

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 556

КОМПОНЕНТЫ СТОКА МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ
СИХОТЭ-АЛИНЯ: ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ И ТРАССЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2019 г. Т. С. Губарева^{1, 2; *}, Б. И. Гарцман^{1, 2}, В. В. Шамов², Т. Н. Луценко²,
А. Г. Болдескул², Н. К. Кожевникова³, С. Ю. Лупаков²

¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

³ ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, Владивосток, Россия

*e-mail: tgubareva@bk.ru

Поступила в редакцию 27.11.2018 г.; после доработки 25.01.2019 г.; принята в печать 30.05.2019 г.

В статье приведены обобщения результатов систематического изучения стокоформирования на двух малых водосборах в верховье р. Усури путем разделения гидрографа стока по источникам питания на основе детальных гидролого-гидрохимических съемок и применения трассерной модели смешения. Выполненные в период с 2011 по 2016 гг. исследования позволили идентифицировать и рассчитать компоненты речного стока летне-осеннего периода на трех гидрологических постах и оценить их взаимную динамику в различных масштабах времени. Показано, что в случае ландшафтной однородности водосбора (руч. Медвежий) речной сток может быть представлен как результат смешения трех источников. Такая, наиболее общепринятая, схема разделения гидрографа включает в качестве источников прямой дождевой сток, почвенную органическую составляющую и глубокий базисный сток. В случае выраженной неоднородности ландшафтного строения водосбора (руч. Еловый) речные воды могут быть представлены как результат смешения четырех источников. Четвертый источник появляется в результате разделения почвенного питания на органическую и минеральную составляющие. Такое разделение обусловлено распространением в бассейне холодного верхнего пояса пихтово-еловых лесов, почвы которых отличаются более низкой скоростью деструкции органического вещества и более глубоким иллювированием растворенного органического углерода. Выявлены статистически значимые зависимости долей базисной и почвенной органической компонент речного стока от суммарного расхода, качество которых во многих случаях позволяет их считать расчетными.

Ключевые слова: речной водосбор, источники питания, гидрохимические трассеры, модель смешения, разделение гидрографа.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140>

ВВЕДЕНИЕ

Анализ механизмов формирования речных вод как результата взаимодействия различных генетических составляющих стока в процессе их смешения, направлен на изучение генезиса их химического состава в различных регионах в разнообразных ландшафтных и климатических условиях. После пионерной работы П.П. Воронкова [3], который выполнял разделение гидрографа стока по генетическим категориям вод с учетом их химического состава, понимание процессов формирования стока существенно изменилось по мере развития моделей смешения с использованием природных химических трассеров с учетом данных детальных полевых измерений в экспериментальных речных бассейнах [19].

Современная версия физической трассерной модели смешения, основанная на принципе баланса воды и растворенных веществ, ранее адаптирована и отгестирована авторами для вариантов с тремя и четырьмя источниками питания [6, 7]. Особенностью модели является блок многомерного статистического анализа данных ЕММА (end-member mixing analysis), где “end-member” означает компоненты речного стока или источники питания. ЕММА обеспечивает надежность выявления трассеров и установления числа устойчивых компонент стока на основе анализа исключительно речных проб. В настоящее время тестирование и апробирование подобных моделей осуществляют на многих экспериментальных бассейнах в различных климатических и ландшафтных условиях, что дает возможность

выявлять специфические и стабильные виды источников питания речного стока, оценить их суточную, сезонную и многолетнюю динамику [10, 12, 14, 17 и др.].

В данной статье приводятся результаты обобщения сезонных натуральных деталей наблюдений за процессами формирования дождевого паводочного стока на малых речных водосборах южного Сихотэ-Алиня, выполненных на территории Верхнеуссурийского лесного стационара (ВУС) ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН и результатов моделирования на основе трассерной модели смешения. Общий период наблюдений охватывает 6 лет.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения были выполнены на малых водосборах руч. Еловый и Медвежий Ключ (далее по тексту Медвежий), являющихся притоками

р. Правая Соколовка (верховье р. Уссури), бассейн которой площадью 45 км² занимает территория ВУС (рис. 1). Диапазон высот в бассейне р. Правая Соколовка составляет 450–1100 м. В геологическом отношении бассейн неоднороден. В его правобережной части преобладают юрские метаморфические породы основного состава, а в левобережной – преимущественно породы меловых и триасовых вулканитов и субвулканитов кислого и среднего состава.

Влажный и бореальный климат района формируется под влиянием восточноазиатского умеренного муссона. Средняя годовая температура воздуха составляет 0,7 °С, с максимумом 37–38 °С в июле/августе, и минимумом –43÷–45 °С в январе. Среднегодовое количество осадков 780 мм, из них более 80% приходится на теплый период – с апреля по октябрь. Количество осадков может существенно варьировать от года к году, в летне-осенний

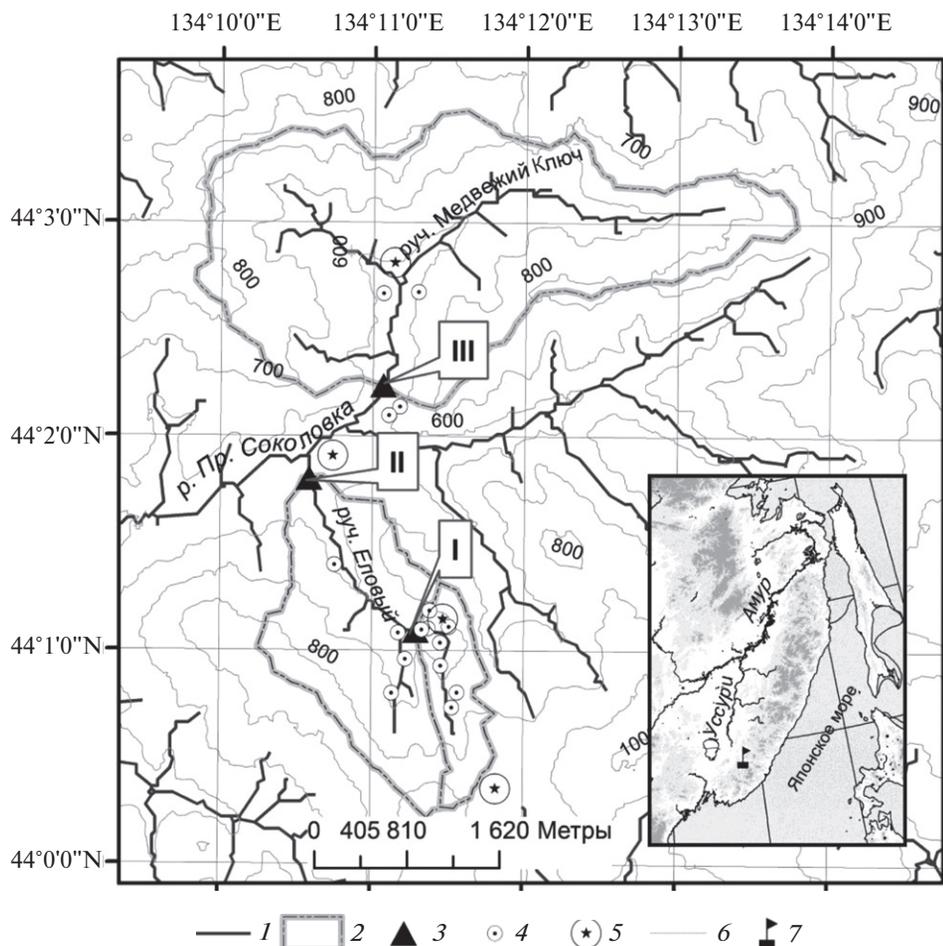


Рис. 1. Исследуемые водосборы в бассейне р. Правая Соколовка в пределах ВУС: I – руч. Еловый–Плотина, 0,77 км²; II – руч. Еловый–Устье, 3,47 км²; III – руч. Медвежий, 7,67 км².

1 – ручьи, 2 – границы водосборов, 3 – створ измерений, 4 – тензиолизиметры, 5 – осадкомеры, 6 – горизонталы, 7 – расположение ВУС на схеме Приморья.

период отклонения могут достигать 40–170% сезонной нормы. Суточный максимум осадков обусловлен влиянием тропических циклонов в августе–сентябре и может превышать 100 мм. Высота снежного покрова составляет 52–102 см, максимальная глубина промерзания достигает 53–125 см.

