

Н. В. КИЧИГИНА*, Т. С. ГУБАРЕВА, В. В. ШАМОВ**, Б. И. ГАРЦМАН*****

*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, nkichigina@mail.ru

**Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия, tgubareva@bk.ru, vlshamov@yandex.ru

***Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия, gartsman@inbox.ru

ТРАССЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Проведено обсуждение методологии изучения механизмов формирования стока, базирующейся на применении природных химических трассеров. Представлены результаты адаптации и отработки методики разделения гидрографа стока по генетическим составляющим (источникам питания), основанной на использовании природных химических трассеров в рамках модели смешения (модель End-Member Mixing Analysis (EMMA)). В результате процедуры EMMA-анализа сформированы два сложных модельных трассера, каждый из которых представляет собой линейную комбинацию исходных химических трассеров. Ее ядром является метод главных компонент. Методология применена в рамках экспериментальных исследований на малом бассейне руч. Ланинского, расположенного вблизи побережья оз. Байкал. Оценены доли источников питания речного стока ручья. Это дождевые воды, доля которых незначительна, воды подземного грунтового горизонта, имеющие тенденцию к преобладанию в меженный период, и так называемые наледные воды, имеющие значительную долю при формировании паводка. В качестве надежных трассеров могут использоваться преобладающие ионы анионного и катионного состава вод, величина удельной электропроводности и содержание общего органического углерода. Результаты моделирования хорошо согласуются с качественными представлениями о формировании стока на исследуемой территории. Показан широкий спектр возможностей и перспективность методического инструментария трассерной гидрологии.

Ключевые слова: экспериментальный бассейн, гидрохимические наблюдения, EMMA-модель, генетические составляющие речного стока, Прибайкалье.

N. V. KICHIGINA, T. S. GUBAREVA, V. V. SHAMOV, AND B. I. GARTSMAN

*V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1, Russia, nkichigina@mail.ru

**Pacific Geographical Institute FEB RAS,
690041, Vladivostok, Radio str., 7, Russia, tgubareva@bk.ru, vlshamov@yandex.ru

***Water Problems Institute RAS, 119333, Moscow, Gubkina str., 3, Russia, gartsman@inbox.ru

TRACER INVESTIGATIONS INTO THE RUNOFF FORMATION WITHIN THE LAKE BAIKAL DRAINAGE BASIN

The methodology of studying the streamflow formation mechanism based on using natural chemical tracers is discussed. Presented are the results from adapting and testing the technique for separation of runoff hydrograph according to genetic components (sources of alimentation) built upon the use of natural chemical tracers in term of the End-Member Mixing Analysis (EMMA) model. By using the procedure of EMMA analysis, we generated two complex model tracers, each of which representing a linear combination of initial chemical tracers. Its core is comprised of the method of Principal Component Analysis. The methodology was used within the program of experimental investigations on a small basin of the Laninskii creek flowing nearby the coast of Lake Baikal. The contributions from the sources of alimentation of the creek's runoff are estimated. They include the rain waters with an insignificant contribution, the waters of the subsurface soil horizon having a tendency toward a predominance at the low-water period, and so-called aufeis waters making a significant contribution during the flood formation. Prevailing ions of anion and cation composition, the value of electrical conductivity and content of total organic carbon can be used as reliable tracers. The modeling results are in good agreement with the qualitative views concerning the runoff formation on the study territory. A broad range of possibilities and the prospects of the procedural tools of tracer hydrology are demonstrated.

Keywords: experimental basin, hydrochemical observations, EMMA model, genetic components of streamflow, Cisbaikalia.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизма стокоформирования включает в качестве одной из ключевых задач исследование взаимодействия вод из различных источников питания реки в процессе их смешения в преде-

лах речного бассейна. Под источниками питания, или составляющими речного стока, подразумеваются различные по происхождению и свойствам водные массы, приуроченные к основным ярусам водосборного бассейна: воды глубоких подземных горизонтов, склоновые (почвенные) воды, а также атмосферные воды, поступающие в реки преимущественно путем поверхностного стекания [1, 2].

В последние десятилетия в мире проводятся натурные гидрологические исследования, направленные на решение этой задачи с широким использованием различных трассеров [3–6]. Эффективной современной методической разработкой, предназначенной для моделирования химического состава речных вод, является модель смешения источников питания и соответствующие ей статистические процедуры — End-Member Mixing Analysis (EMMA) [7, 8]. Для ее применения необходимы данные интенсивных гидролого-гидрохимических наблюдений в малых речных бассейнах. В России исследования этого направления пока немногочисленны и фрагментарны [9, 10].

Ранее авторами были предложены методические основы и результаты выполнения программы таких исследований, начатых с 2011 г. в экспериментальных бассейнах в Центральном Сихотэ-Алине [9–15]. Развитие программы предполагает расширение географии работ с особым вниманием к малоизученным регионам Восточной Сибири и Дальнего Востока. В данной статье представлены первые результаты выявления потенциальных природных трассеров и подсчета количества источников питания рек в Прибайкалье, выполненных в 2015 г. на основе данных гидролого-гидрохимического мониторинга ручьев начальных порядков в районе полигона Иркутского государственного университета «Сарма».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служит верхняя часть бассейна руч. Ланинского площадью 10,7 км² (рис. 1). Ручей, являющийся правым притоком р. Сармы (бассейн оз. Байкал в пределах пролива Малое Море), берет начало на западном склоне Приморского хребта ниже гольцовой зоны на высоте 1100 м. Водосбор расположен в пределах центральной экологической зоны Байкальской природной территории и репрезентативен для горного обрамления Байкальской впадины.

