкую тесноту связей (см. табл. 3), что позволяет принять гипотезу консервативности для каждого трассера. Использование принятого набора трассеров в модели смешения статистически обосновано и рационально интерпретируется.

Конфигурация поля смешения в пространстве главных компонент четко демонстрирует тре-

угольную форму для всех рек. Детально рассмотрим диаграмму смешения для р. Нелка-2 (см. рис. 3, а). Стороны треугольника проводятся как огибающие поля точек, вершины треугольника представляют положения гипотетических источников, интерпретация которых возможна на основе анализа характера проб, тяготеющих к каждому из них.

Вблизи 1-го источника располагаются в основном речные пробы, отобранные во время весеннего половодья. Кратко будем называть этот источник тало-мерзлотным, так как он представляет водную массу, связанную со стаиванием внутрипочвенного льда, русловых и пойменных наледей и снежного покрова. Условный химический состав этого источника включает максимальное по сравнению с другими содержание SO_4^{2-} – 20–36 мг/л, минимальное (на уровне аналитического нуля) содержание HCO_3^- , содержание ионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, равное 7.0–8.5 мг/л, минерализацию 35–40 мг/л.

Предполагаемый генезис 2-го источника – дождевой. Вблизи этой вершины располагаются речные пробы, отобранные на пике дождевых паводков, преимущественно августовских. Очевидно, что при обильных и регулярных осадках (сумма осадков в августе максимальна и составляет 130–200 мм) дождевые воды стекают по микроручейковой сети, дренирующей верхний переувлажненный почвенный слой. Условный химический состав дождевого источника: содержание SO_4^{2-} по сравнению с другими источниками минимальное и составляет около 4.5–7.0 мг/л, содержание HCO_3^- низкое – от аналитического нуля до 3 мг/л, величина минерализации 10–12 мг/л, содержание $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ в пределах 0.1–1.5 мг/л.

Источник 3 слабо освещен речными пробами (см. рис. 3, а), однако к нему тяготеют пробы, отобранные в период межени. Предположительно генезис этой водной массы связан с переувлажненными почвогрунтами, которые формируют основное питание рек в периоды межени стока. Условный химический состав вод этого источника: содержание SO_4^{2-} невелико и составляет 9–13 мг/л, содержание HCO_3^- максимальное по сравнению с другими источниками – 15–50 мг/л,

Таблица 3. Величины объясненной дисперсии (λ) каждой главной компоненты (ГК) и суммарной дисперсии (λ_{Σ}), объясненной первыми двумя ГК, коэффициенты детерминации (R^2) связи “остатки–измеренные значения”

Река-створ	$\lambda, \%$					R^2			
	λ_{Σ}	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	SO_4^{2-}	HCO_3^-	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$\Sigma\text{и}$
Нелка-2	93.2	56.7	36.5	6.0	0.80	0.063	0.033	0.137	0.037
Нелка-3	94.5	62.6	31.9	4.8	0.70	0.060	0.019	0.114	0.026
Захаренок-4	95.2	65.6	29.5	4.0	0.90	0.051	0.016	0.097	0.028
Оникс	91.4	58.4	32.9	8.0	0.70	0.107	0.006	0.195	0.133
Филипер-1	94.5	65.2	29.4	4.6	0.90	0.056	0.017	0.112	0.031