По природным условиям территория бассейна типична для среднегорного пояса Южного Сихотэ-Алиня и является эталоном южной тайги. Под хвойно-широколиственными лесами в поясе гор от 500 до 800–900 м над у.м. распространены горнолесные бурые почвы, формирующиеся на склоновом делювии, а на аллювиальных отложениях – горно-долинные почвы. В высотном поясе от 800 до 1000 м над у.м. под пихтово-еловыми лесами на элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях вершин и склонов преобладают горно-таежные иллювиально-гумусовые почвы.

Гидрологические измерения и отбор проб речных вод выполнялись ежегодно отдельными циклами в период с мая по сентябрь на трех постах (см. рис. 1). Непрерывная запись уровней воды осуществлялась гидростатическим датчиком. Расходы воды измерялись с помощью электромагнитного измерителя скорости потока, в периоды высокого увлажнения – ежедневно, при паводках – дважды в сутки, в межень – с интервалом 2–5 суток. Вычисление стока осуществлялось по кривым $Q = f(H)$ по часовым интервалам. Метеорологические характеристики регистрировались автоматическими метеостанциями и осадкомерами.

Пробы природных вод различного типа – атмосферных, вод почвенных (склоновых), русловых – систематически отбирались в периоды проведения гидрологических наблюдений. Атмосферные воды собирались под открытым небом на расстоянии не менее 3 м от деревьев. Для отбора почвенно-грунтовых вод использовались тензиолизиметры (Тл) с керамическими наконечниками, длиной 0.5 и 1.0 м. Они закладывались вертикально на глубину от 0.35 до 0.80 м в местах концентрации гравитационной почвенной влаги, характеризующихся различными типами почв (см. рис. 1). Пробы воды из ручьев отбирались каждый раз при измерении расходов. Температуру воды, рН, удельную электропроводность и общее содержание растворенных веществ (TDS) измеряли *in-situ* с помощью портативного анализатора качества воды.

В Лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН все пробы анализировались на содержание K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Si, растворенного органического углерода (POУ) по стандартным гидрохимическим методикам [2, 5, 7].

ТРАССЕРНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Выявление и оценка компонент речного стока осуществлялись на основе трассерной модели смешения с использованием статистической процедуры ЕММА, предложенной в работах [13, 15, 16]. Основой ЕММА является метод главных компонент (МГК), с использованием которого выполняется построение модели экспериментальных химических показателей воды в проекции главных компонент. Главные компоненты вычисляются через линейные комбинации всех исходных данных и интерпретируются как модельные переменные, ранжированные по “весу” (eigenvalue) каждой компоненты. Как правило, в модели данных учитываются первые 2–3 главные компоненты, а ее качество оценивается величиной описываемой ими суммарной доли дисперсии исходной совокупности данных. Модель, описывающая не менее 90% исходной дисперсии экспериментальных данных, считается надежной.

Число главных компонент, принимаемых во внимание, определяет размерность модели данных (2D или 3D), которая задает число источников питания в модели смешения. Если принята размерность 2D, то необходимо выявить три источника питания. Геометрическим представлением модели с тремя источниками является диаграмма смешения в поле двух первых главных компонент, в котором нанесены точки, соответствующие пробам речных вод и предполагаемых источников. Источники, как правило, отображаются средними или медианными значениями главных компонент их выборок. При адекватных данных и правильном выборе источников точки речных проб на диаграмме заключены в границах треугольника, вершины которого определяют осредненными точками источников. При увеличении размерности модели данных до 3D, пространство смешения определяется уже четырьмя источниками, а геометрически в пространстве трех главных компонент оно представляет собой объемную фигуру – тетраэдр [6].

Таким образом, в модели исходных данных главные компоненты, представляющие линейные комбинации всех измеренных химических показателей, интерпретируются как сложные трассеры. При решении модели смешения вместо измеренных концентраций обычных трассеров используются значения первых, наиболее “весомых”, главных компонент. Детальное изложение методики ЕММА-моделирования, а также особенности применяемых авторами алгоритмов с примерами анализа дано в [5, 7].

В генерализированной форме модель смешения записывается в виде системы:

$$\begin{cases} f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{n+1} = 1 \\ C1_1 f_1 + C1_2 f_2 + C1_3 f_3 + \dots + C1_{n+1} f_{n+1} = C1_t \\ C2_1 f_1 + C2_2 f_2 + C2_3 f_3 + \dots + C2_{n+1} f_{n+1} = C2_t, \\ \dots \\ Cn_1 f_1 + Cn_2 f_2 + Cn_3 f_3 + \dots + Cn_{n+1} f_{n+1} = Cn_t \end{cases} \quad (1)$$

где f – доля источника воды в речных водах, Cn_{n+1} – концентрация n -трассера ($n = 1, \dots, n$), нижний индекс $n + 1$ – количество источников питания, Cn_t – концентрация n -трассера в речных водах в момент t .

Наиболее широко используется 2D версия модели – с тремя источниками и двумя сложными трассерами, аналитическое решение которой можно найти в работе [7]. Опыт применения такой модели показывает, что речную водную массу в большинстве случаев можно представить результатом сложения трех источников питания, а разделение гидрографа стока на три составляющих стало уже стандартной методикой [18, 19 и др.].

Однако в специфических условиях (присутствие карста, многолетней мерзлоты, контрастных стокоформирующих комплексов) источников питания может оказаться более трех. Попытки содержательного обоснования модели с четырьмя источниками предпринимались уже давно, в последние годы появились примеры формального ее применения в рамках ЕММА-анализа [11, 12, 14, 17 и др.]. В частности, авторами высказана гипотеза о существовании четырех источников питания руч. Еловый [5], дано аналитическое решение модели и изложен весь алгоритм моделирования для этого варианта [6].

Критическим условием адекватности модели смешения является консервативность трассеров [16] в смысле соблюдения закона сохранения массы трассера при смешении. Консервативность сложных трассеров, с одной стороны, обеспечивается отбором лишь достаточно стабильных в растворе химических веществ и самим фактом использования набора показателей, что повышает устойчивость оценки по сравнению с единственным трассером. С другой стороны, в рамках ЕММА консервативность сложных трассеров подвергается статистической проверке с помощью анализа линейных связей между химическими показателями и анализа остатков, полученных при сравнении модели данных размерности 2D/3D с измеренными значениями концентраций. При соблюдении гипотезы консервативности, распределение остатков должно представлять собой случайный нормально-распределенный “шум”.

Детальное изложение методики приведено в работах [6, 15]. Очевидными преимуществами

трассерной модели смешения при разделении гидрографа стока по источникам питания являются: объективность и полнота (используются только данные измерений химического состава водных масс, циркулирующих в бассейне, причем в полном объеме); способность идентифицировать специфические составляющие стока и оценивать их характер и взаимную динамику; возможность оценивать до четырех источников питания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геохимические особенности речных вод

Химический состав вод руч. Еловый и Медвежий заметно различается, несмотря на близость расположения их водосборов. Заметны также и различия в химическом составе вод руч. Еловый в створах Плотина и Устье. Наглядно это можно продемонстрировать на диаграмме Пайпера (рис. 2а).

Воды руч. Еловый у поста Плотина ультрапресные, слабокислые, сульфатные натриево-кальциевые. Низкая величина TDS вод (22–30 мг/л) в меженный период свидетельствует об атмосферном генезисе склоновых грунтовых вод, а также о слабой степени химической денудации подстилающих пород. Преобладание SO_4^{2-} и незначительные концентрации HCO_3^- могут быть следствием как специфических процессов разложения органических веществ в иллювиально-гумусовых почвах с образованием сульфатов, так и возможного наличия в подстилающих породах вкраплений сульфидсодержащих минералов. Значения pH варьируют в диапазоне 5.8–6.1. При паводках несколько снижаются величины TDS и pH, содержание SO_4^{2-} уменьшается и увеличивается содержание NO_3^- , соотношения других ионов практически не меняются.

Воды руч. Еловый в Устье значительно отличаются по анионному составу в сравнении со створом Плотина. В период летней межени воды ультрапресные, нейтральные, сульфатно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые, показатель pH варьирует в диапазоне 6.5–7, величина TDS составляет 27–35 мг/л. Гидрокарбонатный характер вод в нижнем течении руч. Еловый в значительной мере определяется впадением руч. Резервный, в анионном составе которого HCO_3^- является преобладающим.