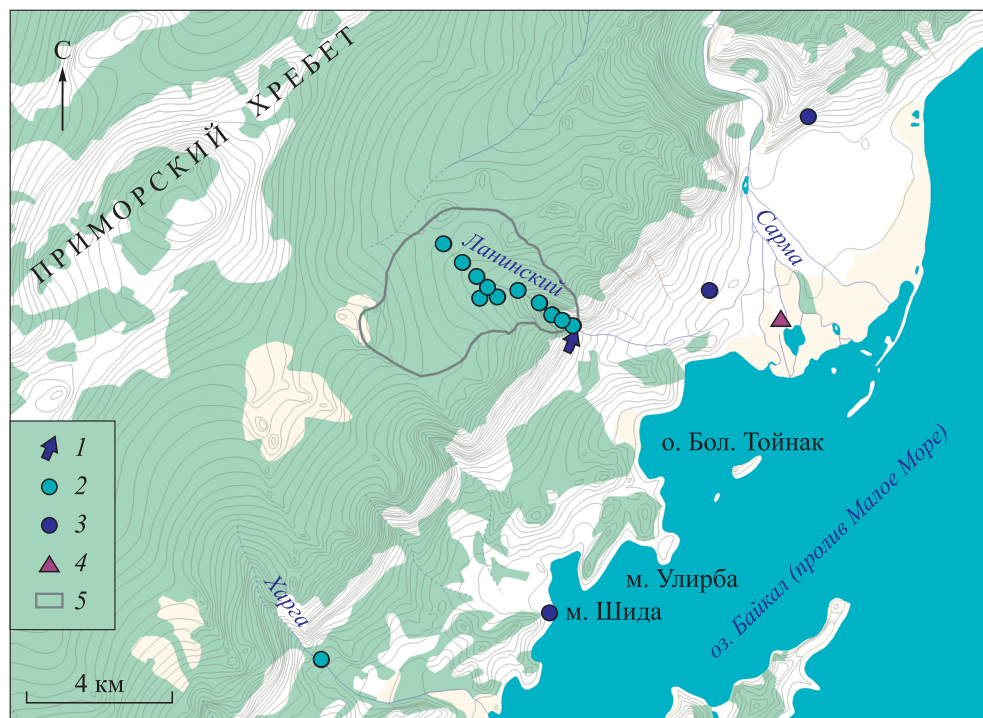


Рис. 1. Картограмма района работ.

1 — замыкающий створ на руч. Ланинском; 2 — гидрохимические створы; 3 — места отбора подземных вод; 4 — метеостанция с осадкомером; 5 — граница водосбора до замыкающего створа.

Верхняя часть бассейна, имеющая вид водосборной воронки с пологими склонами и веерными формами русел временных водотоков, играет роль зоны питания ручья. Зона транзита стока представлена V-образной долиной-ущельем, глубоко прорезающей уступ Обручевского сброса у подножия Приморского хребта. Здесь водоток имеет крутой продольный профиль и быстрое течение. Граница транзитного участка ручья и зоны питания резкая и представлена русловым уступом высотой до 20 м, сформировавшимся на фронте пятящейся эрозии. Русло выполнено валунно-глыбовым аллювием, под которым течет вода. Ниже, в зоне разгрузки, ручей протекает по подгорной наклонной равнине, где вскоре после выхода из ущелья теряется в аллювиально-пролювиальных отложениях, однако русло водотока отчетливо прослеживается до р. Сармы.

Замыкающий створ находится в месте выхода ручья из ущелья, где сток устойчивый. Расходы воды в замыкающем створе в межень составляют 8–12 л/с, в период паводков достигают 200–250 л/с. По режиму стока ручей характеризуется весенне-летним половодьем и дождевыми паводками, наблюдаемыми на его спаде. Годовая сумма осадков в степном поясе не превышает 200–300 мм, возрастающая в горно-таежном поясе до 350–450 мм, при этом основная их часть выпадает в июле–августе в виде сильных дождей. Зимних осадков мало, толщина снежного покрова невелика и очень неравномерна. Детальное описание водотоков и гидрологического режима приведено в [16].

Для исследуемой территории характерно широкое распространение наледей в долинах рек. Прирусловая наледь руч. Ланинского расположена ниже руслового уступа и вытянута вдоль русла на 250–500 м, ее мощность в среднем составляет около 1 м, иногда она достигает 2–3 м. Наледь сохраняется, как правило, до июля, реже до августа, а внутриводосточный лед наблюдается в течение большей части лета в верхней части водосбора в затененных местах под пологом леса.

Непрерывная запись уровня, температуры воды и удельной электропроводности (ЕС) в створе наблюдений выполнялась цифровым измерительным комплексом РАП-Г-01 (Институт мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН, г. Томск) с 15-минутным разрешением. Расходы воды в период активного проведения работ измерялись ежедневно с помощью высокоточного электромагнитного измерителя скорости потока SEBA FlowSens и методом ионного паводка. Расчет стока производился по кривой $Q = f(H)$. Величина атмосферных осадков, температуры и влажности воздуха, а также почвы оценивалась с помощью автоматизированного атмосферно-почвенного измерительного комплекса АПИК (ИМКЭС СО РАН, г. Томск), оснащенного осадкомером Davis Rain Collector II, с 3-часовым интервалом.

