

ПРОБЛЕМЫ ВОД СУШИ

УДК 553.46

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОДОСБОРАХ В ВЕРХОВЬЯХ Р. УССУРИ

© 2023 г. Б. И. Ёрцман^{1,2,*}, В. В. Шамов², Т. С. Губарева^{1,2}, С. Ю. Лупаков², А. Н. Бугаец²,
Н. К. Кожевникова³, А. Г. Болдескул², Т. Н. Луценко², Н. Ф. Пшеничникова², Л. В. Гончуков^{4,2}

Представлено академиком РАН П. Я. Баклановым 24.04.2023 г.

Поступило 24.04.2023 г.

После доработки 25.04.2023 г.

Принято к публикации 25.04.2023 г.

Приведены результаты многолетних натурных исследований на малых горных водосборах в верховьях р. Уссури, Приморский край. С помощью современных средств наблюдений получен уникальный массив информации, эффективно отражающий комплекс сложных процессов формирования стока на малых горных реках. Средства геохимического и имитационного гидрологического моделирования были совместно использованы для описания гидрологического режима водосборов, выполнена оценка генетических составляющих речного стока, что позволило детально исследовать процессы и условия его формирования и определить факторы, влияющие на точность моделирования стока.

Ключевые слова: натурные наблюдения, экспериментальные водосборы, гидрологический режим, водный баланс, моделирование

DOI: 10.31857/S2686739723600777, **EDN:** WGOQLX

ВВЕДЕНИЕ

Формирование стока — сложный комплекс процессов приповерхностного влагооборота, каждый из которых даже в пределах небольших участков суши отличается чрезвычайной пространственно-временной неоднородностью. Часть компонентов водного баланса (атмосферные осадки, расходы воды и компоненты испарения), их динамика и пространственное распределение может с той или иной степенью точности непосредственно измеряться. Остальные компоненты могут быть определены только косвенно, что, в конечном счете, и является одной из фундаментальных проблем гидрологии суши [1].

¹Институт водных проблем,

Российская академия наук, Москва, Россия

²Тихоокеанский институт географии,

Дальневосточное отделение, Российская Академия наук,
Владивосток, Россия

³Федеральный научный центр биоразнообразия наземной
биоты Восточной Азии, Дальневосточное отделение,
Российская академия наук, Владивосток, Россия

⁴Дальневосточный региональный гидрометеорологический
институт, Владивосток, Россия

*E-mail: gartsman@inbox.ru

К настоящему времени разработаны методические основы воднобалансовых расчетов и оценок стока, достигнуто определенное понимание процессов приповерхностного влагооборота, которое реализовано в виде множества расчетных моделей — с сосредоточенными и распределенными параметрами, достаточно простых и весьма сложных. Однако, в целом, гидрологи не располагают надежными способами параметризации существующих расчетных схем, позволяющими с достаточной точностью описать движение водных масс в конкретном речном бассейне. Трудность решения этой задачи заключается в отсутствии или крайней ограниченности необходимых данных [2]. Не менее сложная проблема — соотношение точечных измерений с пространственным масштабом исследуемых объектов [1], для решения которой в гидрологии обычно используются геоморфологические данные и/или принципы ландшафтного подобия.

Данная работа представляет собой обобщение 10-летнего опыта междисциплинарного исследования условий и процессов формирования стока в экспериментальных бассейнах верховьев р. Уссури, Приморский край, РФ. На малых водосборах в теплое время года был организован мониторинг гидрологических, гидрохимических, метеорологических, почвенно-растительных характеристик с

