

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 551.579

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ ПО ДАННЫМ ПРИМОРСКОЙ ВОДНОБАЛАНСОВОЙ СТАНЦИИ

© 2023 г. А. Н. Бугаец<sup>а</sup>, \* , С. Ю. Лупаков<sup>а</sup>, Н. Ф. Пшеничникова<sup>а</sup>, С. М. Краснопеев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

\*e-mail: andreybugaets@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.11.2021 г.

После доработки 01.06.2022 г.

Принята к публикации 09.06.2022 г.

Для водосбора р. Комаровки, расположенного на территории бывшей Приморской воднобалансовой станции, выполнено моделирование интенсивности смыва, мутности и расхода взвешенных наносов. В качестве методической основы использована модель с открытым кодом SWAT. Калибровка и верификация модели выполнена на основе архивных данных измерений мутности и расхода взвешенных наносов Приморской водно-балансовой станции на гидрологическом посту Центральный (157 км<sup>2</sup>). Эффективность моделирования мутности и расхода взвешенных наносов соответствует категориям “удовлетворительно” и выше. В среднем по водосбору интенсивность смыва почвы составляет 11–12 т/га в год. Максимальный смыв происходит в период активного снеготаяния. Среднемесячные величины за апрель–май составляют 75 тыс. т. Среднегодовая величина смыва составляет 171 тыс. т, максимальная – 800 тыс. т/год. Среднегодовой расход взвешенных наносов в замыкающем створе водосбора составляет 2.6 тыс. т. Наибольшие месячные значения твердого стока приурочены к периоду прохождения летних паводков в августе – в среднем 1 тыс. т (максимум – 7.7 тыс. т). Полученные данные о неоднородности пространственного распределения модельных величин интенсивности смыва хорошо согласуются с ландшафтными и климатическими особенностями формирования стока на водосборе. Основные погрешности в расчетах взвешенных наносов связаны с качеством моделирования гидрологического режима и динамики формирования компонентов речного стока, образующих гидрографы паводков.

*Ключевые слова:* моделирование, SWAT, водная эрозия, мутность.

DOI: 10.31857/S0321059623010054, EDN: EDHPKV

#### ВВЕДЕНИЕ

Флювиальное рельефообразование – один из важнейших литодинамических факторов развития рельефа. Изучение механизмов и взаимосвязей эрозионных и русловых процессов, их проявлений в различных пространственно-временных масштабах, разработка методов математического моделирования эрозии почв и моделей функционирования эрозионно-аккумулятивных процессов в пределах речного водосбора – фундаментальная проблема таких смежных наук о Земле, как почвоведение, гидрология и геоморфология – основы современных концепций флювиальной геоморфологии [34, 39]. Несмотря на многочисленные исследования, трансформация вещественных потоков (прежде всего стока воды и наносов) остается одной из наименее изученных проблем геофизики. Сложность описания взаимодействия разноранговых звеньев эрозионно-русловых систем связана с многообразием вариантов их сочленения разномасштабными пространственно-

временными соотношениями между ними и эрозионно-аккумулятивными процессами [34].

Современной методической основой изучения взаимодействия различных звеньев эрозионно-русловых систем служит баланс взвешенных наносов в некотором створе речного водосбора. Водные потоки в пределах водосборных бассейнов представляют собой единую систему, соответственно единую систему образуют и все разновидности эрозионно-аккумулятивных процессов [21]. Площадь водосбора при этом – основной гидрологический признак подобия рек по условиям формирования стока [49]. Эти положения составляют основу современных подходов количественной оценки динамики эрозионно-аккумулятивных процессов и перераспределения наносов в крупном речном бассейне или ландшафтной зоне [34].

Основную площадь крупных речных бассейнов занимают водосборы рек первых порядков, которые являются элементами геосистем с максимальной скоростью влагооборота [33], прини-

мая значительную часть смываемого материала. По мере увеличения порядка реки эта связь становится все более опосредованной. Данное обстоятельство определяет тесную связь условий формирования стока воды и наносов с состоянием и динамикой гидрологических и эрозионных процессов малых водосборов [22], выступающих в качестве базовых ландшафтных единиц для обобщения закономерностей пространственно-временной динамики и взаимодействия факторов эрозии.

Серьезному прогрессу данного направления способствовало появление геоинформационных технологий, цифровой пространственной информации высокого разрешения и систем компьютерного моделирования. В настоящее время модели эрозионных процессов – обычно составные части сложных интегрированных информационно-моделирующих комплексов, направленных на решение более общих научных проблем, требующих междисциплинарного подхода [8, 17, 37, 47]. Полученные с помощью интегрированных систем моделирования результаты могут быть более репрезентативны по сравнению с результатами расчетов и обобщений, полученных на основе только точечных измерений в контрольных створах (обычно на гидрологических постах), поскольку представляют собой характеристики, соотнесенные с масштабом расчетных элементов моделей [10, 43].

