

УДК 551.579

## ЦИФРОВОЕ ПОЧВЕННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОДОСБОРОВ (ЮГ ПРИМОРСКОГО КРАЯ)

© 2021 г. А. Н. Бугаец<sup>a, b, \*</sup>, Н. Ф. Пшеничникова<sup>a</sup>, А. А. Терешкина<sup>a</sup>, С. Ю. Лупаков<sup>a, b</sup>,  
Б. И. Гарцман<sup>a, b</sup>, В. В. Шамов<sup>a</sup>, Л. В. Гончуков<sup>a, c, e</sup>, О. М. Голодная<sup>d</sup>,  
С. М. Краснопеев<sup>a</sup>, Н. К. Кожевникова<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения РАН,  
ул. Радио, 7, Владивосток, 690041 Россия

<sup>b</sup>Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, Москва, 117971 Россия

<sup>c</sup>Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,  
ул. Фонтанная, 24, Владивосток, 690091 Россия

<sup>d</sup>Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения РАН,  
пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

<sup>e</sup>Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,  
ул. Мордовцева, 3, Владивосток, 690091 Россия

\*e-mail: andreybugaets@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2020 г.

После доработки 19.05.2020 г.

Принята к публикации 24.10.2020 г.

Для бассейна р. Правая Соколовка (южная часть хребта Сихотэ-Алиня, Приморский край) создана цифровая почвенная карта масштаба 1 : 50000. Основными единицами легенды являются почвенные подтипы. Сделана попытка адаптировать региональную номенклатуру почв к современной почвенной классификации России и провести корреляцию с номенклатурой почв Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB). Описание каждого ареала включает сведения по условиям формирования почв на уровне подтипа. Показано, что в почвенно-растительном покрове четко выражена вертикальная зональность. В качестве объектов моделирования выбраны 3 малых водосбора с площадью 3.5–7.6 км<sup>2</sup>. Для моделирования динамики компонентов водного баланса использована гидрологическая модель с открытым кодом SWAT. Для калибровки модели использованы данные литературных источников, стационарных исследований и наблюдательной сети Росгидромета. Для оценки результатов моделирования использованы общепринятые в гидрологии критерии. Модель хорошо воспроизводит гидрографы стока средних и многоводных лет, на 10–20% занижает пиковые значения расходов воды паводков, вызванных интенсивными осадками. Приводятся полученные в результате калибровки значения параметров модели и гидрологических характеристик почв, расчетные данные динамики элементов водного баланса.

**Ключевые слова:** почвенная карта, малые водосборы, моделирование стока, водный баланс, SWAT

**DOI:** 10.31857/S0032180X21050051

### ВВЕДЕНИЕ

Цифровая почвенная картография является основой для решения широкого круга задач ряда смежных областей науки, имеющих общую информационную базу. Развитие этого подхода связано с решением крайне актуальной проблемы создания единой цифровой топографической основы и унификации используемых материалов. Существующие почвенные карты и информация о почвенных характеристиках обычно содержатся в разных источниках, их сбор и подготовка является сложной задачей. Кроме этого, существует

проблема пространственной репрезентативности почвенных данных при проведении исследований в масштабе водосборов [37, 41]. Для повышения информативности почвенных карт применяются современные методики ГИС-анализа и численного моделирования [48, 50, 51]. Опыт создания универсальных глобальных и региональных покрытий, представляющих в количественной форме разнообразные характеристики почв [44, 47], показал высокую эффективность применения подобных разработок при использовании в информационно-моделирующих системах, фактически

составляющих основу современных междисциплинарных исследований [22, 39].

В настоящее время понятийный аппарат гидрологии почв широко применяется в современных гидроэкологических моделях [5, 22, 35, 36]. Разработка и применение моделей, обобщение их параметров по сути является средством формализации знаний и проверки гипотез [33]. В связи с этим перспективны комплексные исследования, проводимые в масштабе водосбора и использующие речные бассейны как фундаментальные геоморфологические элементы [12].

С этой точки зрения оптимальной репрезентативностью обладают небольшие относительно однородные по ландшафтным условиям экспериментальные водосборы. Подобные исследования составляют основу для обобщения и экстраполяции результатов на основе принципа ландшафтного сходства для более крупных речных бассейнов. В то же время следует отметить, что изучение и моделирование гидрологического режима малых водосборов отличается повышенной сложностью, обусловленной слабой инерцией при реакции на внешние воздействия, а также необходимостью детального учета особенностей стокоформирующих факторов [2, 38, 39].

Решение указанных задач особенно актуально для рек юга Дальнего Востока с крайне неустойчивым режимом увлажнения во внутригодовом и многолетнем аспектах, связанным с муссонным характером климата и мощными дождевыми паводками. В представленном исследовании с помощью методов цифровой картографии создана почвенная карта бассейна р. Правая Соколовка масштаба 1 : 50000, проведена корреляция региональной классификации почв с современной классификацией почв России [16] и WRB [20]. Изложен опыт подготовки данных о характеристиках почвенного покрова для калибровки и верификации гидрологической модели с открытым кодом Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2012) для трех экспериментальных водосборов.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является бассейн р. Правая Соколовка в пределах территории Верхнеуссурийского стационара ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (44°02' N, 134°11' E). Правая Соколовка является правым притоком четвертого порядка р. Уссури. Площадь водосбора 45 км<sup>2</sup>, перепад высот находится в диапазоне от 444 до 1108 м (здесь и далее приводятся отметки абсолютных высот). Ширина долины р. Правая Соколовка в нижней части 200–500 м, вверх по течению долина сужается до 40–50 м [26]. В почвенном покрове, согласно почвенно-географическому районированию [13], преоб-

ладают буроземы, относящиеся в Мировой реферативной базе почвенных ресурсов (WRB) к почвенной реферативной группе Cambisol [20]. В интервале высот 500–900 м территория покрыта хвойно-широколиственными лесами; здесь распространены буроземы, сформированные на склоновом делювии и пойменные почвы на аллювиальных отложениях. В поясе 800–1000 м под темнохвойными лесами на элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях вершин и склонов преобладают ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные типичные и оподзоленные (табл. 1).