В июле 2015 г. отобрано 48 проб природных вод различного генезиса — воды ручья, почвенные, наледные, подземные и дождевые (табл. 1). Дождевые воды собирались в полиэтиленовые конусы, подвешиваемые на открытых местах, почвенные — из прикопок с отстоявшейся водой и из природных мочажин, подземные — из скважины и мест разгрузки подземных вод на склоне, наледные — из луж в теле наледи. Пробы воды из ручья отбирались в створе наблюдений ежедневно одновременно с измерением расхода, в других точках — в процессе гидрохимических съемок, при этом на месте выполнялись измерения рН, электропроводности и температуры воды с помощью портативного многопараметрического прибора Hanna COMBO/NI 98129.

Во всех пробах устанавливались содержания макро- и микроэлементов, растворенного органического углерода ($C_{орг}$). Содержание гидрокарбонатов определялось в нефилтрованных пробах по стандартной методике потенциометрическим титрованием [17]. Остальные компоненты выявлялись после фильтрования. Химические анализы вод проводились общепринятыми методами в лицензированном химико-аналитическом центре Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН. Содержание макро- и микроэлементов определялось количественными спектрометрическими методами на приборах ДФС-8 и атомно-эмиссионном Optima 2000DV. Содержание общего растворенного органического углерода определялось в Лимнологическом институте СО РАН с помощью элементного анализатора общего и органического углерода Vario TOC cube.

Оценка источников питания выполнялась на основе модели смешения трех источников (с двумя трассерами), построенной на принципе сохранения баланса воды и растворенных веществ. Для расчета пропорций водных масс из различных источников питания, формирующих русловые воды, решались системы уравнений смешения, как это описано в работе [14]. В качестве трассеров могут выступать различные химические компоненты природных вод, например концентрации главных ионов, микрокомпонентов, изотопов кислорода и водорода, растворенное органическое вещество, а также некоторые физико-химические показатели (температура, минерализация или ЕС).

Нами использована специальная статистическая процедура ЕММА-анализа, в результате которой формируются два сложных модельных трассера. Каждый из них представляет собой линейную ком-

Таблица 1

Химический состав различных природных вод (средние значения из количества проб)

Место отбора проб	n*	pH	ЕС, µS/см	мг/л (%-экв)										мг/л						
				HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	C _{орг}	Si	Al	Fe					
Руч. Ланинский																				
створ поста, паводок	6	7,85	120	53,7(36,6)	1,68(2,03)	12,0(10,8)	0,94(0,64)	16,0(33,6)	3,40(11,8)	1,16(1,20)	1,69(2,99)	5,15	6,11	0,05	0,08					
створ поста, межень	8	7,97	139	71,6(38,4)	2,84(2,56)	11,7(7,91)	0,68(0,36)	19,6(32,0)	4,18(11,2)	2,57(2,15)	3,63(5,15)	3,65	6,50	0,04	0,05					
у стенки	7	7,55	88,6	45,4(34,4)	2,03(2,82)	11,4(12,3)	0,87(0,70)	12,9(30,5)	2,94(10,9)	1,38(1,60)	2,68(5,55)	4,86	6,94	0,12	0,30					
прекращение стока	2	7,54	97,2	52,1(36,6)	2,13(2,81)	10,9(10,2)	0,73(0,56)	13,6(29,0)	3,03(10,9)	1,71(1,83)	3,79(7,60)	5,31	6,99	0,06	0,12					
верхняя часть бассейна	6	6,93	49,9	13,7(16,3)	1,85(4,67)	14,0(26,7)	0,79(1,15)	5,48(24,33)	1,75(12,8)	0,94(2,10)	1,55(5,99)	8,73	4,93	0,13	0,34					
Руч. Харга	3	7,73	64,7	33,0(38,2)	2,36(4,71)	4,22(6,21)	0,97(1,10)	8,54(30,1)	2,25(13,1)	1,22(2,20)	1,28(3,94)	2,22	4,55	0,02	0,02					
Мочажина на рекреационной площадке	5	6,42	45,7	11,8(19,6)	2,59(7,56)	10,2(21,8)	0,63(1,07)	4,23(21,8)	1,75(15,0)	1,01(2,53)	2,09(9,01)	8,10	5,84	0,08	0,24					
Почвенные (прикопка, лужа) у тропы	5	6,74	75,0	37,4(39,9)	2,06(3,8)	3,43(4,66)	0,76(0,79)	9,07(29,4)	2,20(11,8)	1,06(1,72)	2,56(7,26)	1,9	8,87	0,03	0,02					
Пос. Сарма, атмосферные осадки	2	5,90	22,5	1,76(9,12)	2,23(41,2)	1,01(8,12)	0,77(7,65)	1,40(25,8)	0,07(2,40)	0,19(1,66)	0,12(2,13)	6,78	0	0	0					
Руч. Ланинский, талая вода с наледи	1	6,90	91,0	26,4(24,6)	2,27(3,65)	17,9(21,2)	0,93(0,86)	11,8(33,6)	2,69(12,6)	0,81(1,18)	0,61(1,50)	15,83	2,84	0,03	0,12					
Подземные воды																				
скважина в бухте Шида	1	8,12	213	104,3(42,0)	2,62(1,82)	9,95(5,08)	2,39(0,94)	27,5(33,7)	7,22(14,6)	1,0(0,63)	1,13(1,21)	0,10	6,42	0,06	0					
у ЛЭП	1	7,49	831	590,7(44,9)	2,13(0,28)	48,2(4,65)	1,16(0,09)	131,5(30,4)	40,0(15,2)	7,0(0,83)	17,0(3,42)	23,11	5,37	0,13	0					
левобережье р. Сармы	1	7,78	469	344,6(48,4)	2,41(0,58)	5,03(0,90)	0,75(0,10)	69,5(29,7)	19,8(13,9)	2,89(0,63)	15,1(5,63)	7,75	6,74	0,25	0,07					