Для адаптации моделей к условиям конкретных регионов необходимы экспериментальные полигоны на репрезентативных участках территории [8, 17]. Данные специальных наблюдений на экспериментальных водосборах бывших воднобалансовых станций, включающие детальные данные метеорологических измерений, компонентов водного баланса и твердого стока, представляют значительный резерв повышения точности и достоверности результатов моделирования за счет расширения информационного содержания моделей. Несмотря на множество исследований, потенциал этих данных до сих пор использован далеко не полностью [5, 12]. В основном они использовались для калибровки гидрологических моделей с целью изучения процессов формирования стока и динамики компонентов водного баланса [1, 6, 28]. Применение подобных исследований в качестве основы для изучения и прогнозирования динамики флювиальных процессов в масштабе водосбора представляется достаточно перспективным.

Определенные трудности в развитии данного направления связаны с наличием проблем зависимости результатов гидрологического моделирования от цели каждого конкретного исследования, соответствующего ей выбора структуры модели и даже набора применяемых критериев

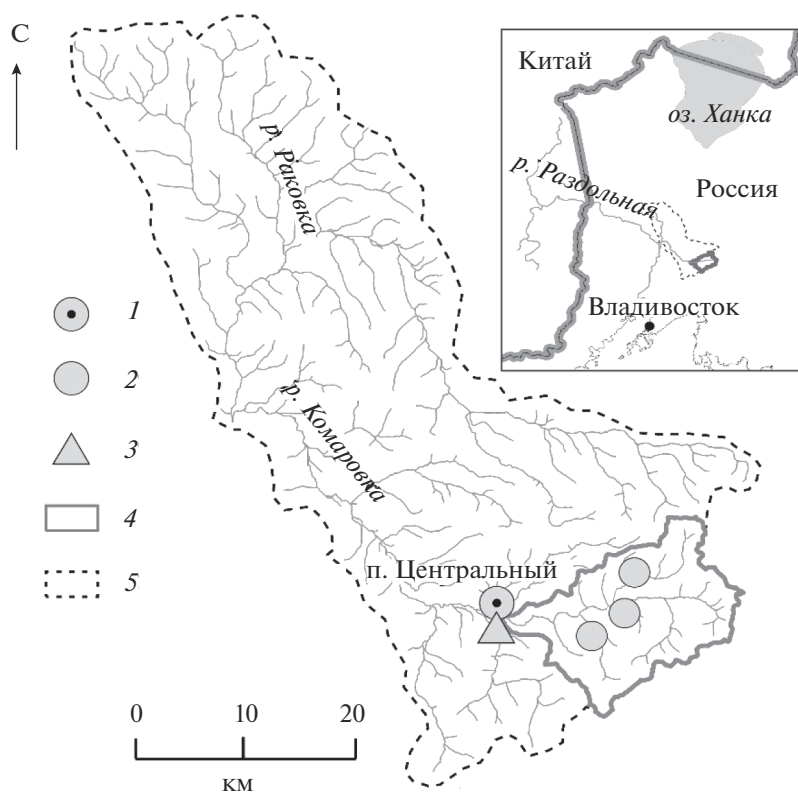
оценки эффективности модели [10, 20, 25]. Сложное общее влияние перечисленных факторов на итоговый результат называют проблемой эквивифинальности [36], которая в общем случае может быть описана как возможность получения практически эквивалентного модельного гидрографа в контрольных гидрометрических створах при существенно различном сочетании генетических составляющих стока (поверхностного, почвенного и грунтового). В контексте данной работы это значит, что достижение хороших результатов гидрологического моделирования (совпадения расчетного и измеренного гидрографа стока) далеко не всегда подразумевает возможность успешного применения разработанной модели для оценки динамики эрозионных процессов на водосборе.

В данном исследовании с целью адаптации гидрологической модели SWAT к региональным условиям формирования твердого стока использован уникальный архив данных специальных наблюдений бывшей Приморской воднобалансовой станции (ПВБС). Данные гидрометеорологических наблюдений ПВБС использованы в большом количестве работ, посвященных моделированию компонентов водного баланса в бассейне р. Комаровки [3, 6, 11, 20, 42]. Созданная в работе [6] сборка физически обоснованной гидрологической модели SWAT на основе детальной ЦМР разрешением 10 м, почвенной карты масштаба 1 : 50000 [7] и базы данных гидрофизических характеристик почвы [32] успешно применена для изучения гидрологического режима рек ПВБС. В представленном исследовании принята попытка использовать полученные в работе [6] результаты калибровки гидрологического блока SWAT для моделирования мутности, расхода взвешенных наносов и картирования интенсивности смыва. Для оценки результатов моделирования мутности и расхода взвешенных наносов использованы архивные данные наблюдений ПВБС (мутность и расход взвешенных наносов) за период 1966–1987 гг. на гидрологическом посту Центральный (157 км<sup>2</sup>) наблюдательной сети ПВБС.

## ОБЪЕКТЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бывшая ПВБС (площадь ~1500 км<sup>2</sup>) была расположена в пределах водосбора р. Комаровки и ее главного притока р. Раковки, берущих начало на северных склонах хребта Пржевальского (Уссурийский и Михайловский районы Приморского края). Комаровка – левый приток р. Раздольной, впадает в нее на расстоянии 93 км от устья. Объект исследования – водосбор р. Комаровки – п. Центральный (157 км<sup>2</sup>) (рис. 1).

Рельеф территории низко- и среднегорный, склоны сопок умеренно крутые (до 15°), в верх-



**Рис. 1.** Картограмма исследуемой территории. 1 – метеостанция Приморская (31962), 2 – осадкомеры (Комаровский, Егерский, Медвежий), 3 – гидрологический пост, 4 – граница водосбора р. Комаровка – п. Центральный, 5 – граница ПВБС.

них частях водосбора очень крутые (до  $30^{\circ}$ – $35^{\circ}$ ) и лишь в нижних частях бассейна более пологие, слабо вогнутые. Абсолютные отметки высот главных водоразделов составляют 300–500 м (максимальная 700 м). Водосбор практически полностью покрыт тайгой (лесистость территории составляет 95%), частично в первозданном виде (Уссурийский заповедник). Распространены в основном хвойно-широколиственные, в долинах – пойменные широколиственные леса. В нижней части водосбора произрастают леса тех же видов, но по густоте они уступают лесам верхней части.

Климат территории относится к муссонному типу с крайне неустойчивым внутригодовым и многолетним режимом увлажнения. По данным метеостанции Приморская (WMO 31962), расположенной в замыкающем створе исследуемого водосбора, среднегодовая температура воздуха составляет  $3$ – $4^{\circ}\text{C}$ , минимальные значения  $-38$ ... $-41^{\circ}\text{C}$  (январь), максимальные  $35$ – $38^{\circ}\text{C}$  (июль–август). Глубина промерзания почв – 100–150 см, высота снежного покрова сильно колеблется от года к году – от 3 до 100 см. Среднеголетняя сумма осадков 600–800 мм. Основная фаза гидрологического режима – летне-осенние дождевые паводки. Длительные обложные дожди небольшой

интенсивности в первую половину лета насыщают влагой почву, приходящие следом в августе–сентябре тайфуны (один или несколько) приводят к резкому подъему уровня воды и разливу рек в нижнем течении. Максимальные суточные величины слоя стока, по данным инструментальных измерений, достигают 100 мм, что приблизительно соответствует модулю стока  $1000 \text{ л}/(\text{с км}^2)$  [13]. Высокая интенсивность осадков в летне-осенний период и значительные уклоны водосборов способствуют развитию водной эрозии, обильному сносу твердого материала и быстрому увеличению мутности малых рек [23]. Средняя мутность рек исследуемой территории составляет 50–200 мг/л [16, 26, 31, 38].

Район исследования относится к зоне распространения подверженных риску смыва почв с эрозионно-промывным режимом [27]. Почвенный покров водосбора представлен в основном различным сочетанием горных бурых лесных почв (Cambisol [24]) с элювием и элюво-делювием почвообразующих пород – песчаника, туфа, изредка базальта и гранита. Склоны южных экспозиций покрыты в основном горными бурными лесными оподзоленными мощными почвами. По гранулометрическому составу это средние и тя-

желые суглинки. На склонах северной экспозиции развиты преимущественно горные бурые лесные оподзоленные маломощные почвы. По гранулометрическому составу преобладают их средне- и тяжелосуглинистые разновидности. Почвы пойменных ландшафтов – бурые лесные на аллювии и остаточно-пойменные и аллювиальные луговые (Fluvisol [24]) – формируются вдоль водотоков на аллювиальных отложениях различного механического состава. Обычно это средние и легкие суглинки разной степени дренируемости [7].

Для калибровки и верификации модели использованы архивные данные наблюдений ПВБС на гидрологическом посту р. Комаровка – п. Центральный за период 1966–1987 гг. Пробы воды для определения мутности и расходов взвешенных наносов отбирались батометром-бутылкой точечным и суммарным способом. Для измерения расходов взвешенных наносов пробы отбирались ежедневно во время половодья и паводков в два срока или учащенно на всех скоростных вертикалях. Наблюдения в холодный период не проводились, так как в зимние месяцы доля стока составляет 0.2–0.4%.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве методической основы исследования использована широко известная модель с открытым исходным кодом SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [35]. Расчетные элементы модели – так называемые гидрологические расчетные единицы HRU (Hydrological Response Unit) – представляют собой ареалы, характеризующиеся относительной однородностью элементов рельефа, почвенного и растительного покрова. С точки зрения отечественной терминологии, определение HRU коррелирует с понятием стокоформирующего комплекса [10]. Блок гидрологического моделирования SWAT включает в себя процессы инфильтрации, испарения, термический и водный режимы почв, образование и таяние снежного покрова, формирование поверхностного, внутрипочвенного и грунтового стока.