По природным условиям территория бассейна представляет собой характерный низко-среднегорный участок южного Сихотэ-Алиня. Климат района формируется под влиянием восточноазиатского муссона. Средняя годовая температура воздуха составляет 0.7°C, с максимумом 37–38°C в июле-августе и минимумом минус 43–45°C в январе. Среднегодовое количество осадков 780 мм, из них более 80% приходится на теплый период (апрель–октябрь). Количество осадков может существенно варьировать от года к году, в летне-осенний период отклонения могут достигать 40–170% от сезонной нормы. Суточный максимум осадков обусловлен влиянием тропических циклонов в августе–сентябре и может превышать 100 мм. Дождевые паводки, наблюдаемые в летне-осенний период, вносят основной вклад (в отдельные годы до 90%) в общий годовой объем стока. Высота снежного покрова составляет 52–102 см, максимальная глубина промерзания изменяется в пределах 53–125 см.

В качестве объектов моделирования рассмотрены 3 экспериментальных водосбора, расположенных в бассейне р. Правая Соколовка: Медвежий (7.6 км<sup>2</sup>), Еловый (3.5 км<sup>2</sup>) и Березовый (3.5 км<sup>2</sup>) (рис. 1). Долина ручья Елового слабо выработана, склоны выпуклые, крутые (до 25°), ширина в верховьях 200–250 м, в нижней части – 500–800 м [14]. В истоках ручья отметки основного водораздела около 1000 м. На водоразделах встречаются выходы горных пород на дневную поверхность. Грунтовые воды – преимущественно трещинные [32]. Долина ручья Медвежьего в замыкающем створе ручья широкая, выработанная, склоны крутые, выпуклые, в нижней части водосбора они местами круто обрываются к днищу долины. Отметки водораздельной линии находятся в пределах 700–900 м. Здесь получили распространение породы юрского возраста, которые представлены трещиноватыми песчаниками, алевролитами с обломками и глыбами известняков, кремней, габброидов, а также туфами и лавами основного состава. Подземные воды получают питание за счет инфильтрации атмосферных осадков на склонах и водоразделах и иногда выходят на поверхность в виде родников в понижениях рельефа [31].

**Таблица 1.** Легенда почвенной карты бассейна р. Правая Соколовка

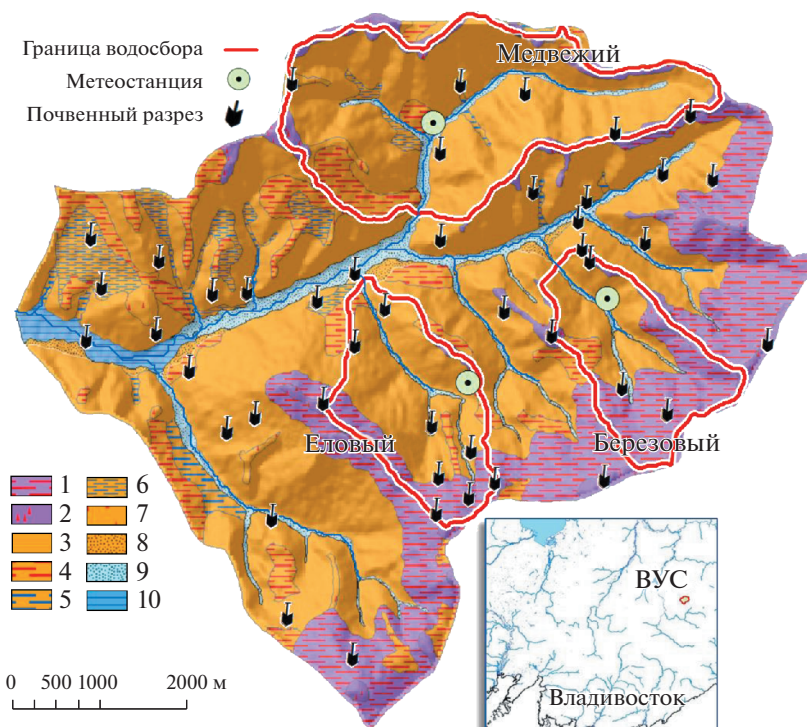
Код почвы	Индекс почвы [16]	Название почвы по региональной классификации [15]	Название почвы по современной классификации почв России [16]	WRB [20]	% общей площади
Пояс горных буро-таежных почв темнохвойных лесов [15]					
Ландшафты быстрого водообмена					
1	Рж <sup>иг</sup> <sub>гр</sub>	Горные буро-таежные иллювиально-гумусовые неоподзоленные и оподзоленные	Ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные типичные и оподзоленные	Dystric Cambisols (Humic) Dystric Cambisols (Humic, Nechic )	17.8
2	Лз <sup>иг</sup> <sub>ср</sub>	Горные буро-таежные иллювиально-гумусовые слаборазвитые	Литоземы серогумусовые иллювиально-гумусированные	Dystric Skeletic Leptosols (Humic)	6.1
Пояс горно-лесных бурых почв хвойно-широколиственных лесов					
Ландшафты быстрого водообмена					
3	Бр	Горно-лесные бурые	Буроземы типичные	Dystric Cambisols	54.1
4	Лз <sup>ср</sup>	Горно-лесные бурые слаборазвитые	Литоземы серогумусовые типичные	Dystric Skeletic Leptosols	1.1
Ландшафты сдержанного водообмена					
5	Бр <sup>оп</sup>	Горно-лесные бурые оподзоленные	Буроземы оподзоленные	Dystric Cambisols (Nechic)	9.2
6	Бр <sup>г</sup>	Горно-лесные бурые глеевые	Буроземы глееватые	Dystric Gleyic Cambisols	1.6
7	Бр <sup>г*</sup>	Горно-лесные бурые поверхностно-глееватые	Буроземы поверхностно-глееватые	Dystric Stagnic Gleyic Cambisols	3.1
Почвы пойменных ландшафтов					
8	Ал <sub>д</sub>	Бурые лесные на аллювиальных отложениях	Буроземы типичные	Dystric Fluvic Cambisols	0.8
9	Ал <sub>д</sub>	Остаточно-пойменные	Аллювиальные серогумусовые (дерновые) типичные	Dystric Fluvisols	5.0
10	Т <sub>э</sub> <sup>п</sup>	Торфянисто-перегнойно-глеевые	Эутрофные перегнойно-торфяные	Dystric Sapric Histosols	1.2

\* Данные подтипы не предусмотрены [16].