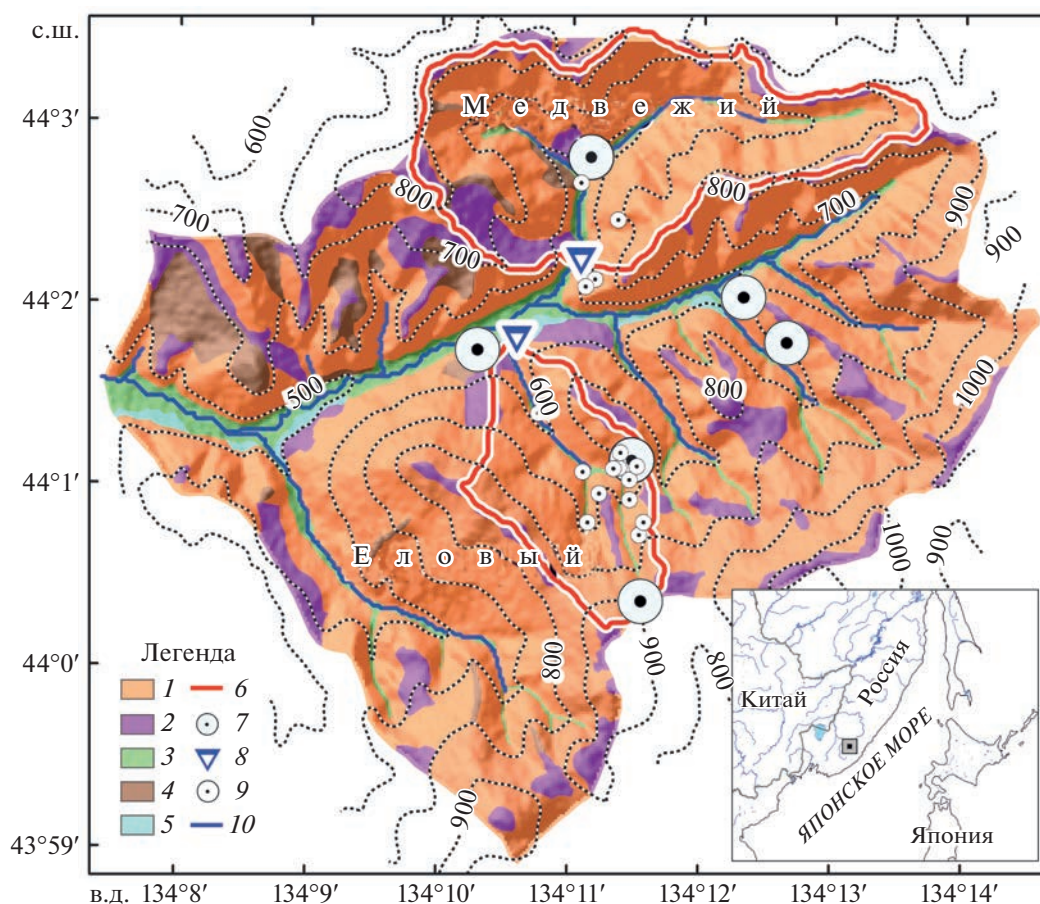


Рис. 1. Картограмма ВУС, почвы: 1 – горные буротаежные иллювиально-гумусовые неоподзоленные и оподзоленные, 2 – горнолесные бурые слаборазвитые, 3 – остаточные-пойменные и торфянисто-перегнойно-глеевые, 4 – горнолесные бурые глеевые, 5 – бурые лесные на аллювиальных отложениях; 6 – граница водосбора, 7 – осадкомер/метеостанция, 8 – замыкающий створ, 9 – тензиолизиметр, 10 – речная сеть.

учетом требований к исходным данным, использованным авторами в ряде современных физико-математических моделей формирования стока и в геохимических моделях смешения. Выполнен анализ устойчивости параметров моделей при расчетах стока, даны оценки влияния количества данных, ошибок в данных наблюдений и неопределенности структуры модели на динамику стока и его основных генетических компонентов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными объектами исследований являются два водосбора – Медвежий (площадь 7.6 км²) и Еловый (3.5 км²), расположенные в пределах Верхнеуссурийского стационара ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН (44°02' с.ш., 134°11' в.д.) (рис. 1). Район исследований – типичный низкогорный участок южной дальневосточной тайги [3, 4]. Средняя высота рельефа 500–700 м, максимальная ~1100 м. Бассейн руч. Медвежьего подстилается горными породами юрского возраста,

бассейн руч. Елового – позднемелового. Климат района – муссонный с избыточным увлажнением в теплый период года, суточные суммы дождя могут превышать 100 мм. Суточные максимумы слоя стока иногда достигают 30–40 мм (соответствующие модули стока – 300–500 л/(с км²)).