В SWAT для моделирования режима твердого стока используется классический подход, включающий в себя два этапа – ландшафтный (смыв почвы) и русловой (описывающий движение частиц грунта по русловой системе речного бассейна). Смыв почвы со склонов водосбора рассчитывается с помощью уравнения MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) [51]. Распределение размера частиц, отрывааемых от почвы, рассчитывается на основе данных гранулометрического состава верхнего горизонта почвы [41]. При наличии снежного покрова количество смываемого материала уменьшается в экспоненциальной зависимости от влагосодержания снега. Смытый

материал попадает в русловую сеть, где за счет транспортирующей способности водотоков перемещается вниз по течению. При прохождении паводков в руслах происходит многократное перетолжение (аккумуляция и размыв) материала, часть взвешенных наносов может оседать на пойме.

Расход взвешенных наносов на каждом расчетном участке русла вычисляется исходя из максимальной транспортирующей способности, для расчета которой может быть использован один из четырех методов, различающихся по составу используемой входной информации. В настоящей работе моделирование размыва русел и транспорта наносов выполнено методом Янга, в котором для расчета концентрации взвешенных наносов используются отдельные уравнения для фракций песка и гравия [52]. Эрозия и аккумуляция материала в русле рассчитаны на основе данных о морфометрии и гидравлике участков русловой сети, средней скорости потока на расчетном участке, гранулометрическом составе и гидравлической крупности частиц [40, 48]. Водный баланс и баланс твердого стока сводится на каждый расчетный шаг моделирования (сутки).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Калибровка модели выполнена за период 1966–1976 гг., период верификации составил 1977–1987 гг. Процедура калибровки параметров блока расчета объема твердого стока основана на последовательном изменении их значений до достижения наилучшего совпадения модельных и измеренных декадных значений мутности. Для получения расхода взвешенных наносов модельные значения мутности умножались на модельные расходы воды в замыкающем створе. Для расчета критериев эффективности моделирования суточный баланс модельного твердого стока агрегирован по декадам. Данные наблюдений мутности, имеющие признак пониженной точности измерения (вторая и третья декады 1981 г. – 0.9% от всего числа наблюдений за период верификации), были исключены из анализа. В качестве целевой функции использовались коэффициент детерминации  $R^2$ , коэффициент Нэша–Сатклиффа NSE [45] и относительное смещение BIAS:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{(Q_{obs_i} - Q_{mean})^2}, \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs_i}} \times 100, \quad (2)$$

**Таблица 1.** Полученные в результате калибровки значения параметров для расчета твердого стока с отдельных расчетных единиц (лев – значение параметра для расчетных единиц левого борта, прав – то же для правого борта)

Параметр	Краткое описание	Значение (лев/прав)	Единицы измерения
KUSLE	Коэффициент естественной размываемости почвы	0.5/0.5	т га ч га <sup>-1</sup> МДж <sup>-1</sup> мм <sup>-1</sup>
CFRG	Коэффициент, учитывающий скелетность (содержание обломков почвообразующих пород) верхнего горизонта почвенного покрова	0.73/0.65	–
Surlag	Время добегания поверхностного стока до русловой сети	2/2	сут
Concsed	Мутность в почвенном и грунтовом стоке	30/20	мг л <sup>-1</sup>

**Таблица 2.** Полученные в результате калибровки значения параметров блока расчета максимальной транспортирующей способности русловых потоков (лев – значение параметра для расчетных единиц левого борта долины, прав – то же для правого борта)

Параметр	Краткое описание	Значение (лев/прав)	Единицы измерения
CH_COV1	Коэффициент сопротивления размыву берегов	0.6/0.1	–
CH_COV2	Коэффициент сопротивления размыву русла	0.02/1.0	–
CH_BED_KD	Величина напряжения сдвига донного грунта	0.82/0.001	см <sup>3</sup> Н <sup>-1</sup> с
CH_BED_D50	Медианный размер частиц донного грунта	13/10	мкм

где  $Q_{obsi}$  – наблюдаемая величина на  $i$ -й расчетный шаг,  $Q_{simi}$  – смоделированная величина на  $i$ -й расчетный шаг,  $Q_{mean}$  – среднее за весь период измерений,  $n$  – общее число наблюдений.