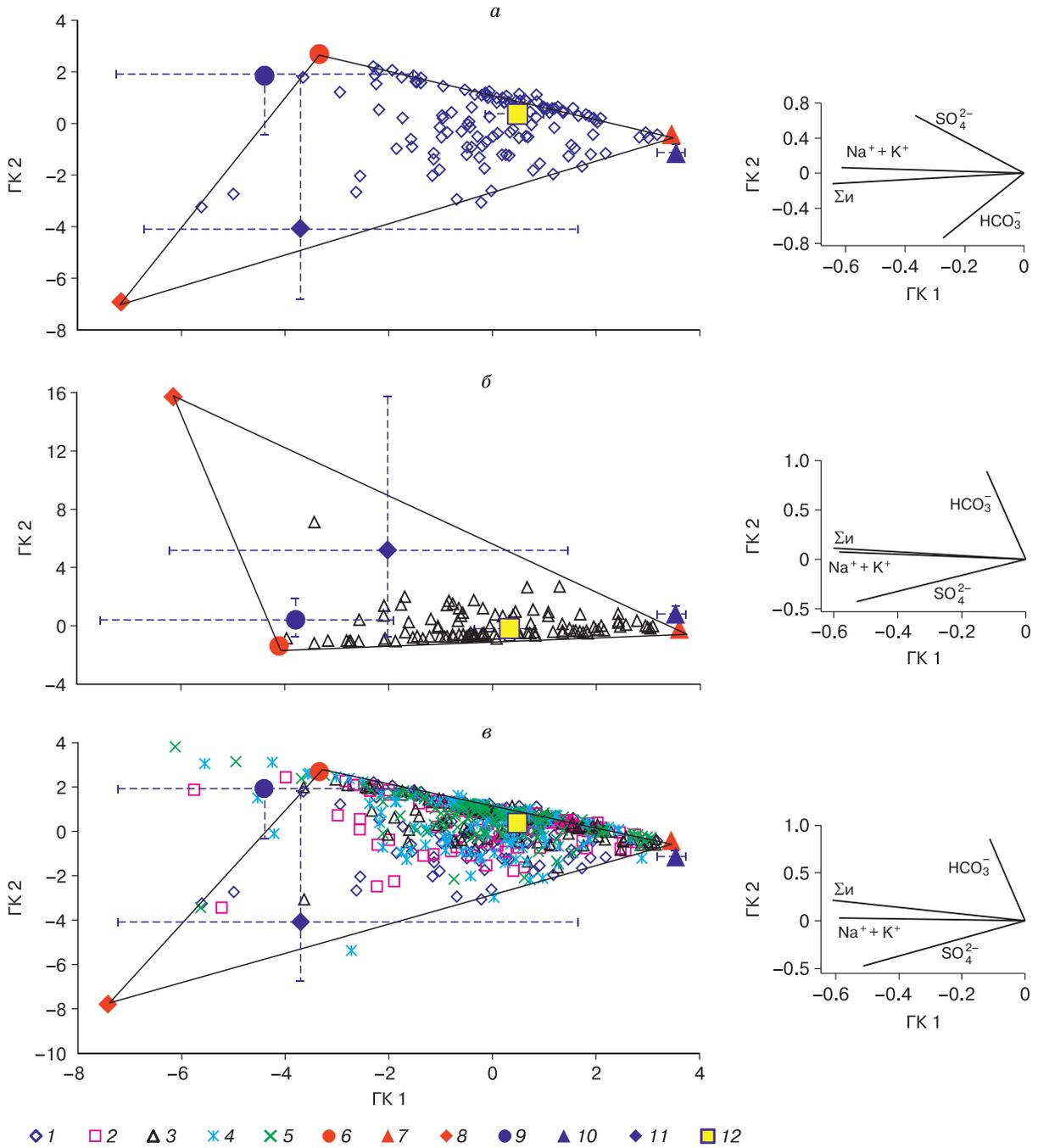


Рис. 3. Диаграммы смешения вод р. Нелка-2 (а), р. Захаренок-4 (б), по совокупной выборке речных проб (в).

Речные пробы: 1 – р. Нелка-2; 2 – р. Нелка-3; 3 – р. Захаренок-4; 4 – р. Оникс; 5 – руч. Филипер-1; модельные источники: 6 – тало-мерзлотный, 7 – дождевой, 8 – почвенно-склоновый; пробы источников (средневзвешенные значения): 9 – наледей, 10 – осадков [Фотиев, 1965], 11 – почвенных вод с водно-балансовой площадки № 3; 12 – снега. Штриховые линии с ограничениями – пределы изменения по соответствующим выборкам данных.

содержание $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ – 7–15 мг/л, минерализация 40–70 мг/л. Заметна тенденция расположения некоторого числа речных проб на прямой между 2-м и 3-м источниками, что указывает на момен-

ты питания реки исключительно этими двумя видами вод.