Для параметризации физически обоснованных гидрологических моделей была создана почвенная карта исследуемой территории. Результаты выполненных ранее почвенных съемок использованы для создания базы данных почвенно-гидрофизических характеристик [3, 4]. В качестве методической основы моделирования компонентов водного баланса были использованы гидрологические модели с упрощенным описанием гидрологического цикла (FCM, HBV) и развитые пространственно-распределенные (ECOMAG, SWAT) [4–9]. Для адаптации геохимической модели смешения природных вод использовались процедура ЕММА и метод главных компонент [10].

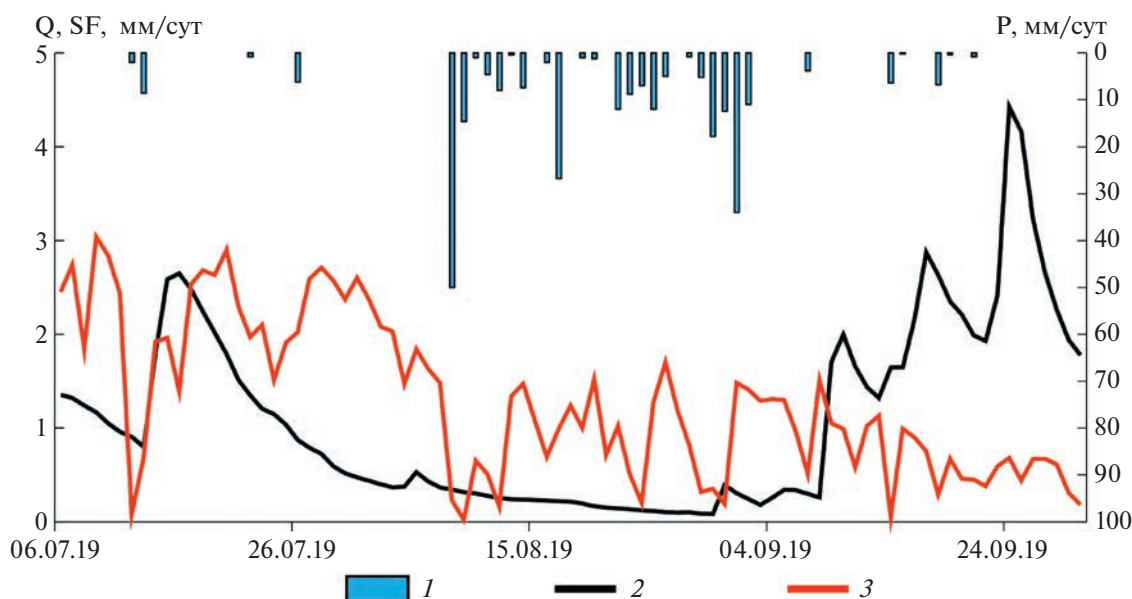


Рис. 2. Динамика измеренных: 1 – осадков (P), 2 – стока (Q), 3 – стволового сокодвижения (SF) в масштабе малого водосбора [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА

Анализ гидрометрических данных с временным разрешением 10–15 мин показал, что на водотоках I–III порядка уровень воды в периоды отсутствия осадков подвержен суточным циклическим колебаниям с минимумом днем и максимумом ночью; амплитуда колебаний составляет порядка 5–10 мм при средней глубине потоков 10–20 см [11]. Внутрисуточные изменения уровня воды коррелируют с данными измерений стволового сокодвижения [12]. Интенсивность транспирации деревьев контролируется освещенностью, температурой и влажностью воздуха. Инерционность процесса стволового сокодвижения по отношению к метеорологическим процессам составляет 1–2 ч. Объем транспирации одного взрослого дерева за сутки составляет 100 л и более [12], что в масштабе водосбора составляет ~2–3 мм (рис. 2). В периоды умеренного и слабого увлажнения эвапотранспирация является доминирующим гидрологическим процессом, объемы суммарного испарения могут в 5–6 раз превышать объем стока [7, 11].