Согласно общепринятым в гидрологии критериям [44], результаты моделирования “неудовлетворительные” при  $NSE \leq 0.5$ , “удовлетворительные” при  $0.5 < NSE \leq 0.65$ , “хорошие” при  $0.65 < NSE \leq 0.75$ , “очень хорошие” при  $0.75 < NSE \leq 1.0$ ; “неудовлетворительные” при  $BIAS \geq \pm 25\%$ , “удовлетворительные” при  $\pm 15\% \leq BIAS < \pm 25\%$ , “хорошие” при  $\pm 10\% \leq BIAS < \pm 15\%$ , “очень хорошие” при  $BIAS < \pm 10\%$ . Относительно твердого стока качество расчетов по  $BIAS$  считается “неудовлетворительным” при  $BIAS \geq \pm 55\%$ , “удовлетворительным” при  $\pm 30\% \leq BIAS < 55\%$ , “хорошим” при  $\pm 15\% \leq BIAS < 30\%$ , “очень хорошим” при  $BIAS < \pm 15\%$ .

Полученные в результате калибровки параметры моделей MUSLE и Янга (табл. 1, 2) находятся в интервале рекомендуемых значений [46]. Среди приведенных в таблицах параметров наи-

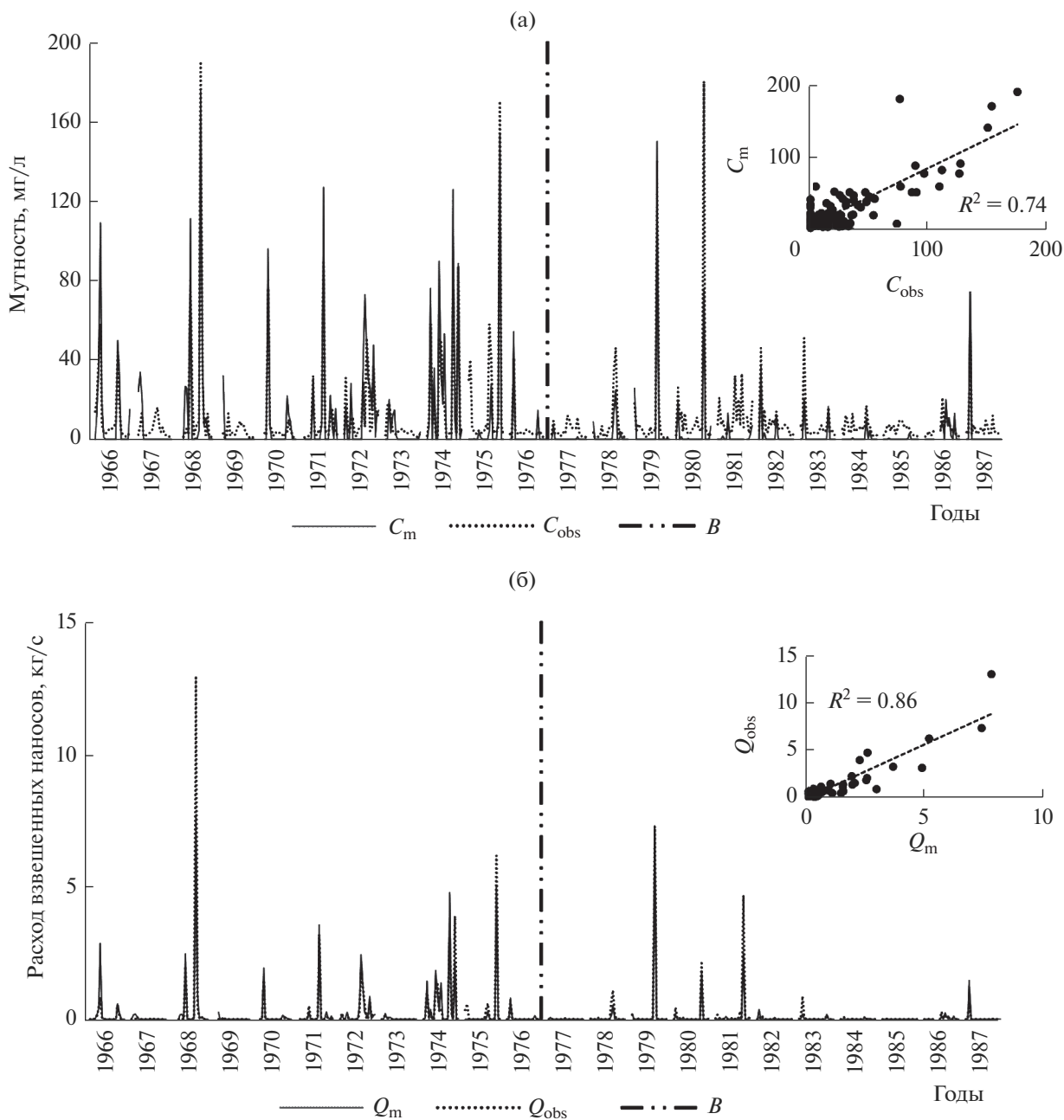
более чувствительные следующие: коэффициент естественной размываемости почвы KUSLE (табл. 1), коэффициент сопротивления размыву, напряжение сдвига и медианный размер частиц донного грунта – CH\_COV2, CH\_BED\_KD и CH\_BED\_D50 соответственно (табл. 2).