Прямым подтверждением адекватности построения диаграммы смешения является располо-

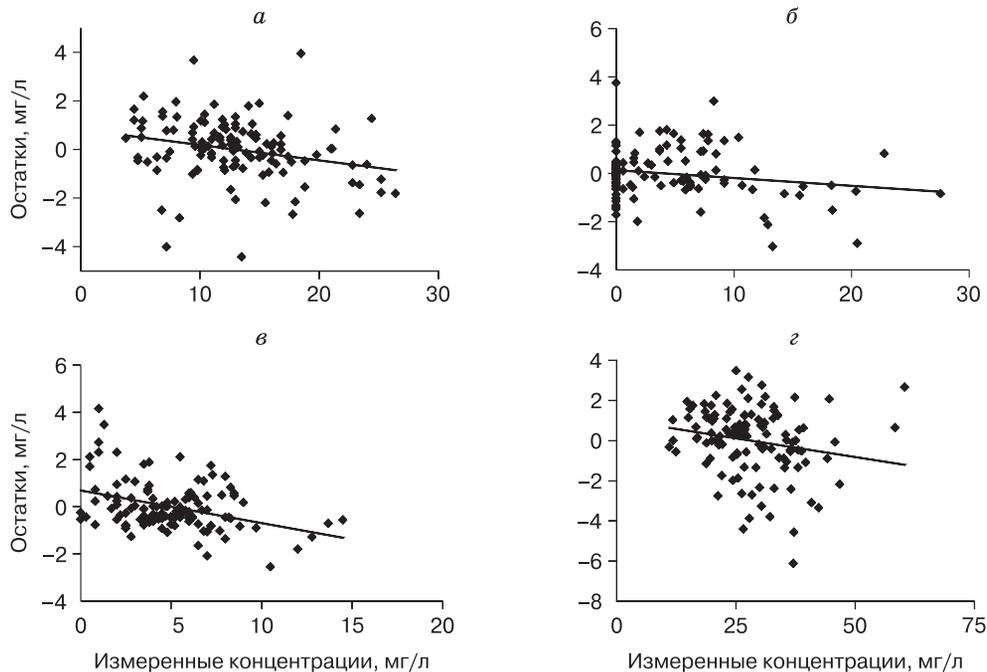


Рис. 4. Зависимости связи “остатки–измеренные значения” для р. Нелка-2.

$a - \text{SO}_4^{2-}$; $б - \text{HCO}_3^-$; $в - \text{Na}^+ + \text{K}^+$; $г - \Sigma\text{и}$.

жение на ней отдельных имеющихся проб из предполагаемых источников питания. Единичные пробы наледных вод, отобранные 9 апреля 1982 г. в нескольких точках обширной наледи на р. Могот, располагаются вблизи вершины 1-го источника, подтверждая его тало-мерзлотный характер. О том же свидетельствуют три пробы атмосферных осадков в виде снега (см. табл. 2), отобранных в бассейне р. Нелка и располагающихся по границе треугольника смешения между тало-мерзлотным и дождевым источниками.

Ввиду отсутствия наблюдений за химическим составом жидких атмосферных осадков в пределах бассейна, использовались данные таких наблюдений в районе пос. Чульман [Фотиев, 1964]. Осредненные значения концентраций по 8 пробам, отобранным в июле и августе 1960 г., на диаграмме смешения дают точку, практически совпадающую с положением гипотетического дождевого источника.

Среди проб почвенно-склоновых вод, отбравшихся на трех водно-балансовых площадках, наиболее репрезентативными оказались отобранные на площадке № 3. Осредненные химические показатели этих проб в пространстве главных компонент закономерно располагаются на стороне треугольника, соединяющей дождевой и почвенный источники (см. рис. 3). А отдельные пробы, отобранные в период межени, совпадают с местоположением источника 3 (почвенно-грунтового), устанавливаемым по форме диаграммы смешения.

Диаграммы смешения остальных водотоков принципиальных различий не имеют. Однако при их построении возникают неопределенности при установлении положения почвенно-грунтового источника из-за меньшей освещенности данными наблюдений. Идентичный вид диаграмм смешения в U -пространстве, а также графиков нагрузок у всех водотоков позволяет утверждать, что процессы смешения предполагаемых трех источников питания, контролируемые химический состав речных вод, единообразны.