Долина ручья Березового узкая и глубокая с фрагментами надпойменной террасы и крутыми (до 30°–35°) выпуклыми склонами, изредка прорезанными относительно глубокими эрозионными ложбинами [19]. Отметки наивысших точек основного водораздела в истоках ручья превышают 1000 м. Бассейн ручья расположен на тектоническом контакте юрских и триасовых отложений. Породы триаса состоят из песчаника, гравелита, конгломератов, алевролитов и кремнистых пород. Верхняя часть бассейна представлена более

молодыми позднемиоценовыми породами. Питание подземных вод происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и выходов вод других горизонтов [31].

Материалами исследования являются данные полевых наблюдений, выполненных в теплые периоды 2011–2019 гг. [10]. Устьевые участки исследуемых ручьев были оборудованы цифровыми уровнемерами Solinst (Канада), временное разрешение измерений – 15 мин. Расход воды измеряли вручную с помощью электромагнитного измери-



**Рис. 1.** Цифровая почвенная карта Верхнеуссурийского стационара (ВУС) с отмывкой рельефа, коды легенды даны в соответствии с табл. 1.

теля скорости потока SEBA (Германия). На основе этих данных построены кривые связи расход — уровень и созданы непрерывные ряды среднесуточных расходов воды. В теплый период года в пределах исследуемых водосборов функционировали 3 автоматические метеостанции Delta-T (Великобритания), фиксирующие ход основных метеопараметров (осадков, температуры, влажности воздуха, солнечной радиации, показателей ветрового режима) с 15-минутным разрешением на высотах: 550 м (ручей Медвежий), 650 м (ручей Березовый) и 670 м (ручей Еловый). Для холодного периода года полевые данные дополнены материалами наблюдений метеостанции Чугуевка (ВМО 31939) Приморского УГМС, данные о солнечной радиации получены из расчетов численной модели атмосферы WRF-ARW [11].

## ПОЧВЕННАЯ КАРТА

Основой для составления цифровой почвенной карты явилось описание почвенного покрова бассейна р. Правая Соколовка, выполненное сотрудниками ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства, Дальневосточного федерального университета [6–8, 17–19, 25–27, 34]. В работе [26] приведена группировка горно-лесных почв бассейна р. Правая Соколовка (на уровнях: тип, под-

тип, род, вид, разновидность), на основании которой составлена почвенная карта Верхнеуссурийского стационара в масштабе 1 : 25000 на бумажном носителе.

Для построения цифровой почвенной карты (рис. 1) применялась методика, изложенная в работах [3, 4, 29, 30]. В качестве топографической основы использована цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 30 м (SRTM30, <http://www.dgadv.com/srtm30/>) и оцифрованная ранее геологическая карта М 1 : 200000 [4]. Для уточнения местоположения почвенных разрезов, характеризующих выделенные почвенные ареалы и их связь с растительностью, использован план лесонасаждений Верхнеуссурийского стационара, составленный сотрудниками ДальНИИЛХ [23].

Основными единицами легенды (табл. 1) являются подтипы. Легенда составлена в соответствии с региональной классификацией Иванова [15] с разделением почв по характеру водообмена. Данный подход наиболее близок к существующим классификациям на основе гидрологических свойств почв, использующихся в известных информационно-моделирующих гидрологических системах [49]. Проведена корреляция региональной классификации почв с современной классификацией почв России [16] и номенклатурой почв Всемирной реферативной базой почвенных ресурсов (WRB) [20]. Каждый почвенный ареал включает данные по

**Таблица 2.** Почвы, элементы рельефа и растительность

Код почвы	Элемент рельефа	Растительность (по [24])
1	Вершины и выположенные поверхности водораздельных территорий, верхние и средние части крутых склонов	Влажные разнотравно-папоротниковые ельники с кедром, березой желтой и липой; влажные папоротниковые ельники с кедром, березой желтой и липой; влажные ельники с кедром, березой желтой и липой
2	Выположенные водоразделы, верхние части крутых склонов	Свежие кедровники с березой желтой и дубом; свежие мелко-травно-зеленомошные ельники; влажные папоротниковые ельники с кедром, березой желтой и липой
3	Средние и верхние части склонов	Свежие кедровники с березой желтой и дубом; свежие кедровники с липой и березой желтой
4	Узкие выположенные водоразделы	Свежие кедровники с березой желтой и дубом
5	Выположенные средние части склонов	Свежие кедровники с березой желтой и дубом; свежие кедровники с липой и березой желтой
6	Нижние части пологих и очень пологих склонов	Влажные кедровники с широколиственными породами
7	Нижние и средние части пологих и очень пологих склонов	Влажные кедровники с широколиственными породами
8	Надпойменные террасы	Влажные кедровники с широколиственными породами
9	Пойменные террасы	Влажные кедровники с широколиственными породами
10	Заболоченные участки поймы	Сырые кедровники с ясенем и ильмом

**Таблица 3.** Распределение почв по преобладающим почвообразующим породам, % от площади, занимаемой данной почвой

Код почвы	Аллювий	Элювий, элюво-делювий					
	галечники и пески	базальты	песчаники	туфогенные песчаники	граниты	липариты	сиениты
1	—	7.1	10.1	63.7	8.3	10.8	—
2	—	32.6	17.0	46.1	1.9	2.4	—
3	4.7	27.3	16.6	45.0	1.5	3.4	1.5
4	9.5	6.5	8.8	61.0	1.3	8.8	4.1
5	0.9	27.0	22.4	49.7	—	—	—
6	9.2	10.5	38.5	41.8	—	—	—
7	—	18.2	10.4	54.6	4.9	6.5	5.4
8	72.8	—	20.1	7.1	—	—	—
9	22.8	18.6	24.0	34.4	0.5	2.6	0.7
10	97.2	—	1.5	1.3	—	—	—

условиям формирования почв на уровне подтипа (табл. 2, 3).