Воды руч. Медвежий пресные, слабощелочные, сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Значения минерализации в период низкого стока здесь составляют 85–120 мг/л, что в 3.0–3.5 раза выше, чем в руч. Еловый. Это обусловлено более интенсивным физико-химическим выветриванием пород основного и среднего состава в бассейне по сравнению

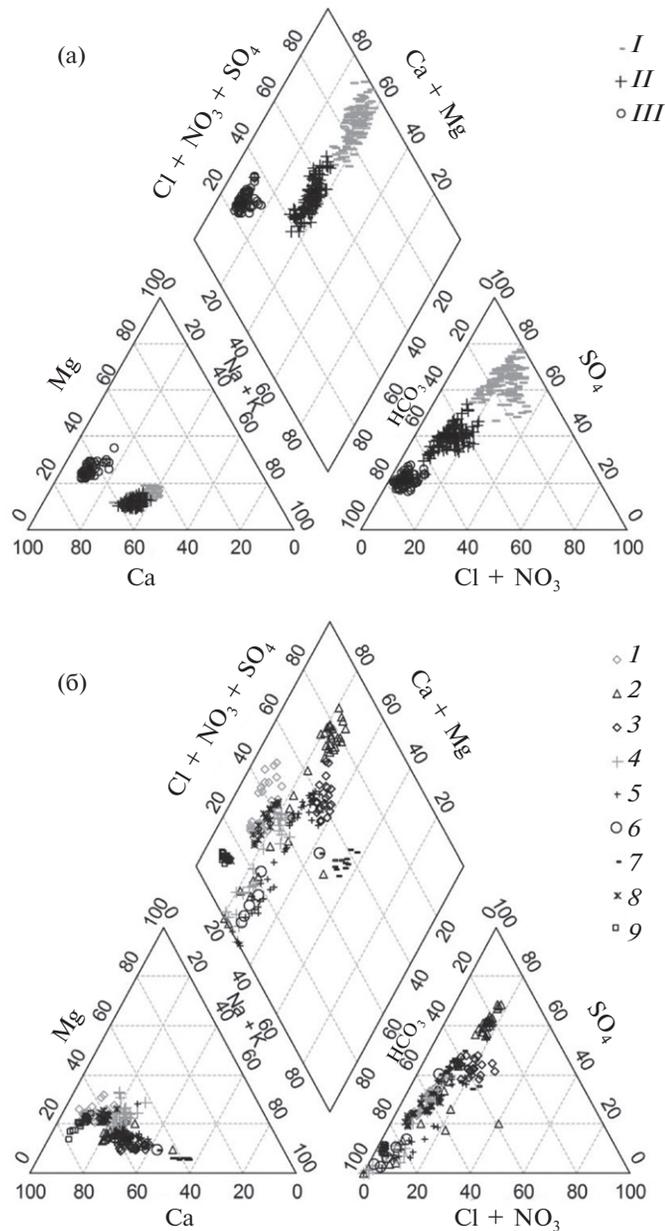


Рис. 2. Диаграммы Пайпера, представляющие соотношение основных ионов, в %-экв.: (а) речные воды: *I* – Еловый–Плотина, *II* – Еловый–Устье, *III* – Медвежий–Устье; (б) почвенные воды: *1* – Тл Бревно, *2* – Тл Верхний, *3* – Тл Волоколамский, *4* – Тл Кабаний, *5* – Тл Метео, *6* – Тл Метео 50, *7* – Тл Резервный лев., *8* – Тл Родниковый, *9* – Тл Трубецкой.

с кислыми материнскими породами, слагающими бассейн руч. Еловый. Также это свидетельствует об устойчивом питании руч. Медвежий почвенно-грунтовыми водами, находящимися в более продолжительном взаимодействии с породами. Значения рН воды изменяются в пределах 7.18–7.90, содержание гидрокарбонатов в межень варьирует в диапазоне 25–65 мг/л, что значительно превышает аналогичные показатели руч. Еловый.

Содержание РОУ в руч. Еловый минимально в меженный период – 1.8–2.5 мг/л и возрастает

во время дождей до 9.1 мг/л. Содержание Si, наоборот, максимально во время межени и снижается при повышении расходов, что подтверждает его поступление в составе почвенно-грунтовых вод. В период продолжительной летней межени, при колебаниях водности руч. Еловый в интервале 0.5–5.0 л/(с·км²), отмечалось повышенное содержание Si в пробах, достигающее 8–11 мг/л у Плотины и 9–14 мг/л в Устье. В руч. Медвежий содержание РОУ изменяется в диапазоне 2.8–10.4 мг/л, а концентрация Si не имеет связи с изменениями водности.

Для вод руч. Еловый можно выделить четыре группы элементов химического состава по характеру изменения их концентраций при увеличении расхода воды. Заметное возрастание характерно для РОУ ($R^2 = 0.70$ у Плотины, $R^2 = 0.41$ у Устья) и NO_3^- ($R^2 = 0.52$ и $R^2 = 0.70$ соответственно). Заметное снижение – для SO_4^{2-} ($R^2 = 0.40$); тенденция к снижению – для Na^+ , Si , HCO_3^- (только у Устья). Отсутствие связи концентрации с водностью характерно для Cl^- , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} . Для вод руч. Медвежий связи химических показателей с водностью в целом более тесные. К категории “заметное возрастание” относится показатель РОУ ($R^2 = 0.82$), к категории “заметное снижение” – SO_4^{2-} , Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} , TDS, Na^+ (для всех $R^2 > 0.40$). Тенденция к снижению проявляется для pH ($R^2 = 0.29$), а содержание Cl^- и K^+ не связано с водностью ручья.

Источником РОУ и NO_3^- , очевидно, являются органогенные почвенные горизонты (подстилка и гумусовый). Рост РОУ всегда связан с выпадением осадков, а характер откликов обусловлен различиями в увлажненности, топографии, водно-физических свойствах почв и пород, биоты [9]. С глубокими почвенно-грунтовыми водами, отражающими химический состав минеральных почвенных горизонтов, отражающими химический состав минеральных почвенных горизонтов, поступают SO_4^{2-} , Si , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , поэтому повышение водности приводит к снижению их концентраций в речных водах.

Геохимические особенности предполагаемых источников питания

В качестве источников питания речного стока рассматривались атмосферные воды, почвенные воды (из различных горизонтов почв) и базисный (глубокий склоновый) сток, обеспечивающий питание ручьев в низкую межень.

Атмосферные осадки – ультрапресные, кислые, гидрокарбонатно-сульфатные, преимущественно-кальциевые. Кислый состав осадков может быть объяснен влиянием юго-западного атмосферного переноса загрязняющих веществ из стран Восточной Азии – оксидов серы и азота [8]. Пробы осадков составляют единую выборку, которая применялась в расчетах для всех ручьев.

Химический состав почвенных вод формируется под действием всей совокупности ландшафтных факторов, включая горные породы, почвы, растительность. Неоднородность геологического строения бассейна р. Правая Соколовка, а также выраженный в его пределах контакт поясов пихтово-еловых и хвойно-широколиственных лесов, обуславливают разнообразие переходных почв и приводят к различию в химии вод. При выявлении источников в каждом створе использо-

вались выборки лизиметрических проб, отобранных на соответствующих участках водосборов.

По соотношению главных анионов в почвенных водах бассейна руч. Еловый можно выделить три группы (рис. 2б). Минимальное содержание HCO_3^- (до 35%-экв) определено в зоне преобладания пихтово-еловых сообществ и иллювиально-гумусовых почв (Тл Верхний). Пробы нижней части бассейна с преобладанием бурых горнолесных почв (Тл Волоколамский, Тл Резервный лев.) содержат 35–60%-экв. К этой же группе относятся воды Тл Метео из неглубокого почвенного горизонта вблизи границы лесных сообществ. Воды, отобранные почти в той же точке с максимально возможным заглублением (50 см) с помощью Тл Метео 50, образуют третью группу с наибольшим содержанием HCO_3^- (80–100%-экв). По соотношению катионов различия почвенных вод незначительны (см. рис. 2б), их главным катионом является Ca^{2+} (50–70%-экв), за исключением Тл Резервный лев., где преобладают катионы Mg^{2+} (55–65%-экв) и Na^+ (50–60%-экв).