*n — количество проб.

бинацию исходных химических трассеров. Ее ядро — метод главных компонент (МГК), теоретически обоснованный для модели смешения в работе [18]. МГК проецирует матрицу исходных данных в подпространство взаимно ортогональных главных компонент (U -пространство), каждая из которых является сложным модельным трассером. При решении модели смешения вместо двух обычных трассеров используют первые две главные компоненты.

Применение модели смешения предполагает соблюдение некоторых условий: консервативность трассеров, достаточное различие концентраций трассеров в речных водах и источниках, низкая пространственная вариабельность концентрации трассеров в источниках.

Гипотеза консервативности трассеров проверяется с помощью методики, основанной на моделировании химического состава воды методом МГК [19]. Для двухтрассерной модели смешения с тремя источниками первые две компоненты используются для моделирования серий трассеров, являющихся параметрами модели. По разнице измеренных и модельных значений вычисляются остатки, которые при выполнении условия консервативности трассеров (т. е. адекватности модели) должны представлять собой случайный нормально-распределенный «шум». Поэтому гипотеза консервативности трассеров принимается/отклоняется на основании анализа зависимости «остатки–измеренные значения» для каждого гидрохимического показателя. Методики и результаты ее применения для рек Приморья детально изложены в работе [13].

Для исследуемого бассейна в качестве потенциальных источников рассматриваются различные виды вод: дождевые, глубоких водоносных горизонтов, склоновые (почвенные) и наледные. Предполагается, что химический состав воды в русле контролируется процессом смешения трех преобладающих источников. Поиск адекватных источников осуществляется на основании анализа диаграмм смешения [20]. В двумерном U -пространстве модельных трассеров вершины источников, представленные спроецированными средними значениями концентраций трассеров по совокупности проб каждого источника, образуют треугольник. При консервативном смешивании, правильном отборе трассеров и адекватности выбора источников пробы речных вод, как правило, оказываются внутри треугольника. Оценочный критерий качества модели — доля суммарной дисперсии данных (λ_2), объясненной первыми двумя главными компонентами. Она должна составлять не менее 90 %.

Проверка эффективности модели смешения производится после оценивания долей источников питания путем расчета концентраций трассеров каждой пробы по модели смешения на основе реального химического состава вод источников. Тесная корреляция рассчитанных по модели и исходных (измеренных) значений концентраций химических показателей, используемых в модели, указывает на адекватность модели и высокую точность оценок, полученных на ее основе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимическая характеристика природных вод. Формирование химического состава речных вод происходит в основном среди слабо выщелачиваемых изверженных или метаморфических пород архея и протерозоя, а ведущим процессом является карбонатное выветривание.

Результаты химического анализа проб речных вод и вод потенциальных источников их питания приведены в табл. 1. По классификации О. А. Алёкина [21], воды в створе поста относятся ко второму типу гидрокарбонатно-кальциевых. В верхней части бассейна в притоках ручья отмечаются переходы воды из гидрокарбонатного в сульфатный класс группы кальция, что указывает на значительные изменения характера питания. Воды атмосферных осадков ультрапресные гидрокарбонатно- и хлоридно-кальциевые. Воды из мочажин на рекреационной площадке сульфатно-кальциевые с переходом в период низкого стока в гидрокарбонатный класс группы кальция второго типа. Воды водотоков зоны питания очень близки по составу к водам мочажин, почвенных прикопок и атмосферных осадков, что свидетельствует об их преимущественно поверхностном питании. Наледные воды ультрапресные гидрокарбонатно-кальциевые. Воды из подземных источников относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция, с минерализацией от 97 до 420 мг/л.

Минерализация в створе поста изменялась от 47 до 70 мг/л, с наименьшими значениями в конце мая и плавным увеличением в течение летнего сезона, а также с кратковременными снижениями во время паводков (рис. 2). В пределах исследованного малого водосбора чрезвычайно резко выражены различия в химическом составе природных вод. В верхней части бассейна значения минерализации вод ручья снижаются в 2–4 раза, в самых верховьях минерализация речных вод близка к таковой в мочажинах, почвенных прикопках и атмосферных осадках.