Эффективность моделирования мутности (согласно [44]) за период калибровки относится к категории “хорошо” по  $NSE$  и “очень хорошо” по  $BIAS$  (рис. 2а; табл. 3). За период верификации эффективность моделирования можно отнести к категории “удовлетворительно” по  $NSE$ . Выход показателя  $BIAS$  (65%) за границу интервала удовлетворительных оценок связан с накоплением ошибки за период верификации к концу расчетного периода, характеризующегося пониженным речным стоком по сравнению с периодом калибровки.

В период калибровки качество расчетов расхода взвешенных наносов (рис. 2б; табл. 3) по всем критериям относится к категории “очень хорошо”, за период верификации – “очень хорошо”

**Таблица 3.** Критерии эффективности моделирования декадной мутности и расхода взвешенных наносов за периоды калибровки (1966–1976 гг.), верификации (1977–1987 гг.) и полный расчетный период (1966–1987 гг.) соответственно

Характеристика	$R^2$	$NSE$	$BIAS$ , %
Мутность, мг/л	0.79/0.71/0.74	0.71/0.61/0.67	6/65/26
Расход взвешенных наносов, кг/с	0.85/0.92/0.86	0.83/0.91/0.85	1/26/9



**Рис. 2.** а – декадные модельные  $C_m$  и измеренные  $C_{obs}$  значения мутности в замыкающем створе, б – декадный модельный  $Q_m$  и измеренный  $Q_{obs}$  расход взвешенных наносов на р. Комаровка – Центральный; графики связи сравниваемых величин, а также граница периодов калибровки и верификации ( $B$ ).

по NSE и “хорошо” по BIAS. Минимальные значения критериев эффективности моделирования за весь 21-летний расчетный период (1966–1987 гг.) относятся к категории “хорошо” и лучше.

В целом, SWAT адекватно отражает динамику измеренного среднего расхода взвешенных наносов, однако несколько занижает абсолютные значения на пиках паводков, что связано с недоучетом расхода воды гидрологическим блоком модели. За исключением небольшого числа расположен-

ных в приводораздельных частях расчетных элементов, интенсивность смыва материала по модели SWAT значительно выше на склонах левого борта долины (рис. 3). Суммарно с левого борта за год смывается от 14.9 тыс. до 695 тыс. т материала, с правого – от 3 тыс. до 102 тыс. т, среднего-летнего количество смыва за год составляет 143.5 тыс. и 28 тыс. т соответственно. Максимальный смыв почвы происходит в основном в период активного снеготаяния и во время сильных дождей, вы-

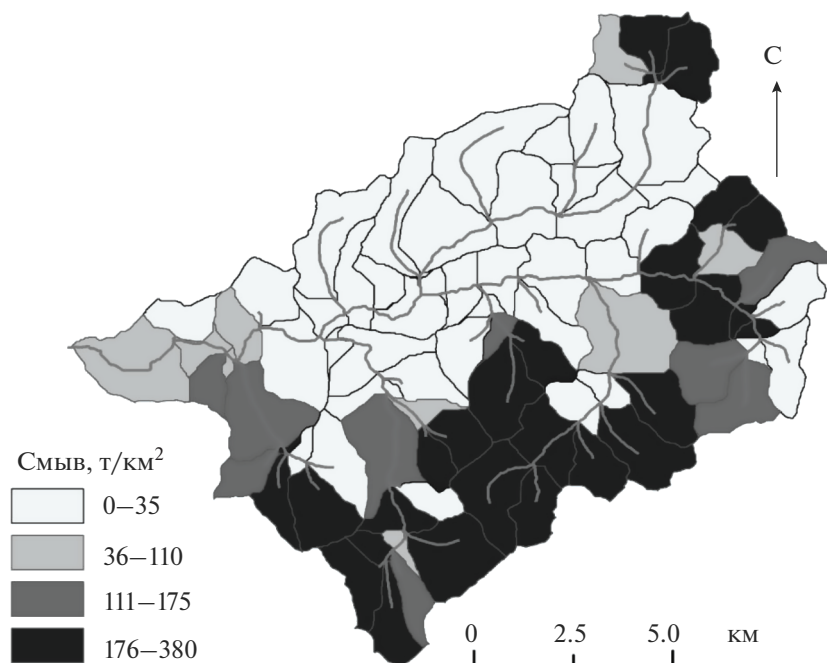


Рис. 3. Пространственное распределение среднегодовой интенсивности смыва на водосборе р. Комаровка – п. Центральный.

званных выходами тайфунов. Максимальные месячные величины смыва почвы с правого борта долины – в диапазоне 10–40 тыс. т, с левого 60–260 тыс. т. В среднем по водосбору темпы годового смыва составляют 11–12, с левого борта долины ~17, с правого ~6.6 т/га.