В бассейне руч. Медвежий также выделены три группы почвенных вод. Воды Тл Трубецкой, расположенного в днище глубоко врезанной долины левобережного притока, характеризуются высокой минерализацией (120–160 мг/л) и слабощелочным pH, доминированием Ca^{2+} (60–80%-экв) среди катионов и HCO_3^- и SO_4^{2-} (больше 90%-экв) – среди анионов. Вторую группу представляют воды Тл Кабаний (нижняя часть правобережного склона) и Тл Родниковый (средняя часть крутого левобережного склона). Их минерализация варьирует в диапазоне 35–62 мг/л, по величине pH воды нейтральные (средний pH – 6.68). Воды Тл Бревно, отобранные из верхнего почвенного горизонта, выделяются высоким содержанием NO_3^- и РОУ (в среднем соответственно 28.7 и 18 мг/л). Доминирующий катион – Ca^{2+} , остальные показатели макросостава не отличаются от других вод.

АНАЛИЗ ТРАССЕРОВ И ЧИСЛО ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Для каждого створа по выборке речных проб за все годы наблюдений строились диаграммы связи концентраций всех возможных пар химических показателей (потенциальных трассеров). В створах руч. Еловый связи выражены слабо и величины коэффициента детерминации R^2 не превышают 0.5. Более тесные зависимости с $R^2 > 0.5$ выявлены для руч. Медвежий (табл. 1). Модельные построения для руч. Медвежий выполнялись по набору показателей, для которых выявлены такие связи. Модель этого набора данных уровня 2D, включающая две первые главные компоненты, является надежной,

суммарная объясненная дисперсия составляет 92.2% (табл. 2). Статистическая проверка гипотезы консервативности с помощью диаграмм “остатки–измеренные значения” (рис. 3а) подтверждает случайный характер погрешностей такой модели. Следовательно, принятый набор показателей пригоден как совокупность консервативных трассеров для построения модели смешения с тремя источниками для руч. Медвежий.

Для руч. Еловый использовались показатели, для которых величины R^2 попарных связей превышают 0.3 (см. табл. 1). В обоих створах МГК-модель на уровне 2D и даже 3D не может расцениваться как надежная, так как суммарная дисперсия трех первых главных компонент не

превышает 88%. В работе [6] уже было показано, что в отдельные годы формирование стока руч. Еловый может быть представлено моделью смешения четырех источников. Для получения подобной модели достаточной надежности для всего периода наблюдений (2012–2015) наборы трассеров были сокращены.

Набор показателей для поста Плотина включает NO_3^- и РОУ, которые представляют органическую компоненту стока и отражают вклад органических почвенных горизонтов. Так как РОУ характеризуется большей величиной связи R^2 , то предпочтение отдано ему, а NO_3^- исключен из набора трассеров. Суммарная объясненная дисперсия модели на уровне 3D с набором трассеров РОУ, SO_4^{2-} , Na^+ , Si достигает 94%, а их консер-

Таблица 1. Пары трассеров с наличием характерных трендов

R^2	Еловый–Плотина, $n = 129$	Еловый–Устье, $n = 133$	Медвежье–Устье, $n = 69$
> 0.71	–	–	TDS– HCO_3^- ; SO_4^{2-} – Mg^{2+} ; HCO_3^- – Mg^{2+} ; TDS– Mg^{2+}
0.71–0.61	–	–	РОУ– SO_4^{2-} ; HCO_3^- – SO_4^{2-} ; SO_4^{2-} – Ca^{2+} ; HCO_3^- – Ca^{2+} TDS– Ca^{2+} ; Ca^{2+} – Mg^{2+}
0.6–0.51	–	–	TDS– SO_4^{2-} ; РОУ– Mg^{2+}
0.5–0.41	РОУ– SO_4^{2-} ; Na^+ –Si	HCO_3^- – Mg^{2+} ; HCO_3^- –TDS; SO_4^{2-} – NO_3^-	не приводятся
0.4–0.3	SO_4^{2-} – NO_3^- ; РОУ– NO_3^- ; SO_4^{2-} – Na^+	NO_3^- – HCO_3^- ; NO_3^- – Na^+ ; HCO_3^- – Na^+ ; Na^+ –TDS	не приводятся

Таблица 2. Оценки объясненной дисперсии главных компонент по МГК-модели

Водосбор	Набор трассеров	U1	U2	U3	U4	U5	U6
Еловый–Плотина	РОУ, SO_4^{2-} , Na^+ , Si, NO_3^-	61.5	18.4 79.9*	8.1 88.0	7.4 95.3	4.7 100	–
Еловый–Устье	HCO_3^- , Mg^{2+} , NO_3^- , Na^+ , TDS, SO_4^{2-}	55.0	24.1 78.9	8.9 87.7	5.3 93.0	4.6 97.6	2.4 100
Медвежий–Устье	TDS, РОУ, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+}	83.6	8.6 92.2	4.4 96.7	2.1 98.7	0.9 99.6	0.4 100

* — в знаменателе приведена суммарная дисперсия.

вативность подтверждается отсутствием структур на графиках “остатки – измеренные значения” (рис. 3б). Для поста Устье из набора показателей исключены TDS и SO_4^{2-} . В результате суммарная

объясненная дисперсия 3D модели данных достигает 95%. Консервативность трассеров Mg^{2+} , NO_3^- , Na^+ подтверждается отсутствием структур связи на графиках (рис. 3в).