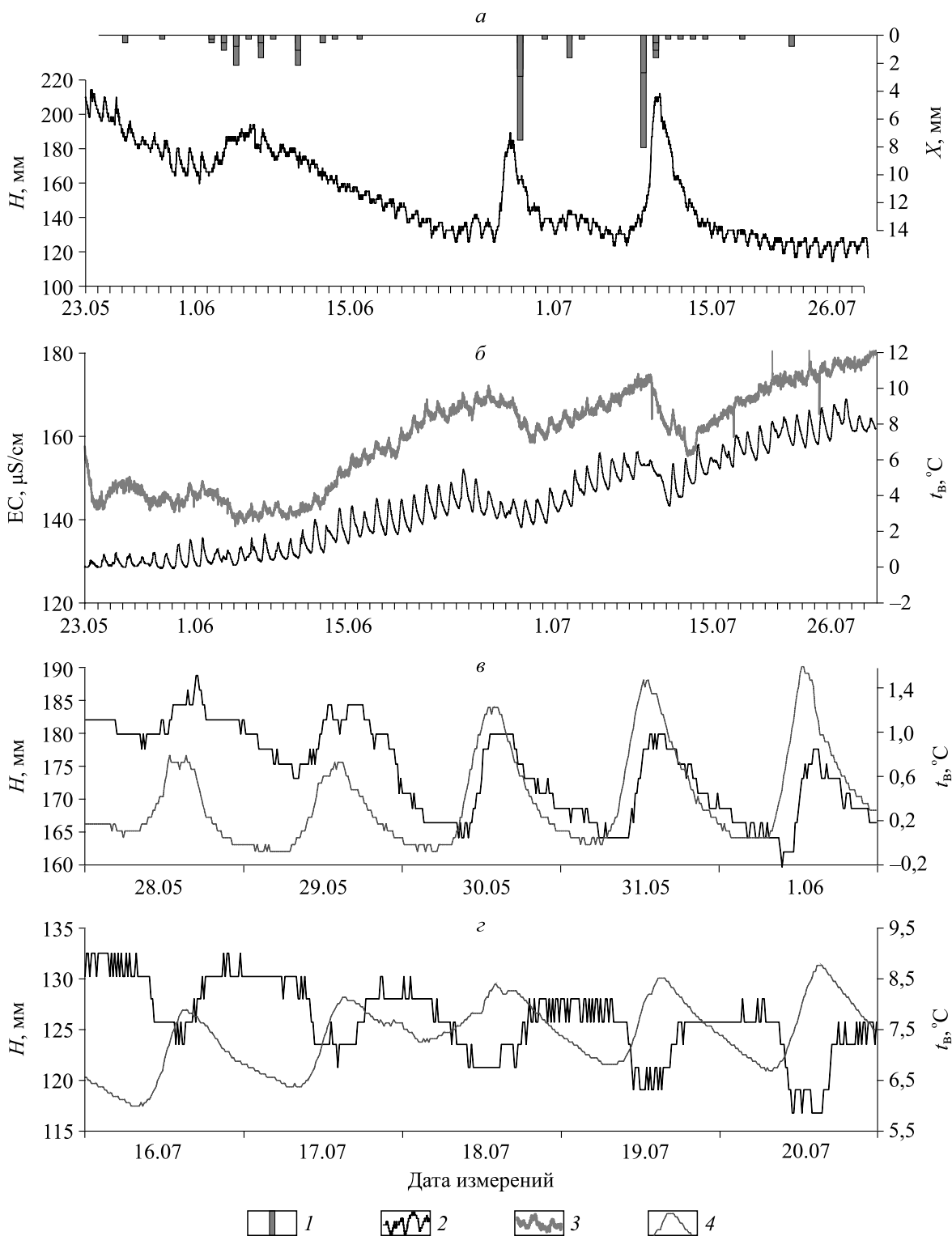


Рис. 2. Совмещенные графики измерений на руч. Ланинском.

a — осадки (X , мм) и уровень воды (H , мм); *б* — электропроводность (ЕС, $\mu\text{S}/\text{cm}$) и температура воды ($t_{\text{в}}$, $^{\circ}\text{C}$) в период с 23 мая по 26 июля 2015 г.; *в*, *г* — ход уровней и температуры воды за указанные пятидневные периоды. 1 — атмосферные осадки; 2 — уровень воды; 3 — электропроводность; 4 — температура воды.

Указанное различие подчеркивается значениями рН. В нижней части ручья они колеблются в целом в нейтрально-щелочной области, уменьшаясь после дождей. Напротив, воды притоков в верхней части бассейна нейтрально-кислые, так же как в основном воды в мочажинах, почвенных прикопках в верхней части водосбора и атмосферные осадки. Воды из подземных источников нейтрально-щелочные и близки по рН к водам ручья в створе поста (см. табл. 1).

Содержание $C_{\text{орг}}$ демонстрирует обратную закономерность — в пробах из верхней части водосбора оно в 2–4 раза выше, чем в створе поста. Минимальная величина $C_{\text{орг}}$ отмечена в глубинных подземных водах (скважина в бухте Шида) — 0,1 мг/л. Во время паводка содержание $C_{\text{орг}}$ и NO_3^- , поступающих из верхних почвенных горизонтов, определенно возрастает (см. табл. 1). Другие элементы (K, Na, Cl, Si), вероятно, поступают с грунтовыми водами, поэтому их концентрации снижаются при повышении водности, что отмечалось нами и ранее [11].