Изменчивость годового твердого стока в замыкающем створе водосбора составляет 14–12 тыс. т (среднегодовое значение 2.6 тыс. т). С апреля по июнь наблюдаются относительно невысокие месячные величины выноса смытого материала – ~240 т (максимум до 2.6 тыс. т), в июле существенно меньше – ~94 т. Наибольшие значения твердого стока характерны для августа: месячные максимумы находятся в диапазоне 3–7.8 тыс. т, в среднем за август выносятся ~1 тыс. т. В сентябре–октябре максимальные месячные значения составляют от 1 тыс. до 4 тыс. т. В холодный период года (ноябрь–март) модельные объемы выноса материала незначительные.

Для всех используемых в модели SWAT интервалов агрегации данных (декада, месяц, год) масса смыва, как правило, существенно превышает массу твердого стока в замыкающем створе. Вещественный баланс в модели замыкается за счет аккумуляции эродированного материала в отдельных участках русловой сети. В соответствии с оценками SWAT, среднемноголетнее количество твердого стока, которое проходит через замыкающий створ, составляет ~48% общей массы смытого со склонов водосбора материала. По результа-

там расчетов, на отдельных участках русловой сети ежемесячно может отлагаться до 30–66 тыс. т материала. На пойме аккумулируется  $\leq 9.5$  т в месяц. Диапазон величин месячной русловой эрозии для условий средних паводков – 2–4 тыс. т, максимум – до 16.7 тыс. т.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом для водосбора темпы смыва составляют 11–12 т/га в год, что достаточно хорошо согласуется с общими представлениями об эрозии лесных почв мощностью >1.5 м, развитых на рыхлом субстрате материнских пород [50]. Полученные результаты соответствуют локальным климатическим условиям. С левого борта долины смывается в среднем в 2.5 раза больше материала, чем с правого, что обусловлено преобладающими летом направлениями влагонесущих воздушных потоков и пространственной ориентацией основных водоразделов. Высокие и крутые склоны северных экспозиций находятся под большим влиянием основных атмосферных потоков, приносящих в теплый сезон значительное количество влаги с моря. По сравнению со склонами южных экспозиций здесь выпадает на 10–15% больше осадков.

Средняя удельная масса смытого материала составляет 1.6–1.8 г/см<sup>3</sup> [26, 31]. Таким образом, расчетное значение площадной денудации (отношение среднегодового твердого стока к площади водосбора [14]) составляет 0.4–0.5 мм, что соот-

ветствует общим представлениям о скорости площадной денудации в горных районах [2, 15, 18, 29], а также предположению, что рельеф исследуемого водосбора находится в состоянии динамического равновесия, при котором интенсивность флювиальных процессов должна компенсироваться скоростью вертикальных движений земной коры [4], которые в течение периода моделирования в районе исследования находились в интервале 0.2–0.7 мм/год [30].

Основные погрешности в расчетах объема твердого стока связаны с качеством моделирования процессов формирования на склонах и трансформации стока по русловой сети бассейна. При начальных условиях увлажнения почв, близких к величине полевой влагоемкости, модельные и измеренные значения мутности достаточно близки. При этом модель плохо воспроизводит незначительные колебания мутности во время летней межени. Это связано с особенностью взаимодействия блоков расчета эрозии и стокоформирования. В действительности даже небольшие дожди могут вызывать смыв почвенного материала. Однако при интенсивности осадков, не превышающей скорость инфильтрации влаги в почву, поверхностный сток – основной фактор, влияющий на интенсивность смыва в методе MUSLE, в модели SWAT отсутствует. Поскольку в течение межени сток взвешенных наносов обычно составляет 5–10% массы материала, выносимого рекой в периоды прохождения крупных паводков, данное обстоятельство не является существенным недостатком.

Влияние ошибок моделирования гидрографов паводкового стока может проявляться в виде как занижения, так и завышения мутности и расхода взвешенных наносов. Например, завышение моделью объема речного стока на пике паводка в сентябре 1980 г. привело к занижению на ~57% мутности в замыкающем створе (рис. 2а) по сравнению с наблюдаемыми величинами. Занижение пиковых расходов сильных паводков приводит к снижению расчетной эродирующей силы русловых потоков и к излишней величине аккумулярованного материала вдоль русла. Например, на пике паводка 1968 г. (17–20 августа) расход воды в замыкающем створе был занижен моделью на ~20 м<sup>3</sup>/с, что соответствует модулю стока 125–130 л/(с км<sup>2</sup>). Таким образом, несмотря на близкие значения модельной и измеренной мутности, средний расход взвешенных наносов на пике паводка оказался заниженным на ~40% (рис. 2б). В данном случае погрешности в расчетах речного стока и, как следствие, стока наносов в основном связаны с проблемами учета сетью дождемерных пунктов ПВБС сложной пространственно-временной динамики полей атмосферных осадков при прохождении тайфунов [6].