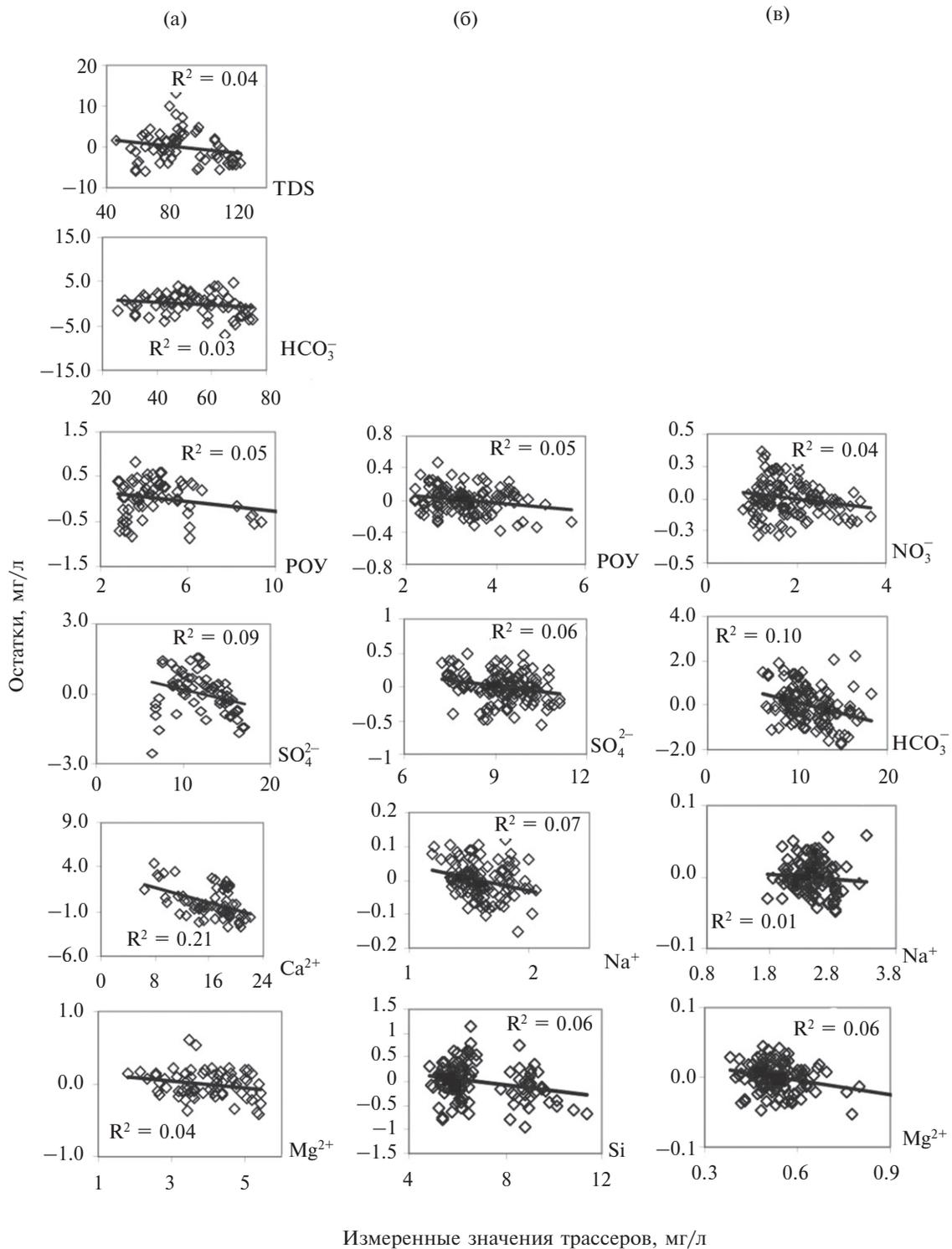


Рис. 3. Графики “остатки–измеренные значения” потенциальных трассеров: (а) руч. Медвежий, 2D, (б) руч. Еловый–Плотина, 3D, (в) руч. Еловый в Устье, 3D.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СМЕШЕНИЯ И КОМПОНЕНТ СТОКА

Диаграммы смешения для каждого створа были построены в пространстве главных компонент (U -пространство) путем проецирования в него матрицы концентраций трассеров в речных пробах. В это же пространство проецировались концентрации трассеров предполагаемых источников с использованием коэффициентов перехода, вычисленных по выборке речных проб.

Диаграмма смешения для руч. Медвежий представляет собой облако точек, представляющих речные пробы, расположенное в двумерном (размерность модели 2D) пространстве сложных трассеров $\langle U_1, U_2 \rangle$ и ограниченное тремя источниками (рис. 4а). Для створов руч. Еловый построены модели уровня 3D, поэтому облако речных проб располагается в трехмерном пространстве смешения $\langle U_1, U_2, U_3 \rangle$ и ограничивается четырьмя источниками (рис. 4б, в). Во всех случаях речные пробы с достаточной точностью включены в поле смешения – треугольник или тетраэдр, образованный источниками. Это геометрически подтверждает возможность представления состава каждой речной пробы в виде смеси вод источников, т.е. верифицирует модель в целом. При близком расположении в U -пространстве нескольких однотипных источников возникает необходимость выбора, выполняемого путем рациональных интерпретаций и экспертных оценок, что вносит элементы субъективизма в модельные построения.

Выбор источников для руч. Медвежий однозначен, и их интерпретация не вызывает сомнения. Источники представлены пробами почвенных (Тл Трубецкой и Тл Бревно) и дождевых вод, их осредненные показатели образуют ак-

кватный треугольник смешения. Дождевые воды отражают быстрый поверхностный сток, т.е. часть выпадающих осадков, которая максимально быстро достигает реки, практически не испытывая химической трансформации при непродолжительном контакте с ландшафтами. Пробы, отобранные Тл Трубецкой, представляют базисный сток – наиболее глубокую почвенно-грунтовую составляющую стока ручья, обеспечивающую основное его питание в маловодье. Пробы, отобранные Тл Бревно, характеризуются высокой динамичностью химического состава, основное их отличие – повышенное содержание РОУ. Поскольку они представляют воды верхних органогенных горизонтов почвы, то интерпретация этой компоненты возможна как приповерхностная органическая компонента стока. Остальные пробы почвенных вод, отобранные Тл Родниковый и Тл Кабаний, в диаграмме ложатся практически на грань треугольника, соединяющую вершины базисного и дождевого стока, что говорит об их смешанном характере.

Обоснование источников в бассейне руч. Еловый значительно сложнее. Это обусловлено как большей размерностью самой модели, так и трудностью геометрического анализа объемной диаграммы смешения. Последовательное тестирование всех вариантов комбинаций источников, интерактивная динамическая визуализация диаграмм смешения в трехмерном U -пространстве и сопутствующие расчеты долей источников в каждой речной пробе выполнялись с помощью специально разработанной программы Tetra [6]. В результате у поста Плотина определены четыре источника, образующие зону смешения – это дождевые воды, почвенные, отобранные

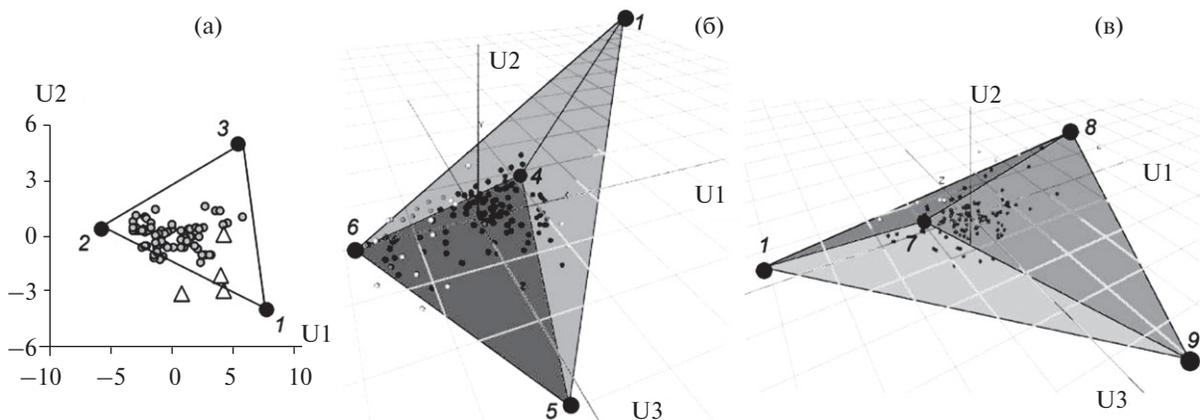


Рис. 4. Диаграммы смешения в U -пространстве: (а) руч. Медвежий, (б) руч. Еловый–Плотина, (в) руч. Еловый–Устье.

Номерами обозначены источники: 1 – дождевые воды, 2 – Тл Трубецкой, 3 – Тл Бревно, 4 – Тл Верхний, 5 – Тл Метео, 6 – проба в межень 2012 г., 7 – Тл Волоколамский, 8 – Тл Метео 50, 9 – Тл Резервный лев.

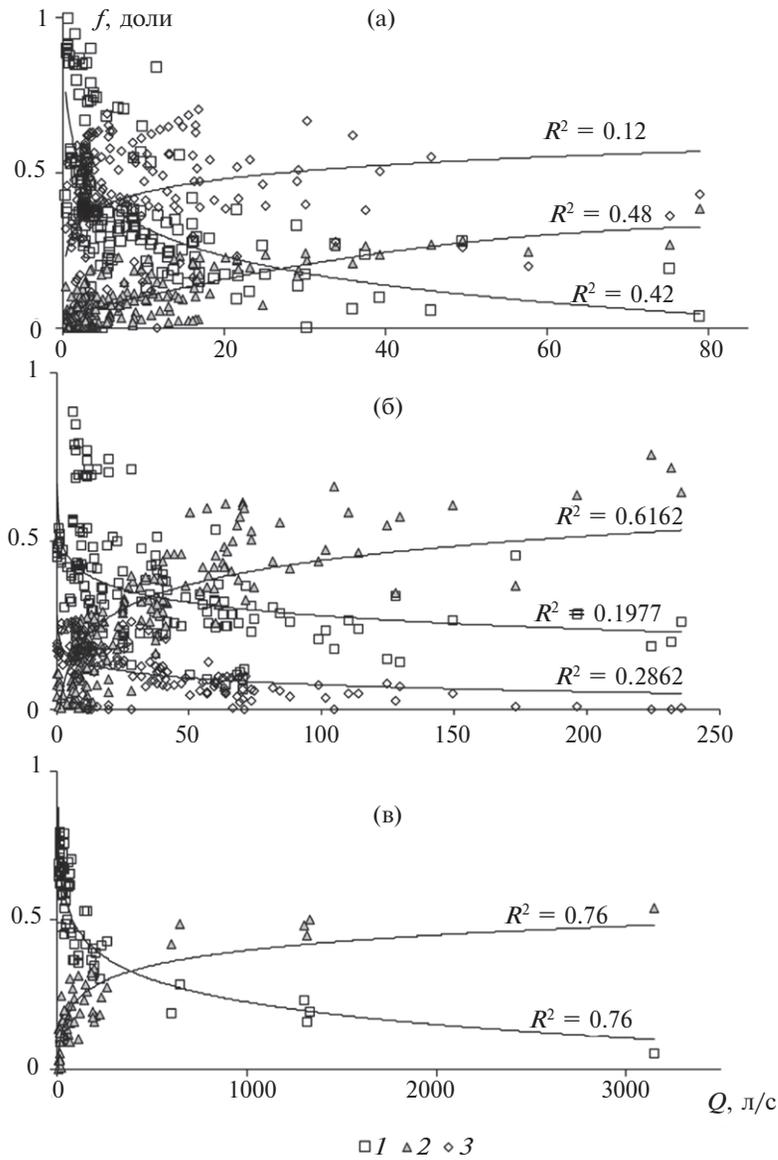


Рис. 5. Зависимости долей компонент стока от величины расхода: (а) Еловый–Плотина, (б) Еловый–Устье, (в) Медвежий–Устье.