На выпадение дождя дренажная сеть водосбора реагирует по-разному, в зависимости от начальных условий увлажнения, а также интенсивности и длительности дождя [11]. В период межени более 90% речного стока формируется за счет верхних частей бассейна, нижняя часть при этом практически не участвует в формировании руслового стока, потери стока на инфильтрацию в русловые отложения составляют ~20%. При средних условиях начального увлажнения за время до 2 ч формируется первый остроконечный пик павод-

ка, а второй, более сглаженный, склоновая дренажная система генерирует в течение 0.5–2 сут от начала дождя.

Выпадение ливневых осадков приводит к резкому увеличению расходов воды. Быстрая реакция водосбора на осадки связана с преобладанием почв с высоким (до 90%) содержанием грубообломочного материала, в которых формируется система склоновых подповерхностных дрен [14]. Найденные в склоновых потоках особи уссурийского безлегочного тритона (*Onychodactylus fischeri*) указывают на устойчивое обводнение дрен [14]. Характер движения воды в дренах варьирует от фильтрационного (скорость течения 0.002–0.200 см/с) до турбулентного (10 см/с и более). Расходы воды в дренах изменяются в диапазоне от сотых долей до нескольких л/с (в среднем 0.25–6.6 л/с). Во время выдающихся ливневых осадков модули стока в дренах достигают 700 л/(с км²).

Анализ ионного состава вод показал [11], что можно выделить минимум 8 генетических их типов, циркулирующих в бассейнах: циклонические и внутримассовые дождевые; подкroновые; склоновые (почвенные); грунтовые; речные межженного стока, низких и средних паводков. Дождевые воды преимущественно кислые (средний pH = 4.9) и ультрапресные (минерализация – 1–15 мг/л, в среднем – 5.0 мг/л) [13]. Концентрации ионов в атмосферных водах сильно варьируют, их максимальные значения в отдельных случаях могут в 5–10 раз превышать средние величины. Химический состав речных вод существенно изменяется после выпадения осадков благодаря их взаимодействию с почвенно-растительным по-