Кроме того, анализ объединенной диаграммы смешения для замыкающего створа р. Нелка-2 (см. рис. 3, в), где нанесены и выборки речных проб вложенных водосборов по методике [Ноопер, 2003], показывает, что практически вся совокупная выборка образует одно пространство смешения, ограниченное уже выявленными источниками питания. Все это указывает на однородность процессов формирования стока и единство факторов, контролирующих его химический состав, для всего бассейна р. Нелка.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Расчет долей источников питания произведен по модели смешения для створа р. Нелка-2 на каждую дату отбора речных проб для всего периода наблюдений (рис. 5, а). Путем помесечного осреднения вычисленных значений за все годы наблюдений построено типовое разделение гидрографа

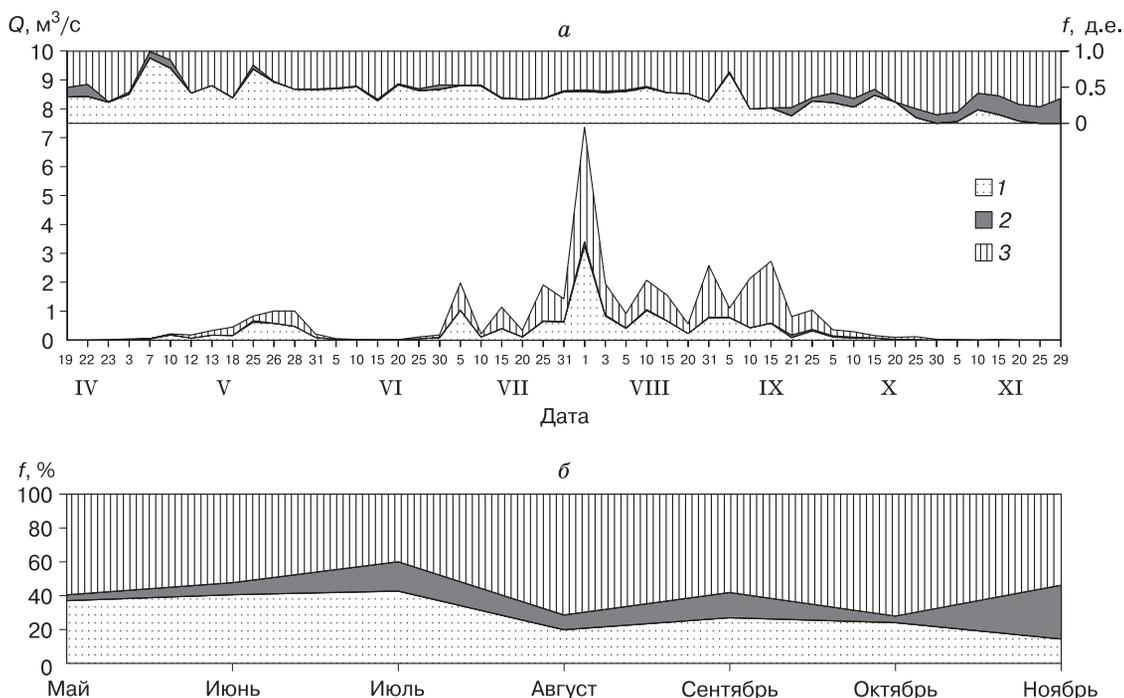


Рис. 5. Пример разделения гидрографа стока р. Нелка-2 по источникам питания:

a – за 1982 г., *б* – типовое разделение гидрографа. Источники: 1 – тало-мерзлотный, 2 – почвенно-грунтовый, 3 – дождевой.

стока по источникам питания (см. рис. 5, б), на котором продемонстрированы особенности взаимодействия тало-мерзлотного, дождевого и почвенно-грунтового питания. Доля тало-мерзлотного питания значительна и составляет от 20 до 40 % в течение всего периода при максимальных значениях в июне–июле. Заметное его сокращение начинается с сентября (с 27 до 14 %), но полного прекращения не происходит.

Доля дождевого стока в речных водах преобладает в течение всего периода – от 40 до 70 %. Наибольшие величины ее приходятся на август, высокая доля дождевого питания на фоне уменьшения сумм осадков в осенний период сохраняется до прекращения стока. Выпадающие в сентябре–октябре твердые осадки при продолжительных положительных дневных температурах воздуха тают, просачиваясь в еще не замерзший

Таблица 4. Оценка качества моделирования концентраций трассеров по среднему (\bar{x}), стандартному отклонению (s), коэффициенту корреляции (r) между измеренными и модельными значениями