1 – базисный сток, 2 – почвенная органическая компонента, 3 – почвенная минеральная компонента.

Таблица 3. Осредненные модельные доли компонент стока, %

Год	X, мм	Еловый–Плотина				Еловый–Устье				Медвежий–Устье		
		Дождевой	Почв. орг.	Почв. мин.	Базисный	Дождевой	Почв. орг.	Почв. мин.	Базисный	Дождевой	Почв. орг.	Базисный
2012	490	8	12	11	69	22	23	14	41	–	–	–
2013	376	11	12	48	28	26	31	10	34	–	–	–
2014	550	9	4	55	32	29	33	15	23	32	11	57
2015	346	11	9	39	48	17	7	6	71	19	15	67
2016	752	–	–	–	–	–	–	–	–	27	28	45

с помощью Тл Верхний и Тл Метео, проба речной воды межженного периода. У поста Устье зона смещения образована дождевыми водами, почвенными водами, отобранными Тл Резервный лев, Тл Волоколамский и Тл Метео 50.

Дождевые воды являются общим источником питания в модели для всех водосборов. Их химический состав относительно стабилен в сравнении с почвенными водами, и на диаграмме смещения представлен средними значениями $\langle U1, U2, U3 \rangle$ совокупной выборки за весь период наблюдений.

Базисное питание представлено у поста Плотина пробой из ручья низкой межени 2012 г., а у поста Устье – осредненными данными почвенных вод, отобранных с помощью Тл Метео 50, характеризующих водную массу, стекающую по рыхлым склоновым отложениям на контакте с коренными породами.

Источник, представленный Тл Метео (склоновая терраса) и Тл Волоколамский (склоновый поток на старом волоке), характеризует органическую компоненту стока, так как по сути это воды приповерхностных органогенных горизонтов почвы, обеспечивающих поступление в реку РОУ и нитратов.

Четвертый источник, представленный лизиметрическими пробами Тл Верхний (крутой правый склон долины) и Тл Резервный лев. (у подножия крутого левого склона), можно интерпретировать как почвенная минеральная компонента. По сути, данная компонента контролирует приповерхностный склоновый сток верхнего яруса бассейна, почвы которого отличаются более низкой скоростью деструкции органического вещества и более глубоким иллювируанием РОУ [1].

Расчет долей питания речного стока из выявленных источников на каждую дату измерения расхода воды по системе уравнений (1) и разделение гидрографов стока выполнены для каждого створа. Завершающее тестирование моделей смещения путем сравнения измеренных и модельных концентраций каждого трассера показала их хорошее качество, коэффициенты корреляции изменяются в диапазоне 0.77–0.98.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обобщение результатов измерений и моделирования позволяют выявить специфику формирования речного стока на исследуемых водосборах. Установлено, что количество трассеров и их состав могут существенно различаться даже для соседних малых бассейнов. Так для руч. Медвежий гипотеза консервативности трассеров подтверждается для набора из шести

показателей в модели размерностью 2D, а для постов руч. Еловый наборы включают лишь по четыре показателя, обеспечивая модель размерностью 3D.

Причиной этому является большое разнообразие химического состава почвенных вод в бассейне руч. Еловый, обусловленное особенностями его геологического, геоморфологического строения бассейна, которые определяют его сложную ландшафтную структуру. Бассейн руч. Еловый сложен сравнительно молодыми горными породами, в его пределах ярко выражены: верхний пояс (>800 м) пихтово-еловых лесов с преобладанием горно-таежных иллювиально-гумусовых почв и нижний пояс кедрово-широколиственных лесов на горнолесных бурых почвах. Бассейн руч. Медвежий сложен более древними горными породами, рельеф – в значительной мере сглаженный. В ландшафтном отношении его бассейн, хотя и значительно больше по площади руч. Еловый, более однороден – кедрово-широколиственные леса, безусловно, преобладают, а доля площади с высотами более 800 м над у.м. незначительна.

Выраженное присутствие ареалов двух типов почв в бассейне руч. Еловый, по-видимому, является одной из причин дополнительной почвенной компоненты стока. Результаты оценивания долей отдельных компонент стока по всем экспериментальным объектам (табл. 3, рис. 5) демонстрируют их высокую изменчивость в различных временных масштабах. Охарактеризовать межгодовую вариабельность долей не позволяет недостаточный объем данных, поэтому ниже анализируются их средние за период наблюдений значения, а также динамика в рамках сезона и паводкового события.

Для всех постов установлена значительная доля базисной компоненты в общем речном стоке, в маловодные годы она может достигать 60–70%. В среднем в бассейне руч. Еловый эта доля составляет 42–44%, а в бассейне руч. Медвежий – около 56%. Изменчивость долей базисного питания характеризуется значимыми обратными связями с расходами ручьев (см. рис. 5). Особенно устойчивы такие зависимости для руч. Медвежий и для руч. Еловый у Плотины, в то время как в Устье руч. Еловый она варьирует год от года. Зависимости, построенные для каждого года, характеризуются довольно высокими значениями R^2 (0.35–0.79).

Средняя доля дождевой компоненты стока в створе Еловый–Плотина составляет 10%, а на устьевых постах обоих руч. Еловый и Медвежий достигает примерно 25%. Эти результаты коррелируют с различиями дренажных свойств верхней и нижней части водосбора руч. Еловый, выявленными авторами ранее при