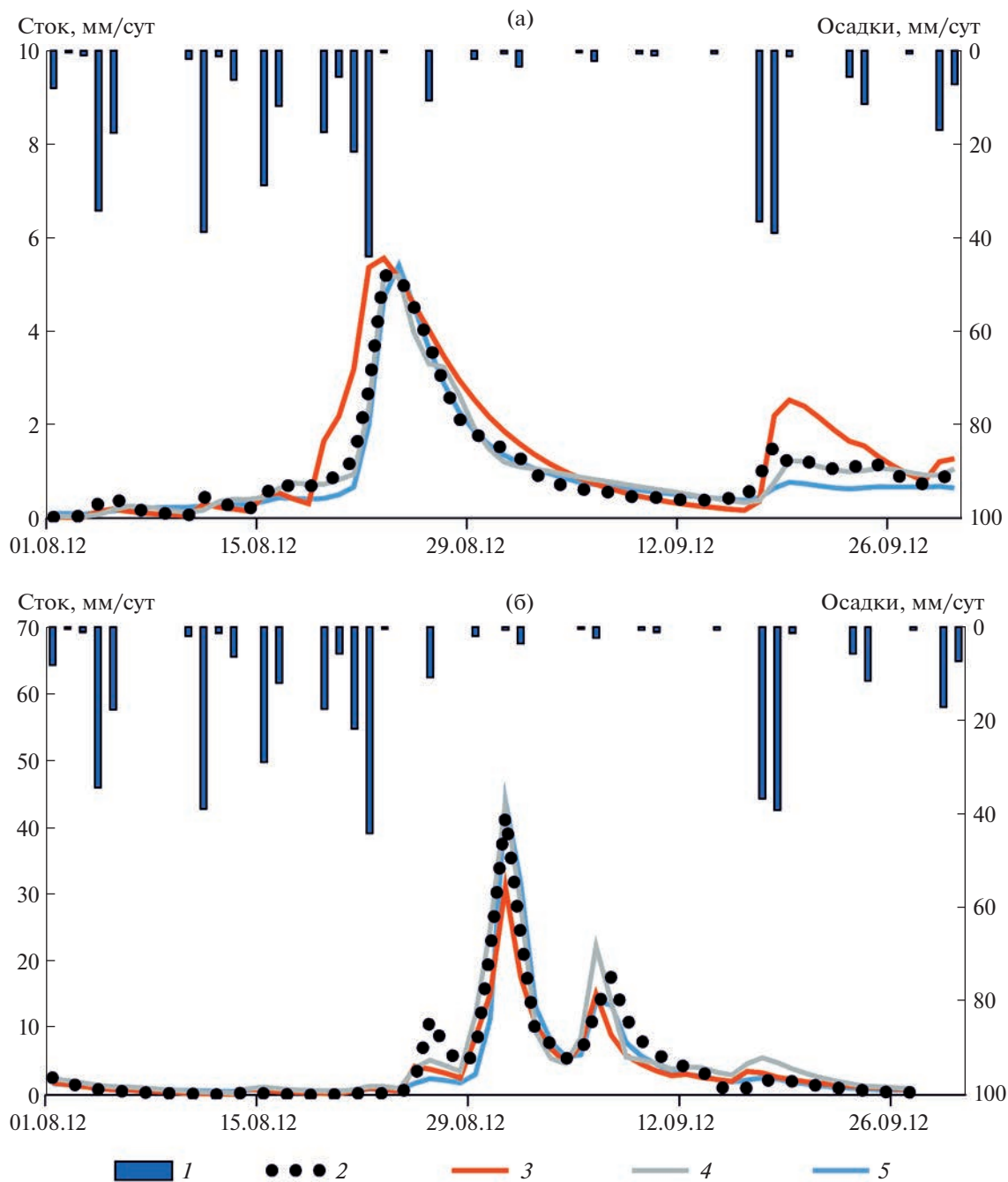


Рис. 3. Примеры динамики стока, рассчитанного по моделям 3 – SWAT, 4 – HBV, 5 – FCM, измеренных атмосферных осадков (1) и стока (2) в периоды высокой водности для руч. Еловый (а) и руч. Медвежий (б).

кровом и подстилающими породами [14], при этом состав и минерализация воды соседних ручьев значительно отличаются даже на уровне класса воды по преобладающим ионам.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты гидрологического моделирования показали, что соседние водосборы существенно

отличаются по характеру формирования стока, что выражено в различии значений параметров, отвечающих за грунтовое питание, интенсивность инфильтрации и испарения воды [3, 5, 6, 8]. Этот вывод подтверждается сравнением результатов гидрологического и геохимического моделирования [4]. Значения параметров модели эффективны, только при условии, что период калибровки включает все фазы водности. Перенос

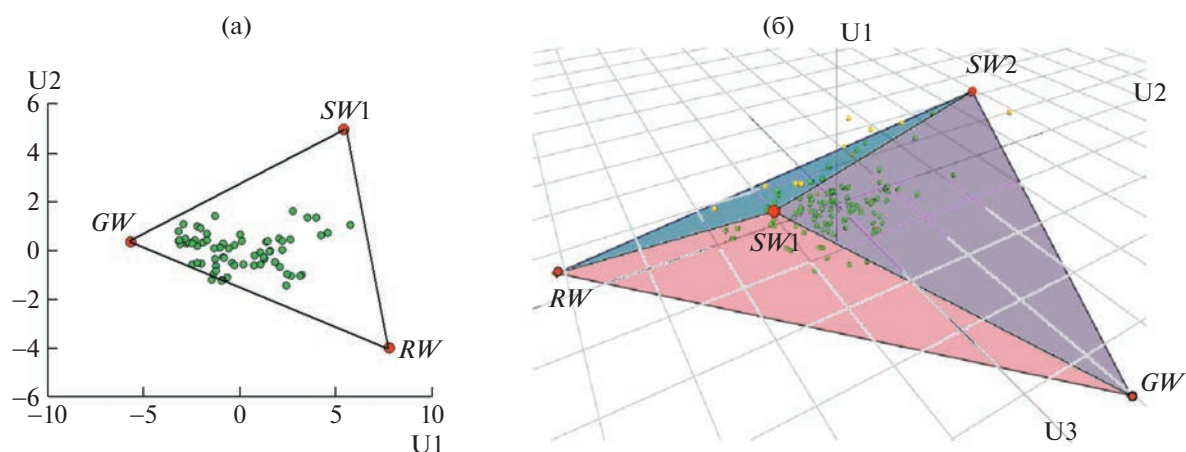


Рис. 4. Диаграммы смешения: а — руч. Медвежий, б — руч. Еловый. RW — дождевые воды (поверхностный сток), GW — грунтовый сток, SW1 и SW2 — почвенные компоненты стока, U — пространство смешения, каждая зеленая точка — проба речной воды.