Большой интерес в связи с исследованием процессов стокоформирования представляет взаимосвязь суточных колебаний уровня и температуры воды, выявляемая с помощью современного автоматического датчика (см. рис. 2, б). В мае уровень и температура изменялись синхронно (см. рис. 2, в), что отражает преобладание талых вод в питании ручья. В июле отчетливо видна асинхронность этих колебаний — максимум уровня приходится на ночные часы, когда температуры минимальны, при этом отчетливо изменяется и форма циклических колебаний уровня (см. рис. 2, г). Очевидно, изменение характера суточных колебаний уровня связано со снижением доли питания талыми водами и усилением эвапотранспирации.

Сама смена отчетливо прослеживается в середине июня на спаде смешанного тало-дождевого паводка (см. рис. 2, а). Следует отметить, что питание ручья талыми водами сохраняется по крайней мере в течение большей части лета — в конце июля еще визуально наблюдаются фрагменты русловой наледи, а также ледяные линзы под валунно-глыбовым плащом как в долине ручья, так и на склонах в верхней части бассейна.

Анализ трассеров и результатов применения модели смешения. По совокупности проб речных вод и имеющимся гидрохимическим показателям, используя методику [13, 19], были выделены наборы потенциальных трассеров, определяющие МГК-модели с суммарной долей объясненной дисперсии первыми двумя главными компонентами $\lambda_2 > 90\%$ (табл. 2). Во всех приведенных вариантах присутствуют преобладающие ионы HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Для построения модели смешения в качестве расчетного был выбран второй вариант МГК-модели, который включает набор из шести трассеров при величине $\lambda_2 = 95\%$. Величины коэффициента детерминации (R^2) связей «остатки–измеренные значения» (см. табл. 2) указывают на принятие гипотезы консервативности для каждого из трассеров.

Проецирование исходной матрицы измеренных концентраций трассеров речных проб, а также проб всех источников в пространство главных компонент позволило получить графическую модель смешения в створе поста (рис. 3, а). Выбор источников на диаграмме смешения вполне однозначен. Вершины треугольника, представленные концентрациями проб дождевых, талых наледных и подземных грунтовых вод, образуют поле смешения речных вод. Характерно, что в U -пространстве смешения пробы почвенных вод закономерно располагаются на линии, соединяющей вершины дождевого источника и грунтовой составляющей, а пробы, отобранные с мочажин, находятся между дождевым и наледным источниками. При этом как почвенные образцы, так и пробы с мочажин больше тяготеют к дождевому источнику.

Дождевые воды представлены двумя пробами. Предполагается, что часть дождевых вод максимально быстро достигает русла реки, почти не испытывая химической трансформации (так называемый прямой сток, не всегда адекватно называемый поверхностным). В U -пространстве этот источник занимает крайнее положение, резко отдаляясь от речных проб. Для характеристики подземного грунтового питания взята проба воды из скважины в бухте Шида. В качестве третьего источника выбрана

Таблица 2

Потенциальные наборы трассеров, полученных при помощи метода главных компонент

Вариант	Трассеры/ R^2								λ_2
1	$\text{HCO}_3^-/0,034$	$\text{SO}_4^{2-}/0,195$	$\text{Ca}^{2+}/0,014$	$\text{Mg}^{2+}/0,019$	$\text{NH}_4^+/0,045$	ЕС/0,156	$C_{\text{орг}}/0,062$	Si/0,027	90,0
2	$\text{HCO}_3^-/0,033$	$\text{SO}_4^{2-}/0,020$	$\text{Ca}^{2+}/0,016$	$\text{Mg}^{2+}/0,018$	ЕС/0,041	ТОС/0,079			95,0
3	$\text{HCO}_3^-/0,030$	$\text{SO}_4^{2-}/0,14$	$\text{Ca}^{2+}/0,046$	$\text{Mg}^{2+}/0,046$	Ti/0,19				90,7
4	$\text{HCO}_3^-/0,012$	$\text{SO}_4^{2-}/0$	$\text{Ca}^{2+}/0,009$	$\text{Mg}^{2+}/0,008$					99,3

проба талых вод с наледи, в U -пространстве она также занимает крайнее положение, резко отдаляясь от поля проб смешанных речных вод. В данном случае под наледным источником (талыми водами) фактически подразумеваются воды верхних почвенных горизонтов, формирующиеся в условиях продолжающегося оттаивания почвогрунтов и присутствия массивных линз внутрипочвенного льда.

Группа речных проб, отобранных в створе поста, располагается ближе к центру поля смешения, в то время как пробы, отобранные с верхней части бассейна, тяготеют к источникам приповерхностного питания — дождевым и наледным водам, представляя собой преимущественно их смесь (см. рис. 3, *a*). Три из них, отобранные на пике и спаде дождевого паводка, не попадают в зону смешения