В почвенно-растительном покрове четко выражена вертикальная зональность. В пределах бассейна р. Правая Соколовка она представлена двумя почвенно-растительными поясами: верхним поясом горных буро-таежных и горно-подзолистых почв темнохвойных лесов и поясом горно-лесных бурых почв хвойно-широколиственных лесов [15]. Анализ выполнен последовательно для

почв среднегорных, низкогорных и горно-пойменных ландшафтов.

В пределах среднегорья под влажными ельниками с кедром развиты ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные (17.8% общей площади водосбора). Для этих почв характерна глубокая гумусированность профиля. Почвообразующие породы представлены преимущественно песчаниками (табл. 3), и в меньшей степени базальтами, гранитами, липаритами и сиенитами. Отмечается повышенная скелетность не только в

иллювиальной части профиля (обломки почвообразующих пород составляют 60–90% от объема почвенной массы), но и нередко в верхней гумусированной части – до 60%. Высокое содержание обломочного материала обеспечивает свободный внутрипочвенный дренаж.

Ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные представлены двумя подтипами: типичными и оподзоленными. Первые приурочены к верхним и средним частям склонов средней крутизны под папоротниковыми елово-пихтовым лесами. Вторые формируются на выложенных вершинах водоразделов под ельниками с участием мхов в напочвенном покрове. На выложенных вершинах водоразделов под свежими кедровниками и зеленомошными ельниками на базальтах и песчаниках распространены литоземы серогумусовые иллювиально-гумусированные (6.1%).

В поясе хвойно-широколиственных лесов широкое распространение (68.0% общей площади) получили буроземы. Их типичные подтипы (54.1%) развиты под свежими кедровниками на крутых склонах до высот 800 м. Почвообразующие породы представлены в основном базальтами и песчаниками. Почвы характеризуются быстрым водообменом. На высотах ниже 500–600 м в условиях выложенного рельефа и сдержанного водообмена формируются буроземы оподзоленные, занимающие 9.2% общей площади бассейна, а в местах с затрудненным водообменом – буроземы глееватые (1.6%) и поверхностно-глееватые (3.1%). К верхним частям склонов приурочены литоземы серогумусовые (1.1%).

Среди почв пойменных ландшафтов преобладают (5.8% площади) аллювиальные серогумусовые (дерновые) типичные, которые развиты на надпойменной террасе на песчано-галечниковых отложениях и характеризуются быстрым водообменом. Эутрофные перегнойно-торфяные почвы приурочены к заболоченным участкам поймы под ольхово-ясеневыми лесами, имеют ограниченное распространение (1.2%) и характеризуются затрудненным и застойным водообменом.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Расчет динамики элементов водного баланса трех экспериментальных водосборов выполнен с помощью модели с открытым исходным кодом SWAT (Soil and Water Assessment Tool, <http://swat.tamu.edu/>) [35]. Модель описывает основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрацию, испарение, термический и водный режимы почв, образование и таяние снежного покрова, формирование поверхностного, внутрипочвенного и грунтового стока. Пространственная струк-

тура основана на естественной конфигурации гидрографической сети, морфометрических и ландшафтных характеристиках бассейна. SWAT разбивает речной бассейн сетью элементарных водосборов, которые в свою очередь делятся на гидрологические расчетные единицы [46], характеризующиеся внутренней однородностью почвенного покрова, элементов рельефа, типа землепользования и растительного покрова. В качестве входной информации модель использует данные метеорологических наблюдений: атмосферные осадки, суточные данные об относительной влажности и температуре (максимальной и минимальной) воздуха, скорости ветра, солнечной радиации.

Подготовка структурной основы моделирования выполнена с помощью ГИС-интерфейса ArcSWAT. Расчет морфометрических параметров выполнен по цифровой модели рельефа SRTM30, данные о растительном покрове скоррелированы с классификацией типов землепользования SWAT. Почвенные характеристики – глубина горизонтов, плотность и плотность твердой фазы почвы, наименьшая влагоемкость, содержание гумуса, гранулометрический состав почвы, коэффициенты фильтрации – обобщены по данным работ [6, 7, 21, 28]. Переход по гранулометрическому составу от классификации Качинского к международной классификации, используемой в модели SWAT, выполнен с помощью кумулятивной кривой [32]. Речной бассейн характерен представлением о естественных характеристиках склонов и водотоков (длинах и уклонах) [9], разбит на частные водосборы средней площадью ~1 км<sup>2</sup>.

Моделирование выполнено непрерывно с суточным шагом: для ручья Еловый за период 2012–2014 гг., для ручья Медвежий – 2015–2017 гг., для ручья Березовый – 2015–2019 гг. Априорная оценка калибруемых параметров выполнена на основе обобщения данных литературных источников и ранее полученных результатов моделирования для водосборов верхней Уссури [2, 38, 43]. Калибровка выполнена вручную для переменных, входящих в уравнения блоков поверхностных, внутрипочвенных и грунтовых вод с помощью инструментов интерфейса ArcSWAT. Значение параметров модели SWAT, полученные в результате калибровки, приведены в (табл. 4).