Характеристика	$\bar{x}_{изм}$	$\bar{x}_{мод}$	$s_{изм}$	$s_{мод}$	r	$\bar{x}_{изм}$	$\bar{x}_{мод}$	$s_{изм}$	$s_{мод}$	r
<i>Совокупная выборка р. Нелка-2</i>						<i>Совокупная выборка р. Оникс</i>				
SO ₄ ²⁻	13.0	14.1	5.05	5.09	0.93	15.4	15.1	6.24	6.55	0.95
HCO ₃ ⁻	4.31	4.95	5.71	5.81	0.98	3.51	5.37	5.06	5.24	0.98
Na ⁺ + K ⁺	4.98	4.75	2.77	1.89	0.90	5.08	4.27	2.97	1.29	0.90
Σи	28.2	28.1	8.70	8.97	0.98	30.6	30.6	8.76	9.13	0.97
<i>Совокупная выборка р. Нелка-3</i>						<i>Совокупная выборка руч. Филипер-1</i>				
SO ₄ ²⁻	13.9	12.9	5.16	3.51	0.94	15.0	13.1	5.94	3.14	0.95
HCO ₃ ⁻	2.07	4.04	2.07	3.79	0.98	1.39	3.60	3.57	6.05	0.99
Na ⁺ + K ⁺	5.75	3.77	3.09	1.20	0.91	5.38	4.06	2.85	1.14	0.92
Σи	26.7	28.6	8.87	8.89	0.97	27.6	32.2	9.08	7.99	0.94
<i>Совокупная выборка р. Захаренок-4</i>										
SO ₄ ²⁻	13.9	13.8	5.54	4.20	0.95					
HCO ₃ ⁻	1.51	2.31	3.01	3.57	0.93					
Na ⁺ + K ⁺	5.25	4.36	2.64	1.53	0.91					
Σи	25.9	28.8	8.73	8.38	0.97					

деятельный слой почвогрунтов, частично стекают с водосбора, частично аккумулируются в деятельном слое.

Доля почвенно-грунтовых вод незначительна и варьирует от 3 до 30 % (см. рис. 5, б). Для этого типа водного питания характерна тенденция увеличения к осени с максимальными значениями в ноябре. При максимальной мощности глубины протаивания в сентябре и незначительном атмосферном увлажнении вклад почвенно-грунтового источника может быть существенным – 10 % (см. рис. 5, б), а в отдельные годы – 20 %. Указанную тенденцию систематически нарушают дождевые паводки, часто проходящие в сентябре, а запасы аккумулированных в бассейне дождевых вод срабатываются в октябре–ноябре (см. рис. 5, а). До момента смыкания кровли сезонного промерзания и многолетнемерзлых пород динамика питания речных вод определяется соотношением дождевого и почвенно-грунтового источников при относительно стабильной доле тало-мерзлотного питания.

Проверка качества моделирования концентраций трассеров показала хорошие результаты (табл. 4). Коэффициенты корреляции всех зависимостей выше 0.9, а числовые значения параметров выборок достаточно близки. Это свидетельствует о высокой точности модельных оценок генетических типов питания рек.

ВЫВОДЫ

В результате исследования установлена возможность выполнения ЕММА-моделирования на основе данных, полученных по стандартным программам гидрологического и гидрохимического мониторинга. По сравнению со специальными исследованиями по источникам питания речного стока такие данные характеризуются низкой частотой отбора проб, ограниченным числом определяемых параметров.

Тем не менее путем обобщения данных многолетних наблюдений удалось построить модели смешения, характеризующиеся высокой точностью воспроизведения химического состава речных вод. Коэффициенты корреляций модельных и наблюдаемых рядов концентраций для всех трассеров выше 0.9. С помощью ЕММА-анализа, с привлечением дополнительных наблюдений за фоновым химическим составом осадков, обосновано наличие трех основных источников питания – тало-мерзлотного, дождевого и почвенно-грунтового.

Расчет по модели смешения для створа р. Нелка-2 показал, что доля дождевого питания в речных водах в течение всего периода преобладает и варьирует от 40 до 70 %, с максимумом в августе. Доля тало-мерзлотного питания составляет от 20

до 40 %, с максимумом в июне–июле и заметным сокращением в сентябре, но полного его прекращения не происходит. Доля почвенно-грунтового питания составляет от 3 до 30 %, с максимумом в октябре–ноябре на фоне резкого снижения водности реки. Число и состав источников, закономерности их смешения отличаются пространственной и многолетней устойчивостью, что позволило выполнить типовое разделение гидрографа стока по источникам питания для створа р. Нелка-2.