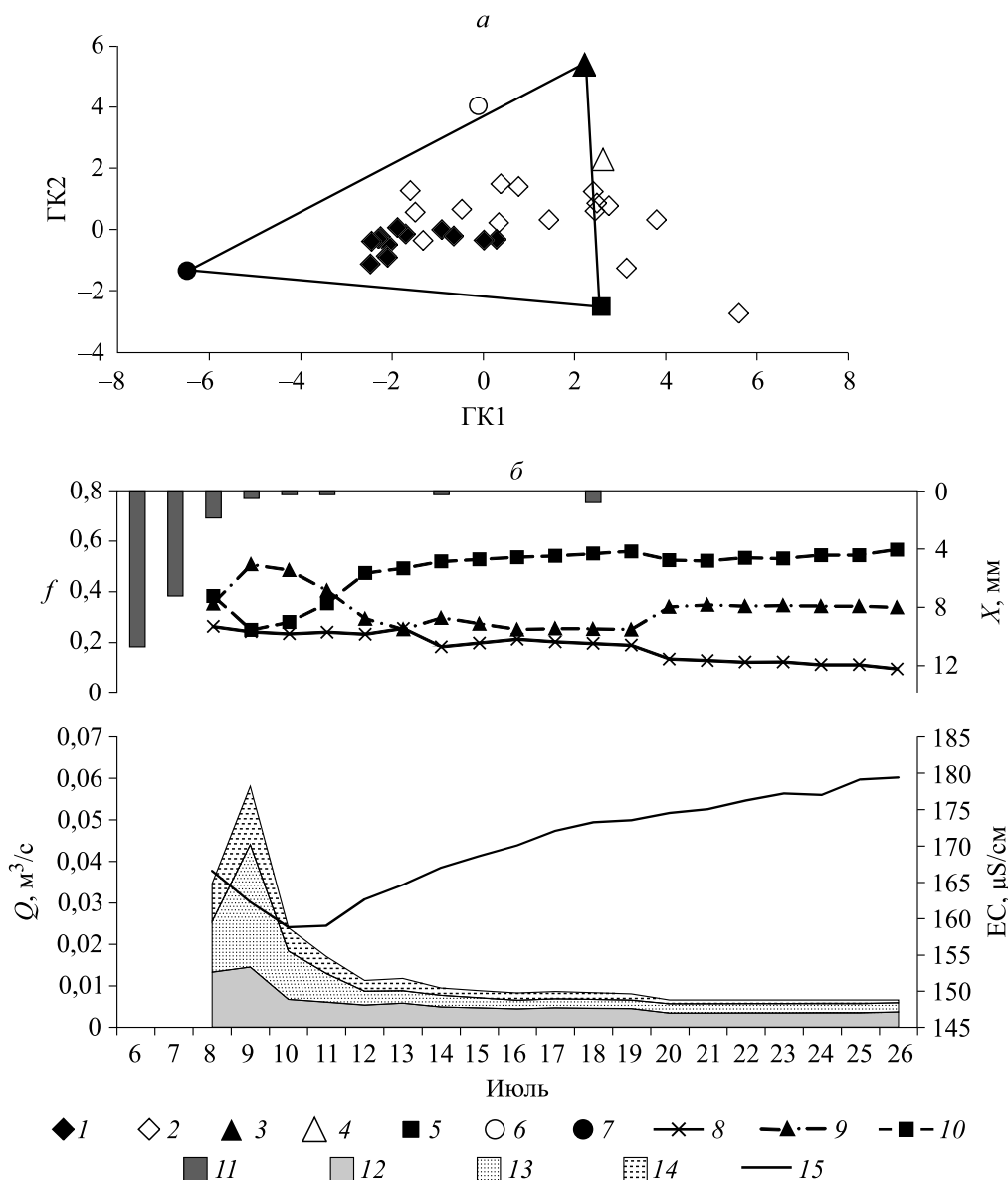


Рис. 3. Расчет долей источников питания стока руч. Ланинского в период с 6 по 26 июля 2015 г.

a — диаграмма смешения источников в пространстве первых двух главных компонент; *b* — комплексный график, показывающий посуточную динамику источников питания речного стока (в долях единицы). Пробы: 1 — речные в створе поста, 2 — речные верхней части водосбора, 3 — атмосферных осадков, 4 — с мочажин, 5 — с наледи, 6 — почвенных вод, 7 — подземных вод. Доля питания: 8 — дождевого, 9 — наледного, 10 — подземного грунтового; 11 — атмосферные осадки (X , мм). В виде разделения гидрографа стока, питание водами: 12 — грунтовыми, 13 — талыми, 14 — дождевыми.

источников. Логично предположить, что в верхней части водосбора влияние грунтовых вод на формирование речного стока менее существенно, а уточнение положения источников требует детальной гидрохимической съемки этого участка.

Расчет долей источников питания выполнен для каждого измеренного расхода в створе поста на руч. Ланинском за период с 8 по 26 июля 2015 г. На рис. 3, б представлен комплексный график, показывающий суточную динамику долей источников питания, разделение гидрографа стока, ход атмосферных осадков и удельной электропроводности. Видно, что в период паводка существенно возросла доля наледных и резко снизилась доля грунтовых вод при практически неизменной доле дождевых. На пике паводка (9 июля) зафиксирован максимум доли талых и минимум доли грунтовых вод за весь расчетный период (см. рис. 3, б). Доля грунтового стока в установившийся меженный период возросла, при этом ее суточный ход в целом совпадал с ходом удельной электропроводности, что подтверждает известную связь повышения минерализации речных вод с ростом грунтового питания.