значений параметров между соседними водосборами практически во всех случаях приводит к неудовлетворительным результатам [8]. Основные источники неопределенностей, влияющие на точность расчетов компонентов водного баланса: ошибки расчета потенциальной эвапотранспирации [7], упрощенный характер расчета действительного испарения [5, 6], структура гидрологической модели [5], а также наличие локальных особенностей влагообмена в почвенном покрове, не учитываемых в моделях [4]. В меженные периоды абсолютная ошибка значений речного стока невысокая (в пределах долей мм слоя), при этом относительная может достигать десятков процентов [3, 5, 6, 8].

Разница в количестве осадков, расположенных в пунктах на расстоянии друг от друга 30–35 км, может достигать 100 мм/сут [5], поэтому точность моделирования паводков (рис. 3), прежде всего, зависит от репрезентативности осадкомерной сети. Данные измерений осадкомеров (от 2 до 6 пунктов), расположенных на площади около 20–30 км², позволили получить высокие оценки качества моделирования практически всех паводков [3–6, 8]. Кроме того, эффективность моделирования зависит от точности определения момента начала формирования поверхностного стока, связанная с корректной оценкой предшествующего увлажнения водосбора [4–6, 9]. Использование полученных ранее региональных зависимостей для параметризации блоков формирования стока позволяет точнее рассчитать характеристики предпаводкового состояния водосбора [5, 9].

Оценки генетических компонент речного стока, полученные с использованием трассерной модели смешения и процедуры ЕММА, показали, что в условиях ландшафтной неоднородности водосбора размерность модели смешения возраста-

ет за счет более сложной структуры почвенной составляющей стока (рис. 4), в которой выделяются два самостоятельных источника питания: воды приповерхностного органогенного и склонового минерального горизонтов [10, 17]. Количество почвенных источников в общем случае зависит от увлажнения и ландшафтных особенностей водосбора [16, 18], тогда как источники дождевого поверхностного и грунтового стока остаются постоянными в любых условиях.

Оценки долей источников питания (поверхностный, почвенный и грунтовый), полученные на основе используемых моделей, существенно отличаются [4, 5] в зависимости от принятой концептуализации гидрологических процессов в моделях. Это порождает проблему уточнения определений генетических компонент стока. В целом опыт показал, что гидрологические модели, включающие более полное физическое описание движения воды в почве, лучше соответствуют результатам расчленения гидрографа с помощью геохимического анализа, подкрепленного процедурами верификации расчетов [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время модельный подход в гидрологии является основным инструментом изучения гидрологических процессов, а данные специальных наблюдений на экспериментальных водосборах — единственным источником репрезентативных данных, необходимых для проверки гипотез и верификации моделей формирования стока. Сочетание концептуально различных моделей и данных специального гидролого-геохимического мониторинга на типичных малых водосборах позволило на новом уровне детализации исследовать процессы формирования стока, а также