Существенным результатом исследования, отражающим специфику криолитозоны, следует считать идентификацию и количественную оценку значительной доли тало-мерзлотного источника питания в течение всего периода наличия стока, что связано с присутствием в бассейне многолетнемерзлых пород. Этот результат коррелирует с данными, полученными ранее в Прибайкалье [Кичигина и др., 2016]. Результаты исследования указывают на высокую эффективность методов трассерной гидрологии в криолитозоне, возможность расширения их информационной базы за счет привлечения режимной информации сети Росгидромета.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00182, 17-05-00217) и РНФ (гранты 16-17-00105, 17-77-30006).

Литература

- Василенко Н.Г.** Гидрология рек зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб., Нестор-История, 2013, 672 с.
Vasilenko, N.G., 2013. The Hydrology of the Rivers of the BAM Region. Field Studies. Nestor-Istoria, St. Petersburg, 672 pp. (in Russian)
- Воронков П.П.** Закономерности процесса формирования и зональность химического состава вод местного стока // Тр. ГГИ, 1963, вып. 102, с. 43–119.
Vorontsov, P.P., 1963. The regularities of the formation process and of the zonality of the chemical composition of the local runoff waters. Proceedings of the State Hydrological Institute 102, 43–119.
- Гарцман Б.И., Шамов В.В.** Натурные исследования стокообразования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Вод. ресурсы, 2015, т. 42, № 6, с. 589–599.
Gartsman, B.I., Shamov, V.V., 2015. Field studies of runoff formation in the Far East region based on modern observational instruments. Water Resources 42(6), 766–775.
- Гидрогеологическое прогнозирование** / Под ред. М.Г. Андерсона, Т.П. Берта. М., Мир, 1988, 729 с.
Anderson, M.G., Bert, T.P. (Eds.), 1988. Hydrogeological Prediction. Mir, Moscow, 729 pp. (in Russian)
- Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шамов В.В.** Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Вод. ресурсы, 2016, т. 43, № 4, с. 161–190.
Gubareva, T.S., Boldeskul, A.G., Gartsman, B.I., Shamov, V.V. 2016. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. Water Resources 43(4), 629–639.

- Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В. и др.** Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология, 2015, № 3, с. 97–108.
Gubareva, T.S., Gartsman, B.I., Shamov, V.V., Boldeskul, A.G., Kozhevnikova, N.K., 2015. Genetic disintegration of the runoff hydrograph. Russian Meteorology and Hydrology 40(3), 215–222.
- Иваник В.М.** О некоторых факторах формирования химического состава поверхностных вод в условиях низких и отрицательных температур // Гидрохим. материалы, 1978, т. 71, с. 8–14.
Ivanik, V.M., 1978. On certain factors of formation of the chemical composition of surface waters under conditions of low and negative temperatures. Gidrotehnicheskie Materialy 71, 8–14.
- Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шамов В.В., Гарцман Б.И.** Трассерные исследования речного стока в бассейне оз. Байкал // География и природ. ресурсы, 2016, № 5, с. 123–129.
Kichigina, N.V., Gubareva, T.S., Shamov, V.V., Gartsman, B.I., 2016. Tracer studies of the river runoff in the basin of Lake Baikal. Geografia i Prirodnye Resursy, No. 5, 123–129.
- Писарский Б.И., Хаустов А.П.** Применение гидрохимических методов для оценки взаимодействия поверхностных и подземных вод в горно-складчатых областях (на примере бассейна оз. Байкал) // Взаимосвязь поверхностных и подземных вод. М., Изд-во Моск. ун-та, 1973, с. 211–213.
Pisarsky, B.I., Khaustov, A.P., 1973. Application of hydrochemical methods to evaluation of the interaction between surface and subsurface waters in mountain fold areas (as an example of the catchment of Lake Baikal), in: Interaction between surface and subsurface waters, MSU Press, Moscow, pp. 211–213. (in Russian)
- Попов А.И.** Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 304 с.
Popov, A.I., 1967. Permafrost Phenomena in the Earth's Crust (Cryolithology). MSU Press, Moscow, 304 pp. (in Russian)
- Руководство** по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А.Д. Семенова. Л., Гидрометеиздат, 1977, 542 с.
Semenov, A.D. (Ed.), 1977. Guidance on the Chemical Analysis of Land Surface Waters. Gidrometeoizdat, Leningrad, 542 pp. (in Russian)
- Семенов М.Ю., Снытко В.А.** Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // Докл. РАН, 2013, т. 453, № 6, с. 686–689.
Semenov, M.Y., Snytko, V.A., 2013. Optimization of approaches for simulation of the chemical composition of river water. Doklady Earth Sciences 453(2), 1288–1291.
- Соколов Б.Л.** Новые результаты экспериментальных исследований литогенной составляющей речного стока // Вод. ресурсы, 1996, т. 23, № 3, с. 278–287.
Sokolov, B.L., 1996. New results of experimental studies of the lithogenous component of river flow. Water Resources 23(3), 252–261.
- Фотиев С.М.** Химический состав атмосферных осадков в районе пос. Чульман Якутской АССР // Гидрохим. материалы, 1964, т. 36, с. 3–14.
Fotiev, S.M. 1964. The chemical composition of atmospheric precipitation in the area of the settlement of Chulman, Yakut ASSR. Gidrohimicheskie Materialy 36, 3–14.
- Фотиев С.М.** Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. М., Наука, 1965, 230 с.
Fotiev, S.M., 1965. Groundwater and Permafrost Soils of the South-Yakut Coal Bearing Basin. Nauka, Moscow, 230 pp. (in Russian)
- Шварцев С.Л.** О физико-химических процессах в толще многолетнемерзлых пород // Криогенные процессы в почвах и горных породах. М., Наука, 1965, с. 132–141.
Shvartsev, S.L., 1965. On the physico-chemical processes in the permafrost ground, in: Cryogenic Processes in Soils and Rocks. Nauka, Moscow, pp. 132–141. (in Russian)
- Эдельштейн К.К., Смахтина О.Ю.** Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов // Вод. ресурсы, 1991, № 5, с. 5–20.
Edelshstein, K.K., Smakhtina, O.Yu., 1991. The genetic structure of the river runoff and the chemical statistical method of isolating its elements. Vodnye Resursy, No. 5, 5–20.
- Эсбенсен К.** Анализ многомерных данных. Избр. главы: Пер. с англ. под ред. О.Е. Родионовой. Черноголовка, ИПХФ РАН, 2005, 158 с.
Esbensen, K., 2005. Multivariate Data Analysis, Selected Chapters. Translated from English by O.E. Rodionova. Institute of Problems of Chemical Physics, Chernogolovka, 158 pp. (in Russian)
- Bonell, M., Fritsch, J.M.** Combining hydrometric-hydrochemistry methods: a challenge for advancing runoff generation process research // Proc. IAHS. Hydrochemistry, 1997, No. 244, p. 165–184.
- 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 Res., 1992, vol. 28, p. 99–107.
- Christophersen, N., Neal, C., Hooper, R.P., Voght, R.D.** Modelling stream water chemistry as a mixture of soilwater and end-members – a step towards second-generation acidified models // J. Hydrol., 1990, vol. 116, No. 1–4, p. 307–320.
- Dunne, T.** Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff // J. Hydrol., 1983, vol. 65, No. 1–3, p. 25–48.
- Hooper, R.P.** Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry // Water Resources Res., 2003, vol. 39, No. 3, p. 1055.
- Hooper, R.P., Christophersen, N., Peters, N.E.** Modelling stream water chemistry of soilwater end-members – An application to the Panola Mounting Catchment, Georgia, U.S.A. // J. Hydrol., 1990, vol. 116, No. 1–4, p. 321–343.
- Kirkby, M.J.** Hillslope hydrology. Chichester, John Wiley, 1978, 389 p.
- Pinder, G.F., Jones, J.F.** Determination of ground water component of peak discharge from the chemistry of total runoff water // Water Resources Res., 1969, vol. 5, No. 2, p. 438–445.
- Tetzlaff, D., Buttle, J., Carey, S.K., et al.** Tracer-based assessment of flow paths, storage and runoff generation in northern catchments: a review // Hydrol. Process., 2015, vol. 29, No. 16, p. 3475–3490.

Поступила в редакцию
25 октября 2016 г.