Полученные значения параметра водоотдачи в условиях нормального увлажнения  $CN2$  соответствуют рекомендациям SCS [49] для почв горных водосборов, обладающих высокой водопроницаемостью (группа “А”). Полученные значения коэффициента шероховатости склонов  $OV_N$  следует рассматривать как интегральное сопротивление в условиях образования подповерхностного (контактного) стока на относительных водоупорах, ха-

**Таблица 4.** Значения параметров модели SWAT, полученные в результате калибровки

Водосбор	<i>CN2</i>	<i>OV_N</i>	<i>DEP_IMP</i> , м	<i>ALPHA_BF</i>	<i>GW_DELAY</i> , сут	<i>GWQMN</i> , мм	<i>GW_REVAP</i> , мм	<i>REVAPMN</i> , мм	<i>RCHRG_DP</i>	<i>ESCO</i>
Березовый	37	15	4.50	0.95	1.20	10	0.02	35	0.50	0.65
Еловый	35	0.1	5.00	0.12	1.20	0.0	0.20	30	0.10	0.46
Медвежий	35	30	4.25	0.25	1.50	50	0.20	25	0.55	0.10

Примечание. *CN2* – параметр водоотдачи в условиях нормального увлажнения [49], *OV\_N* – коэффициент шероховатости склонов, *DEP\_IMP* – глубина залегания водонепроницаемого слоя, *ALPHA\_BF* – коэффициент рецессии грунтовой емкости, *GW\_DELAY* – время достижения осадками зеркала грунтовых вод, *GWQMN* – пороговое значение уровня грунтовых вод, при котором появляется возвратный сток, *GW\_REVAP* – коэффициент капиллярного поднятия, *REVAPMN* – пороговое значение уровня грунтовых вод, при котором возникает капиллярное поднятие, *RCHRG\_DP* – доля грунтовых вод, питающих глубокие подземные горизонты, *ESCO* – параметр компенсации испарения.

рактерного для почв с сильно скелетным профилем и хорошим дренажом [10, 12].

Глубина залегания водонепроницаемого слоя *DEP\_IMP* соответствует предполагаемой нижней границе геологического субстрата [31]. Параметр *GW\_DELAY* соответствует быстрым инфильтрации и времени достижения обильными осадками зеркала грунтовых вод, *ALPHA\_BF* характеризует быструю реакцию грунтовых вод. Пороговое значение уровня грунтовых вод, при котором может возникнуть возвратный сток *GWQMIN*, и значение параметра компенсации испарения (из нижних почвенных горизонтов) *ESCO*, существенно различаются для водосборов северной (ручей Еловый) и южной (ручей Медвежий) экспозиции. Капиллярное поднятие может происходить даже при минимальных запасах грунтовых вод (*REVAPMN*). Параметр *RCHRG\_DP* определяет долю грунтовых вод, питающих глубокие подземные горизонты, в данном случае это безвозвратные потери на питание трещинных вод.

Периоды калибровки модели, согласно рекомендациям [36], включают основные фазы водного режима водотоков (весеннее половодье, периоды летней межени и летне-осенние паводки). Валидация полученных в результате калибровки параметров модели и гидрологических свойств почв выполнена с помощью переноса калиброванных значений по принципу ландшафтного сходства от относительно однородных к более сложным водосборам. Сначала калибровка модели была выполнена для водосбора ручья Медвежий, который полностью находится в поясе горно-лесных бурых почв хвойно-широколиственных лесов (рис. 1, код почв 3, 4, табл. 1). Затем полученные значения были перенесены на водосборы ручьев Еловый и Березовый, где почвы подтипов данного пояса занимают 80 и 50% соответственно. Калибровка для

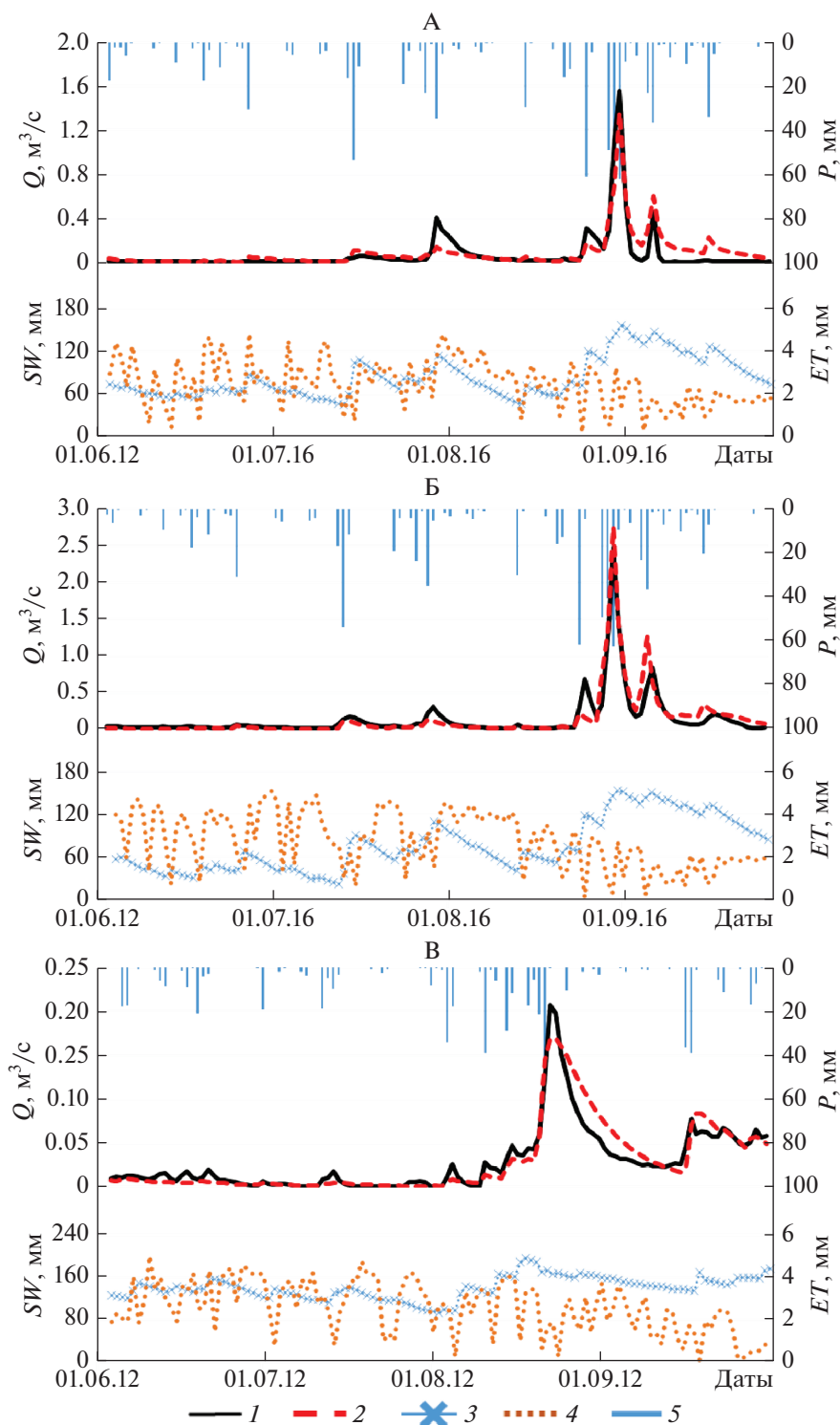
этих водосборов выполнена только для оставшейся площади, полностью расположенной в поясе горных буро-таежных почв темнохвойных лесов (код почв 1, 2, табл. 1).