определить основные факторы, влияющие на точность моделирования стока и водного баланса в целом. Полученные результаты свидетельствуют о сильной пространственной неоднородности условий формирования стока даже на малых водосборах, расположенных на расстоянии 2–5 км друг от друга. Перспективы продолжения данных исследований связаны, прежде всего, с распространением полученного опыта на бассейны других ландшафтных зон, включение в практику натурных наблюдений новых приборов и методик измерения специальных параметров (в том числе относящиеся к блоку испарения), а также переход к воднобалансовым расчетам и моделям с часовым шагом по времени.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001, государственная регистрация № 122041100222-7) и ТИГ ДВО РАН (№ 122020900184-5 и 122011400135-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blöschl G., Bierkens M.F.P., Chambel A., et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective // *Hydrological Sciences Journal*. 2019. V. 64. № 10. P. 1141–1158. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>
2. Blume T., van Meerveld I., Weiler M. The role of experimental work in hydrological science – insights from a community survey // *Hydrological Sciences Journal*. 2016. V. 62. № 3. P. 334–337. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1230675>
3. Бугаец А.Н., Пишеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Луников С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Гончук Л.В., Голодная О.М., Краснопеев С.М., Кожевникова Н.К. Цифровое почвенное картографирование для целей гидрологического моделирования на примере экспериментальных водосборов (юг Приморского края) // *Почвоведение*. 2021. Т. 55. № 9. С. 1085–1096.
4. Bugaets A., Gartsman B., Gubareva T., Lupakov S., Kalugin A., Shamov V., Gonchukov L. Comparing the runoff decompositions of small experimental catchments: end-member mixing analysis (EMMA) vs. Hydrological modelling // *Water*. 2023. V. 15. P. 752–774.
5. Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A. Modeling the hydrological regime of small test-bed catchments based on field observations: a case study of The Pravaya Sokolovka River, The Upper Ussuri River Basin // *Water Resources*. 2019. V. 46. № S2. P. S8–S16.
6. Луников С.Ю., Бугаец А.Н., Шамов В.В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // *Водные ресурсы*. 2021. Т. 48. № 4. С. 417–426.
7. Луников С.Ю., Губарева Т.С., Шамов В.В., Рубцов А.В., Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Омелько А.М. Возможности использования данных о стволовом сокодвижении в гидрологическом моделировании // *Тихоокеанская география*. 2021. № 2 (6). С. 54–64.
8. Луников С.Ю., Бугаец А.Н., Шамов В.В. Оценка параметров гидрологической модели HBV по данным полевых наблюдений на экспериментальных водосборах (юг Приморского края) // *География и природные ресурсы*. 2022. Т. 43. № 3. С. 158–166.
9. Гарцман Б.И., Луников С.Ю. Влияние изменений климата на максимальный сток в бассейне Амура: оценка на основе динамико-стохастического моделирования // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44. № 5. С. 532–542.
10. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Луников С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // *Известия РАН. Серия Географическая*. 2019. № 6. С. 126–140.
11. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599.
12. Губарева Т.С., Луников С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Рубцов А.В., Кожевникова Н.К. Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвижения: постановка задачи // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2019. Т. 1. № 4. С. 504–532.
13. Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Луников С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132.
14. Шамов В.В., Шекман Е.А., Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Луников С.Ю., Челноков Г.А., Кожевникова Н.К., Бурдуковский М.Л., Орляковский А.В. Характеристики и условия формирования предпочтительных водопроводящих путей на склонах долин малых горных рек // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2021. Т. 3. № 3. С. 275–296.
15. Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Губарева Т.С., Луников С.Ю., Шамов В.В. Формирование кислотности дождевых вод в залесенном бассейне Сихотэ-Алинской горной области // *Геохимия*. 2022. Т. 67. № 12. С. 1297–1311.
16. 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) // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 43. № 4. С. 629–640.
17. 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 // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. № 6. С. 827–838.
18. 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.

RUNOFF FORMATION SETTINGS: MULTIFACETED RESEARCH IN TESTBED CATCHMENTS (THE USSURI R. HEADWATERS)

**B. I. Gartsman^{a,b,#}, V. V. Shamov^b, T. S. Gubareva^{a,b}, S. Yu. Lupakov^b, N. K. Kozhevnikova^c,
A. N. Bugaets^b, A. G. Bodeskul^b, T. N. Lutsenko^b, N. F. Pshenichnikova^b, and L. V. Gonchukov^{d,b}**

^a*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^c*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^d*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russian Federation*

[#]*E-mail: gartsman@inbox.ru*

Presented by Academician of the RAS P.Ya. Baklanov April 24, 2023

The results of long-term field studies on small watersheds in the upper reaches of the Ussuri River (Primorsky Krai, Russia) are presented. In virtue of modern observation means, a unique dataset was obtained to effectively reflect the complicated processes of runoff formation in small low-mountain river basins. The tools of geochemical and hydrological modeling were jointly used to describe the watersheds' behavior, and an assessment of the genetic components of the river flow was carried out, that made it possible to deeper research the processes and settings of runoff formation, and to evaluate the factors determining the accuracy of runoff modeling.

Keywords: field observations, experimental catchments, hydrological regime, water balance, modeling