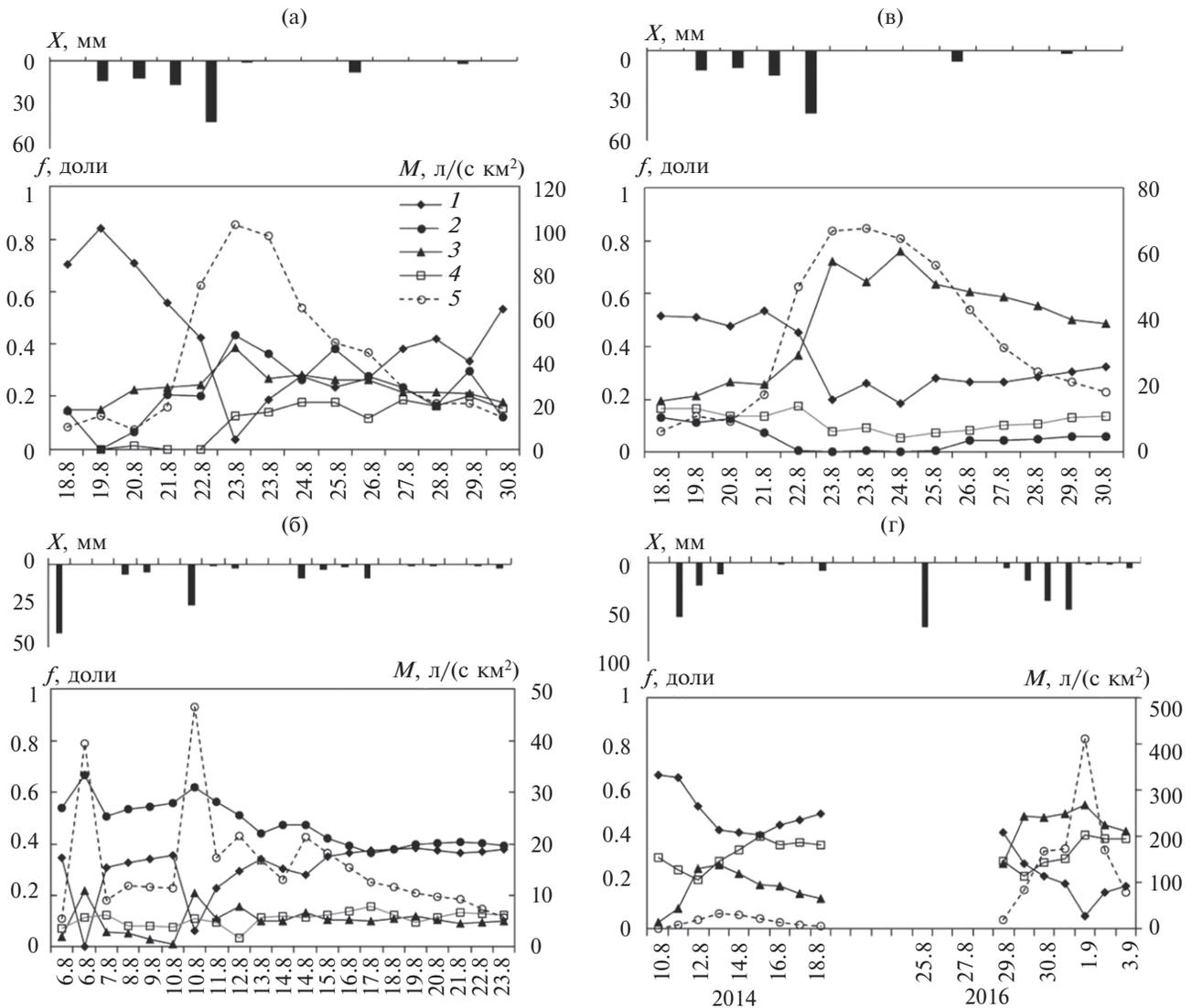


Рис. 6. Динамика компонент стока во время паводковых событий в створах: Еловый–Плотина (а) 2012 г.; (б) 2013 г.; (в) Еловый–Устье 2014 г.; (г) Медвежий–Устье 2014, 2016 г.
 1 – базисная, 2 – почвенная минеральная, 3 – почвенная органическая, 4 – дождевая, 5 – гидрограф стока.

анализе измерений стока на вложенных бассейнах [4]. Доля дождевых вод не демонстрирует зависимости от величины расхода в ручье (см. рис. 5). Средняя доля почвенной органической компоненты в стоке устьевых постов руч. Медвежий и руч. Еловый составила соответственно 18 и 24%, в то время как у Плотины незначительна – 9%. Наблюдаются тесные прямые связи этой компоненты стока с величиной расхода: для руч. Еловый и Медвежий в устьевых постах R^2 равен соответственно 0.74 и 0.76, а для руч. Еловый у Плотины – $R^2 = 0.42$ (см. рис. 5). Средняя доля почвенной минеральной компоненты в стоке руч. Еловый у Плотины максимальна – 38%, а у поста Устье она падает до 11%. Для руч. Медвежий эта компонента вообще не выявляется. Такая тенденция вполне коррелирует со снижением вклада площади указанных

бассейнов, занятой ландшафтами пояса пихтово-еловых лесов. Связи доли почвенной минеральной компоненты с расходом ручья неустойчивы даже по знаку тенденции – возрастающей либо убывающей (см. рис. 5). Моделирование компонент стока по учащенным измерениям для отдельных паводковых событий (рис. 6) позволяет детально анализировать динамику каждой из них и характер их взаимодействия. Общей закономерностью для базисного стока является его явное преобладание в длительные межпаводочные периоды, в начале паводка доли остальных компонент сравнимы с точностью их оценки. По мере нарастания паводка наблюдается снижение доли базисного стока с резким “провалом” минимумов, совпадающих с пиками значительных паводков. Для руч. Еловый эти “провалы” фиксируются практически до нулевых

значений. На руч. Медвежий во время экстремального паводка летом 2016 г. при измеренном максимальном модуле стока $430 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ также доля базисного стока равна нулю.

Органическая компонента речного стока имеет положительный отклик на выпадающие осадки. Максимум ее доли, как правило, совпадает с пиком паводка либо близок к нему. Почвенная минеральная компонента, существование которой очевидно связано с верхней частью водосбора руч. Еловый, во время дождя у поста Плотина резко возрастает, ее максимальная доля приходится на пик паводка, а в Устье, наоборот, отмечается ее плавное снижение до нулевых значений по мере нарастания паводка (см. рис. 6). Такая разнонаправленность динамики обусловлена как “смешанным” характером данных в замыкающих створах ландшафтно-неоднородных бассейнов, так и пониженной точностью оценок разделения почвенного питания на две компоненты. Динамика дождевой компоненты стока соответствует характеру выпадения дождей, с учетом небольшой ее доли и погрешностей оценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья представляет собой обобщение результатов, по-видимому, первого в России систематического изучения стокоформирования путем разделения гидрографа стока по источникам питания на основе детальных гидролого-гидрохимических съемок и применения трансерной модели смещения совместно с ЕММА. Выполненные в период с 2011 по 2016 гг. исследования позволили рассчитать компоненты речного стока летне-осеннего периода ряда типичных малых водосборов в верховьях р. Усури и оценить их взаимную динамику в различных масштабах времени. Показано, что в случае ландшафтной однородности водосбора (руч. Медвежий) речной сток может быть представлен как результат смешения трех источников. Такая, наиболее общепринятая, схема разделения гидрографа включает в качестве источников прямой дождевой сток, приповерхностную почвенную органическую компоненту и глубокий базисный сток.

В случае ландшафтной неоднородности водосбора (руч. Еловый), размерность модели смешения возрастает, и речные воды могут быть представлены как результат смешения четырех источников. В данном случае такой источник появляется в результате разделения почвенного питания на самостоятельные составляющие — почвенную органическую и почвенную минеральную. Наличие последней обусловлено распространением в бассейне ландшафтов холодного верхнего пояса пихтово-еловых лесов,

почвы которых отличаются более низкой скоростью деструкции органического вещества и более глубоким иллювированием РОУ. Показано, что доли почвенной минеральной компоненты в стоке снижаются с уменьшением вклада площади соответствующего ландшафта на водосборе. Количественный анализ взаимосвязи ландшафтной структуры бассейна с числом источников питания стока является одним из наиболее ценных результатов.

Важным результатом являются выявленные закономерности во взаимной динамике источников питания. Наблюдается явное преобладание базисной компоненты в периоды низкого стока, в то время как в паводок при росте расхода ее доля снижается с “провалом” до нуля на пиках высоких паводков. При этом доля органической составляющей стока растет и достигает максимума на пиках паводков. Динамика почвенной минеральной компоненты стока, связанной с поясом елово-пихтовых лесов, неустойчива и требует углубленного анализа на основе дополнительных данных. Дождевая компонента стока практически не связана с расходом, определяется только характером выпадения дождей.

Данные о динамике источников питания дают возможности принципиального совершенствования методов валидации и тестирования стоковых моделей. В то же время систематизация зависимостей долей источников от суммарного расхода, качество которых во многих случаях позволяет применять их как расчетные, открывает перспективы совершенствования гидрологического мониторинга и прогнозирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 17-77-30006) и РФФИ (проекты № 19-0500326, 17-05-00217).