Проверка качества моделирования концентраций трассеров, используемых в расчетной модели смешения, показывает высокое качество модели, коэффициенты корреляции между измеренными и модельными значениями составляют от 0,85 до 0,99.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе модели смешения трех источников с использованием МГК-моделирования получена новая информация о генетической структуре речного стока, количественно оценены доли его источников питания. К ним относятся дождевые воды, доля которых незначительна, воды подземного грунтового горизонта, имеющие тенденцию к преобладанию их в меженный период, и так называемые наледные воды, характеризующиеся значительной долей при формировании паводка. Воды, называемые наледными, фактически представляют собой воды верхних почвенных горизонтов, формирующиеся в специфических условиях крайне высокой каменистости и льдистости почвогрунтов и продолжающегося в течение лета процесса их протаивания.

Интерпретация модели хорошо соотносится с качественными представлениями о формировании стока в пределах исследуемой территории.

В целом результаты выполненных исследований в силу их ограниченного объема имеют скорее методическую ценность. Они демонстрируют широкий спектр возможностей и перспективы развития исследований по ключевым проблемам гидрологии суши с использованием современных технических средств наблюдений и методического инструментария трассерной гидрологии.

Для подтверждения полученных результатов и сопоставления их с зарубежными натурными гидрологическими исследованиями в дальнейшем целесообразно использование изотопных трассеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-05-00182, 14-05-00150, 14-05-00114).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдельштейн К. К., Смахтина О. Ю. Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов // Вод. ресурсы. — 1991. — № 5. — С. 5–20.
2. Воронков П. П. Гидрохимия местного стока европейской территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 188 с.
3. Elsenbeer H., Lorieri D., Bonell M. Mixing model approaches to estimate storm flow sources in an overland flow-dominated tropical rain forest catchment // Water Resources Research. — 1995. — Vol. 31, N 9. — P. 99–107.
4. Lui F., Williams M. W., Cain N. Source waters and flow paths in the alpine catchment, Colorado Front Range, United States [Электронный ресурс]. — onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004WR003076/full (дата обращения 15.02.2016).
5. Чижова Ю. Н., Буданцева Н. А., Ефимова Л. Е., Лукьянова А. Н., Суркова Г. В., Васильчук Ю. К. Изотопно-кислородный состав атмосферных осадков и воды в речной системе Средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2013. — № 2. — С. 84–93.
6. Tetzlaff D., Buttle J., Carey S. K., McGuire K., Laudon H., Soulsby C. Tracer-based assessment of flow paths, storage and runoff generation in northern catchments: a review // Hydrol. Process. — 2015. — Vol. 29, N 16. — P. 3475–3490.
7. Hooper R. P. Applying the scientific method to small catchment studies: a review of the Panola Mountain experience // Hydrol. Process. — 2001. — Vol. 15, N 10. — P. 2039–2050.

8. **Bonell M., Fritsch J. M.** Combining hydrometric-hydrochemistry methods: a challenge for advancing runoff generation process research // *Hydrochemistry, IAHS Publ.* — 1999. — N 244. — P. 165–184.
9. **Семёнов М. Ю., Зимник Е. А.** Использование химического состава поверхностных вод для оценки вкладов источников растворенного вещества // *География и природ. ресурсы.* — 2010. — № 2. — С. 132–139.
10. **Семёнов М. Ю., Снытко В. А.** Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // *Докл. РАН.* — 2013. — Т. 453, № 6. — С. 686–689.
11. **Болдескул А. Г., Шапов В. В., Гарцман Б. И., Кожевникова Н. К.** Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // *Тихоокеан. геология.* — 2014. — Т. 33, № 2. — С. 90–101.
12. **Гарцман Б. И., Шапов В. В.** Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // *Вод. ресурсы.* — 2015. — Т. 42, № 6. — С. 589–599.
13. **Губарева Т. С., Болдескул А. Г., Гарцман Б. И., Шапов 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.
14. **Губарева Т. С., Гарцман Б. И., Шапов В. В., Болдескул А. Г., Кожевникова Н. К.** Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // *Метеорология и гидрология.* — 2015. — № 3. — С. 97–108.
15. **Шапов В. В., Гарцман Б. И., Губарева Т. С., Кожевникова Н. К., Болдескул А. Г.** Экспериментальные исследования генетической структуры стока с помощью химических трассеров: постановка задачи // *Инж. изыскания.* — 2013. — № 1. — С. 60–69.
16. **Кичигина Н. В., Абалаков А. Д., Дроков В. В., Марышкин Д. И.** Водотоки в пределах научно-учебного полигона «Сарма» на побережье оз. Байкал как объекты экологически ориентированных видов туризма // *Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле.* — 2015. — Т. 14. — С. 34–45.
17. **Руководство** по химическому анализу поверхностных вод суши / Отв. ред. А. Д. Семёнова. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 542 с.
18. **Cristophersen N., Hopper R. P.** Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem // *Water Resources Research.* — 1992. — Vol. 28. — P. 99–107.
19. **Hooper R. P.** Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry [Электронный ресурс]. — onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002WR001528/epdf (дата обращения 11.03.2016).
20. **Cristophersen 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 // *Journ. Hydrol.* — 1990. — Vol. 116, N 1–4. — P. 307–320.
21. **Алёкин О. А.** Химический анализ вод суши. — Л.: Гидрометеоздат, 1954. — 205 с.

Поступила в редакцию 5 мая 2016 г.