Примеры измеренных и расчетных гидрографов стока, хода влажности почв и эвапотранспирации для 2012 и 2016 гг., включающих выдающиеся за период наблюдения паводки, вызванные сильными осадками (19–22.08.2012) и выходом на территорию Приморского края тайфуна Liongsk (25–31.08.2016), приводятся на рис. 2. Оценка эффективности моделирования производилась с помощью общепринятых критериев – коэффициента детерминации  $R^2$ , коэффициента Нэша-Сатклифа *NSE* [45] и относительного смещения (*BIAS*) (табл. 5). Согласно [42], результаты моделирования являются “хорошими” при  $0.65 < NSE < 0.75$  и “очень хорошими” при  $NSE > 0.75$ . При значении  $|BIAS| < 10\%$  результаты относятся к категории “очень хорошо”. Согласно указанным критериям, результаты моделирования относятся к категории “хорошо” для ручья Березовый и соответствуют категории “очень хорошо” для остальных водосборов.

Расчетный период, выбранный для водосбора ручья Медвежий, полностью не пересекается с расчетным периодом для ручья Еловый и частично (2018–2019) с расчетным периодом для ручья Березовый. Таким образом, хорошее воспроизведе-

**Таблица 5.** Критерии эффективности моделирования

Водосбор	$R^2$	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> , %
Березовый	0.72	0.72	–3
Еловый	0.90	0.87	–3
Медвежий	0.81	0.79	–1



**Рис. 2.** Измеренные (1) и расчетные (2) гидрографы стока  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; влагосодержание почвы (3)  $SW$ , мм; эвапотранспирация (4)  $ET$ , мм; осадки (5)  $P$ , мм для экспериментальных водосборов: А – Елового; Б – Березового; В – Медвежьего.

дение моделью всех фаз водного режима исследуемых ручьев при постоянных за полные расчетные периоды параметрах моделирования для водосборов с площадью 3.5–7.5 км<sup>2</sup>, говорит об

устойчивости полученных параметров. Описанный выше подход позволил выполнить верификацию полученных результатов при достаточно коротких периодах полевых наблюдений. Исходя



**Таблица 6.** Гранулометрический состав и гидрологические характеристики почв, полученные в результате калибровки модели SWAT

Почвенно-растительный пояс (код почв)	Слой, мм	<i>AWC</i> , %	<i>Ksat</i> , мм/ч	Плотность, г/см <sup>3</sup>	<0.002 мм, %	>0.05 мм, %
Пояс горных буро-таежных почв тем- нохвойных лесов (код почв 1, 2)	150	0.17	50	1.15	18	42
	300	0.08	12	1.45	12	58
	1800	0.05	0.9	1.54	10	70
Пояс горно-лесных бурых почв хвойно-широколиственных лесов (код почв 3, 4)	120	0.08	8.5	1.15	12	33
	250	0.08	5	1.4	20	25
	500	0.12	3.5	1.5	18	26
	900	0.06	1.2	1.6	12	38
	1400	0.06	0.6	1.57	5	80

**Таблица 7.** Элементы водного баланса SWAT (мм), за расчетные периоды

Водосбор	<i>P</i>	<i>ET</i>	<i>Q<sub>surf</sub></i>	<i>Q<sub>lat</sub></i>	<i>Q<sub>gw</sub></i>	<i>Dp</i>
Березовый	868	400	36	61	176	178
Еловый	779	422	0.8	46	89	10
Медвежий	831	491	42	75	22	110

из пространственного разрешения расчетных элементов модели, значения модельных характеристик для почв были объединены по почвенно-растительным поясам (табл. 6). Получены существенные различия для значений продуктивной влагоемкости (*AWC*), коэффициента насыщенной проводимости (*Ksat*) между почвами темнохвойных и широколиственных лесов.