FUNDING

The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 17-77-30006) and by the grants received from the RFBR (no. 19-0500326, 17-05-00217).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия, функционирование и динамика горных геосистем Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2005. 247 с.
2. Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Кожевникова Н.К. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационар-

- ные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101.
3. Воронков П.П. Закономерности процесса формирования и зональность химического состава вод местного стока // Тр. ГГИ. 1963. Вып. 102. С. 43–119.
 4. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водн. ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 776–775.
 5. 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) // Водн. ресурсы. 2016. Т. 43. № 4. С. 629–640.
 6. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Солопов Н.В. Модель смешения 4-х источников питания речного стока с использованием гидрохимических трассеров в задаче разделения гидрографа // Водн. ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 827–838.
 7. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 215–222.
 8. Кондратьев И.И. Трансграничный фактор в изменчивости химического состава осадков на юге Дальнего Востока // География и природ. ресурсы. 2009. № 3. С. 236–241.
 9. Луценко Т.Н., Шамов В.В. и др. Пространственно-временная динамика растворенного органического углерода в водотоках системы верховьев р. Уссури (юг Дальнего Востока России) / Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Тр. VI Всерос. симпоз. с международ. участием. 2017. С. 155–160.
 10. Ali G.A., Roy A.G., Turmel M.C., Courchesne F. Source-to-stream connectivity assessment through end-member mixing analysis // J. Hydrol. 2010. V. 3–4. № 392. P. 119–135.
 11. Barthold F.K., Turner B.L., Elsenbeer H., Zimmermann A. A hydrochemical approach to quantify the role of return flow in a surface flow-dominated catchment // Hydrol. Proc. 2017. V. 31. № 5. P. 1018–1033.
 12. Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Voght R.D. Modelling stream water chemistry of soil-water end-members – a step towards second-generation acidification models // J. Hydrol. 1990. V. 116. № 1–4. P. 307–320.
 13. Correa A., Windhorst D., Tetzlaff D., Crespo P., Céleri R., Feyen J., Breuer L. Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Paramo // Water Resour. Res. 2017. V. 53. № 7. P. 5998–6017.
 14. Christophersen N., Hopper R.P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem // Water Resour. Res. 1992. V. 28. № 1. P. 99–107.
 15. Hooper R.P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry // Water Resour. Res. 2003. V. 39. № 3. doi:10.1029/2002WR001528
 16. Iwasaki K., Katsuyama M., Tani M. Contributions of bedrock groundwater to the upscaling of storm-runoff generation processes in weathered granitic headwater catchments // Hydrol. Proc. 2015. V. 29. № 6. P. 1535–1548.
 17. James A.L., Roulet N.T. Investigating the applicability of end-member mixing analysis (EMMA) across scale: A study of eight small, nested catchments in a temperate forested watershed // Water Resour. Res. 2006. V. 42. № 8. doi:10.1029/2005WR004419
 18. Katsuyama M., Ohte N., Kobashi S. A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment // Hydrol. Proc. 2001. V. 15. № 2. P. 249–260.
 19. Leibundgut C., Maloszewski P., Külls C. Tracers in Hydrology / Chichester: Wiley, 2009. 432 p.

REFERENCES

1. Arzhanova V.S., Yelpatyevsky P.V. *Geokhimiya, funkcionirovanie i dinamika gornykh geosistem Sikhote-Alinya* [Geochemistry, Functioning and Dynamics of the Sikhote-Alin Mountain Geosystems]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2005. 247 p.
2. Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K. Main ions in water of different genetic types in a small river basin: case experimental studies in Central Sikhote-Alin. *Tikhookean. Geol.*, 2014, vol. 33, no. 2, pp. 90–101. (In Russ.).
3. Voronkov P.P. Regularities in the formation process and zonation of water chemistry in local runoff. *Tr. Gl. Geofiz. Obs. im. A.I. Voeikova*, 1963, no. 102, pp. 43–119. (In Russ.).
4. Gartsman B.I., Shamov V.V. Field studies of runoff formation in the Far East Region based on modern observational instruments. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 766–775.
5. Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. *Water Resour.*, 2016, vol. 43, no. 4, pp. 629–640.
6. Gubareva T.S., Gartsman B.I., Solopov V.N. A model of mixing of four river runoff recharge sources using hydrochemical tracers in the problem of hydrograph separation. *Water Resour.*, 2018, vol. 45, no. 6, pp. 827–838.
7. Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K. Genetic disintegration of the runoff hydrograph. *Russ. Meteorol. Gydrol.*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 215–222.
8. Kondratiev I.I. The trans-boundary factor in chemical composition variability of atmospheric precipitation in the southern Far East. *Geogr. Nat. Resour.*, 2009, vol. 30, no. 3, pp. 236–241.
9. Lutsenko T.N., Shamov V.V., Gartsman B.I., Gubareva T.S., Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Lupakov S.Yu. Spacio-temporal dynamics of dissolved organic carbon in the streams of system of the upper Ussuri river (south of the Far East of Russia). In *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vo-doemakh i morskikh vodakh Pochvy v biosfere* [Organic Matter and Biogenic Elements in Inland and Seawater]. Barnaul: Inst. Vodn. Ekol. Probl. Sib. Otd. Akad. Nauk, 2017, pp. 155–160. (In Russ.).

10. Ali G.A., Roy A.G., Turmel M.C., Courchesne F. Source-to-stream connectivity assessment through end-member mixing analysis. *J. Hydrol.*, 2010, vol. 3–4, no. 392, pp. 119–135.
11. Barthold F.K., Turner B.L., Elsenbeer H., Zimmermann A. A hydrochemical approach to quantify the role of return flow in a surface flow-dominated catchment. *Hydrol. Process.*, 2017, vol. 31, no. 5, pp. 1018–1033.
12. Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Vogt R.D., Andersen S. Modelling stream water chemistry of soil-water end-members – a step towards second-generation acidification models. *J. Hydrol.*, 1990, vol. 116, no. 1–4, pp. 307–320.
13. Correa A., Windhorst D., Tetzlaff D., Crespo P., Céleri R., Feyen J., Breuer L. Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Paramo. *Water Resour. Res.*, 2017, vol. 53, no. 7, pp. 5998–6017.
14. Christophersen N., Hopper R.P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem. *Water Resour. Res.*, 1992, vol. 28, no. 1, pp. 99–107.
15. Hooper R.P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resour. Res.*, 2003, vol. 39, no. 3. doi 10.1029/2002WR001528
16. Iwasaki K., Katsuyama M., Tani M. Contributions of bedrock groundwater to the upscaling of storm-runoff generation processes in weathered granitic headwater catchments. *Hydrol. Process.*, 2015, vol. 29, no. 6, pp. 1535–1548.
17. James A.L., Roulet N.T. Investigating the applicability of end-member mixing analysis (EMMA) across scale: A study of eight small, nested catchments in a temperate forested watershed. *Water Resour. Res.*, 2006, vol. 42, no. 8. doi 10.1029/2005WR004419
18. Katsuyama M., Ohte N., Kobashi S. A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment. *Hydrol. Process.*, 2001, vol. 15, no. 2, pp. 249–260.
19. Leibundgut C., Maloszewski P., Külls C. *Tracers in Hydrology*. Chichester: Wiley, 2009. 432 p.

Runoff Components of Small Catchments in Sikhote-Alin: Summarizing the Results of Field Measurements and Tracer Modeling

T. S. Gubareva^{1, 2; *}, B. I. Gartsman², V. V. Shamov², T. N. Lutsenko²,
A. G. Boldeskul², N. K. Kozhevnikova³, and S. Yu. Lupakov²

¹ *Water problems institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

³ *FSC of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

*e-mail: tgubareva@bk.ru

Received November 27, 2018; revised January 25, 2019; accepted May 30, 2019

The article summarizes results of the systematic study of the streamflow formation of two small catchments in the upper part of the Ussuri River. The study was carried out by the hydrograph separation technique (using detailed data of the hydrochemical and hydrological monitoring) and the use of a tracer mixing model in conjunction with EMMA. Performed in the period from 2011 to 2016 the studies allowed to calculate the river runoff components of the summer-autumn period at 3 gauge-stations and evaluate their mutual dynamics at different time scales. It is shown that in the case of landscape uniformity of the catchment (the Medvezhiy Creek), the river flow can be represented as a result of 3 sources' mixing. This, the most common, scheme for the hydrograph separation includes following sources: a direct rainfall flow, an organic soil water component, and an underground baseflow. If the catchment's landscape structure is clearly heterogeneous (the Elovoy Creek), the river flow can be represented as a result of 4 sources' mixing. In this case, the fourth source appears as a result of the separation of soil water component into individual components – organic and mineral. This separation is due to the spread in the basin of the cold upper belt of fir-spruce forests, whose soils are characterized by a lower rate of organic matter destruction and a deeper illuviation process of DOC. Statistically significant dependencies of the some runoff components' proportions against river discharges were identified, systematization of which makes them promising for practice in hydrological monitoring and forecasting.

Keywords: catchment, water sources, chemical tracers, mixing model, EMMA, hydrograph separation.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140>