Модель хорошо воспроизводит гидрографы средних и многоводных лет, как правило, на 10–20% занижает пиковые значения гидрографов паводков, вызванных интенсивными осадками. На фоне продолжительных маловодных периодов небольшие увеличения стока (до 0.1–0.4 м<sup>3</sup>/с (1–7 мм/сут)) модель практически не воспроизводит. Это связано с необходимостью более детального учета метеопараметров над водосбором и более точного учета эвапотранспирации. Обобщенные значения модельных элементов годового водного баланса за весь расчетный период в мм (сумма осадков *P*, испарение *ET*, поверхностный, внутрипочвенный и грунтовый сток *Q<sub>surf</sub>*, *Q<sub>lat</sub>*, *Q<sub>gw</sub>* соответственно), а также безвозвратные потери (*Dp*) на питание трещинных вод, представлены в табл. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирован опыт создания базы геоданных, включающей цифровое пространственное покрытие и информацию о физических и

гидрологических характеристиках почв, а также ее использование для создания пространственной структуры и калибровки гидрологической модели на основе данных полевых наблюдений на трех экспериментальных водосборах. Оценка результатов моделирования выполнена на основе данных измеренных расходов в замыкающих створах ручьев. Модель хорошо воспроизводит все фазы гидрологического режима, включая гидрографы дождевых паводков. В результате моделирования были получены дополнительные данные о гидрологическом режиме почв и элементах водного баланса водосборов. Физическая обоснованность структуры и параметров гидрологических моделей позволяет более эффективно изучать гидрологические свойства почв и особенности формирования стока в масштабе водосбора. Перспективы создания общей информационной базы геоданных делает возможным более эффективное применение гидрологических моделей, обобщение параметров и результатов моделирования, а также позволит более объективно и достоверно оценить гидрологические почвенные характеристики, создать методическую основу их постоянной актуализации.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы работы выражают благодарность Т.С. Губаревой, Е.А. Шекману, М.Л. Бурдуковскому, П.А. Перепелкиной, П.А. Беляковой, студентам ДВФУ и МГУ им. М.В. Ломоносова за участие в сборе и обработке данных наблюдений.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 17-77-30006), РФФИ (научный проект № 19-05-00326 и 20-05-00812), а также согласно

планам НИР (ГЗ) № АААА-А19-119030790003-1 (ТИГ ДВО РАН) и АААА-А19-119102290002-3 (ТИГ ДВО РАН).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Краснопеов С.М. Создание современной информационной и технологической основы исследований и моделирования гидрологических процессов // Мат-лы XIV совещания географов Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 570–572.
2. Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Терешкина А.А., Гончуков Л.В., Бугаец Н.Д., Сидоренко Н.Ю., Пшеничникова Н.Ф., Краснопеов С.М. Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 68–79.
3. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеов С.М., Гарцман Б.И. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка // Почвоведение. 2015. № 3. С. 268–276.
4. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеов С.М., Гарцман Б.И., Голодная О.М., Ознобихин В.И. Цифровая почвенная карта бассейна р. Уссури // Почвоведение. 2017. № 8. С. 936–945.
5. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
6. Гавренков Г.И. К характеристике почв Верхнеуссурийского стационара // Стационарные исследования в лесах Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 18–25.
7. Гавренков Г.И. Механический состав почв Верхнеуссурийского стационара // Комплексные исследования лесных биогеоценозов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 55–73.
8. Гавренков Г.И., Костенкова А.Ф., Сапожников А.П. Сравнительная характеристика органического вещества почв ельников и кедровников Верхнеуссурийского стационара // Экология и продуктивность лесных биоценозов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 36–45.
9. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Краснопеов С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 20–29.
10. 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.
11. Гончуков Л.В., Ламаш Б.Е. Численный прогноз опасных явлений погоды по северу Приморского края // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2010. № 6(154). С. 17–23.
12. Джеррард А.Дж. Почвы и формы рельефа. Комплексное геоморфолого-почвенное исследование. Л.: Недра, 1984. 208 с.
13. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 460 с.
14. Жильцов А.С. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука. 2008. 332 с.
15. Иванов Г.И. Почвенная карта Приморского края. Масштаб 1 : 500000. Хабаровск: ГУГК № 2, 1983. Листы 1, 4, 8.
16. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
17. Комплексные исследования лесных биогеоценозов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. 140 с.
18. Костенкова А.Ф. Типы биологического круговорота веществ в горных биогеоценозах южного Приморья // Биогеоэкологические исследования в лесах южного Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 29–38.
19. Костенкова А.Ф. Химический состав почв хвойно-широколиственных лесов в зависимости от топологических условий // Экология и продуктивность лесных биоценозов (Верхнеуссурийский стационар). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 46–58.
20. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015. © ФАО и Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2017. 216 с.
21. Москаев А.П. Водно-физические свойства почв постоянных пробных площадей в Супутинском заповеднике // Комплексные стационарные исследования лесов Приморья. Л.: Наука, 1967. С. 58–62.
22. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Российской академии наук, 2018. 300 с. <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001>
23. План лесонасаждений Верхнеуссурийского биогеоценологического стационара БПИ ДВНЦ АН СССР ДальНИИЛХ Приморского края. Масштаб 1 : 10000, 1975 г. 1 лист.
24. Погребняк П.С. Основы лесной типологии. Киев: Изд. АН УССР, 1955. 456 с.
25. Сапожников А.П., Гавренков Г.И. О достоверности различий между почвами кедровников и ельников на Верхнеуссурийском стационаре // Комплексные исследования лесных биогеоценозов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 74–78.
26. Сапожников А.П., Селиванова Г.А., Ильина Т.М., Дюкарев В.Н., Бутовец Г.А., Гладкова Г.А., Гавренков Г.И., Жильцов А.С. Почвообразование и особенности биологического круговорота веществ в горных лесах Южного Сихотэ-Алиня (на примере Верхнеуссурийского стационара). Хабаровск: Даль-

- невосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства (ДальНИИЛХ), 1993. 270 с.
27. Селиванова Г.А. Некоторые черты динамики почвенных процессов в лесных биогеоценозах Верхнеуссурийского стационара // Комплексные исследования лесных биогеоценозов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 79–90.
  28. Таранков В.И. Режим хвойно-широколиственных лесов южного Приморья. Л.: Наука, 1970. 120 с.
  29. Терешкина А.А., Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Голодная О.М., Ознобихин В.И. Опыт создания базы данных гидрофизических характеристик почвенного покрова и моделирования гидрологического цикла малого речного бассейна на примере реки Комаровка // Роль почв в биосфере и жизни человека. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2015. С. 117–119.
  30. Терешкина А.А., Пшеничникова Н.Ф., Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Краснопеев С.М. Опыт создания цифровой пространственной модели подстилающей поверхности водосбора // Устойчивое природопользование в прибрежно-морских зонах. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 160–165.
  31. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А. Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с.
  32. Шейн Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификации // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309–317.
  33. Шейн Е.В. Математические физически обоснованные модели в почвоведении: история развития, современное состояние, проблемы и перспективы (аналитический обзор) // Почвоведение. 2015. № 7. С. 816–823.
  34. Экология и продуктивность лесных биогеоценозов. Владивосток, 1979. 168 с.
  35. Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G. A comprehensive surface – groundwater flow model // J. Hydrol. 1993. V. 142. P. 47–69.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90004-S)
  36. Beven K. Rainfall-runoff modeling. The primer. 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2012. 457 p.  
<https://doi.org/10.1002/9781119951001>
  37. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling – a review // Hydrol. Process. 1995. V. 9. № 3–4. P. 251–290.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>
  38. Bugaets A.N., Gartsman B.I., Lupakov S.Yu., Shamov V.V., Gonchukov L.V., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A. Hydrological regime modeling of the small testbed catchments based on the field observations (a case study of the Pravaya Sokolovka River, the upper Ussuri Rivers basin) // Water Resources. 2019. V. 46. Suppl. 2. P. S8–S16.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807819080037>
  39. Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research and directions // American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2007. V. 50. № 4. P. 1211–1250.  
<https://doi.org/10.13031/2013.23637>
  40. Merz R., Blöschl G. Regionalisation of catchment model parameters // J. Hydrol. 2004. V. 287. P. 95–123.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.028>
  41. Miller B.A., Schaetzl R.J. History of soil geography in the context of scale // Geoderma. 2016. V. 264. Part B. P. 284–300.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.041>
  42. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Trans. ASABE. 2007. V. 50. № 3. P. 885–900.  
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
  43. Motovilov Yu.G., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Kalugin A.S., Moreido V.M., Suchilina Z.A., Fingert E.A. Assessing the Sensitivity of a Model of Runoff Formation in the Ussuri River Basin // Water Resources. 2018. V. 45. Suppl. 1. P. S128–S134.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807818050391>
  44. Nachtergaele F., van Velthuisen H., Verelst L. Harmonized World Soil Database (Version 1.1). FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, Rome, Italy and Laxenburg, Austria. 2009. 38 p.
  45. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
  46. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, version 2009; Texas A&M University: College Station, TX, USA, 2011.
  47. Orgiazzi A., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Fernández-Ugalde O. LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review // European J. Soil Science. 2017. V. 69(1). P. 140–153.  
<https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
  48. Tavares Wahren F., Julich S., Nunes J.P., Gonzalez-Pelayo O., Hawtree D., Feger K.-H., Keizer J.J. Combining digital soil mapping and hydrological modeling in a data scarce watershed in north-central Portugal // Geoderma. 2016. V. 264. P. 350–362.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.023>
  49. USDA SCS National Engineering Handbook. – Washington, D.C., Government Printing, 1956. Suppl. A. Section 4. Chapter 10. 79 p.
  50. Van Zijl G.M., van Tol J.J., Riddell E.S. Digital Soil Mapping for Hydrological Modelling // Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales and Boundaries. Springer Environmental Science and Engineering. Springer, Singapore, 2016. P. 115–129.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-0415-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0415-5_10)
  51. Zhu A.X., Hudson B., Burt J.E., Lubich K. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic // Soil Science Society of Am. J. 2001. V. 65. P. 1463–1472.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551463x>

## Digital Soil Mapping for Hydrological Modeling with the Example of Experimental Catchments (South of Primorsky Krai)

A. N. Bugaets<sup>1,2,\*</sup>, N. F. Pshenichnikova<sup>1</sup>, A. A. Tereshkina<sup>1</sup>, S. Yu. Lupakov<sup>1,2</sup>, B. I. Gartsman<sup>1,2</sup>,  
V. V. Shamov<sup>1</sup>, L. V. Gonchukov<sup>1,3,5</sup>, O. M. Golodnaya<sup>4</sup>, S. M. Krasnopeev<sup>1</sup>, and N. K. Kozhevnikova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Pacific Institute of Geography Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041 Russia*

<sup>2</sup>*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117971 Russia*

<sup>3</sup>*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, 690600 Russia*

<sup>4</sup>*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690022 Russia*

<sup>5</sup>*Primorskoe Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Vladivostok, 690990 Russia*

\**e-mail: andreybugaets@yandex.ru*

The digital soil map (1 : 50000) of the Pravaya Sokolovka River basin (south of Primorsky Krai, Russia) was created. By natural conditions, the territory of the basin is a typical middle-mountain belt; it characterizes low-middle-mountain section of the southern Sikhote-Alin. The main taxonomic units in the map legend are soil subtypes. The soil nomenclature was given according to the regional classification and was adapted to the modern soil classification of Russia, it was also correlated with the soil nomenclature of the World Reference Base for Soil Resources (WRB). Each soil area includes data on the soil formation conditions at the subtype level. It is shown that vertical zonality is clearly expressed in the soil and vegetation cover. The experience of the data preparation and calibration of the Soil and Water Assessment Tool hydrological model (SWAT 2012) based on field observations carried out in the period 2011–2019 is presented. Three experimental 2–3d-order catchments with the area of 3.5–7.6 km<sup>2</sup> were used as modeling objects. To calibrate the model, the data from literature, stationary studies, and the Roshydromet observation network were used. The proximity criteria between measured and calculated flow hydrographs, generally used in hydrology, were used to evaluate the simulation results. It was shown that the simulation results for all catchments are good, the model adequately reproduces hydrographs of the middle and high-water years, and as a rule underestimates the peak values of flood hydrographs caused by heavy rainfall by 10–20%. The values of the model parameters and soil hydrological characteristics obtained from model calibration, as well as calculated data on the dynamics of water balance elements, are presented.

*Keywords:* soil map, testbed catchments, runoff modeling, water budget, SWAT