Смыв со склонов происходит в основном в период активного снеготаяния (вторая половина апреля – первая половина мая), при этом далеко не весь смытый материал формирует твердый сток в замыкающем створе. Подробный анализ результатов моделирования показал, что большая часть смыва почвы аккумулируется в русловой сети водосбора. Временное прекращение транспорта наносов в период межени возобновляется с приходом летне-осенних паводков, которые частично или полностью перемещают сезонные отложения наносов далее вниз по течению. Скорость перемещения зависит от гидрометеорологических условий в каждый конкретный год, определяется магнитудой и частотой прохождения паводков. Таким образом, твердый сток, измеренный в замыкающем створе, – результат взаимодействия совокупности происходящих на водосборе процессов различного пространственно-временного масштаба, связывающий воздействие каждого отдельного события с сезонным и многолетним взаимодействием процессов эрозии, транспорта и аккумуляции наносов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физически обоснованные гидрологические модели дают возможность количественно оценить интенсивность флювиальных процессов с учетом изменчивости условий смыва и транспорта наносов по русловой сети водосбора, обусловленной сложным взаимодействием большого количества разномасштабных факторов, связанных с необходимостью учета начальных условий увлажнения, пространственной неоднородности метеорологического воздействия на поверхность водосбора, адекватности определения компонентов стока, объемов эрозии и аккумуляции на склонах и в русловой сети. Применение в качестве исходных данных материалов специальных наблюдений бывшей ПВБС позволило добиться хорошего качества моделирования расходов воды в замыкающем створе и характеристик стока наносов исследуемого речного бассейна. Пространственное распределение интенсивности смыва хорошо согласуется с ландшафтными и климатическими условиями формирования стока на водосборе.

Репрезентативность сети метеорологических наблюдений – общий источник ошибок гидрологического моделирования и расчета расходов взвешенных наносов. Влияние ошибок моделирования гидрографов паводкового стока может проявляться в виде как занижения, так и завышения объема твердого стока в зависимости от точности определения объема поверхностного стока, сформированного склоновой системой водосбора. На основе результатов моделирования сделан вывод, что твердый сток в замыкающем створе исследуемого водосбора формируется в результате



взаимодействия совокупности разномасштабных гидрологических и флювиальных процессов.

Перспективы использования результатов представленного исследования связаны прежде всего с регионализацией параметров моделирования на основе принципа ландшафтного сходства. Сеть бывших воднобалансовых станций создавалась для изучения компонентов водного баланса. Все станции располагались в районах, достаточно репрезентативных по региональным условиям формирования жидкого и твердого стока. Появление новых источников данных гидрометеорологических наблюдений с более высоким пространственно-временным разрешением и баз данных гидрофизических характеристик почвенного покрова, а также развитие физико-математических моделей могут создать новые возможности для изучения процессов формирования твердого стока в масштабе водосбора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Бояринцев Е.Л., Филимонова М.К. Моделирование паводочного стока при выпадении сильных дождей в зоне распространения многолетнемерзлых пород // Вод. хоз-во России. 2018. № 1. С. 6–17. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-1-1>
2. Бронгулеев В.В. Математические методы в геоморфологии: Избранные работы. М.: Медиа-ПРЕСС, 2018. 128 с.
3. Бугаец А.Н. Применение стандарта OPENMI для создания интегрированных систем гидрологического моделирования // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 93–105.
4. Бугаец А.Н. Разработка методов определения структурно-гидрографических характеристик по данным ЦМР для гидрологического моделирования. Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: РГГМУ, 2011. 215 с.
5. Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Красноперев С.М., Бугаец Н.Д. Опыт обработки информации модернизированной гидрологической сети с использованием системы управления данными CUAHSI HIS ODM // Метеорология и гидрология. 2013. № 5. С. 91–101.
6. Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Терешкина А.А., Гончуков Л.В., Бугаец Н.Д., Сидоренко Н.Ю., Пшеничникова Н.Ф., Красноперев 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. <https://doi.org/10.3103/S1068373918050060>
7. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Красноперев С.М., Гарцман Б.И. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка // Почвоведение. 2015. № 3. С. 268–276. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15030028>
8. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Гончуков Л.В., Голодная О.М., Красноперев С.М., Кожевникова Н.К. Цифровое почвенное картографирование для целей гидрологического моделирования на примере экспериментальных водосборов (юг Приморского края) // Почвоведение. 2021. № 9. С. 1085–1096. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050051>
9. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 304 с.
10. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеороиздат, 1988. 312 с.
11. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Бугаец Н.Д., Болдескул А.Г., Галанин А.А., Губарева Т.С., Карасев М.С., Красноперев С.М., Кожевникова Н.К., Кулаков В.В., Ли К.Т., Макагонова М.А., Мезенцева Л.И., Меновицкова Т.С., Ониши Т., Попова Н.Ю., Степанова М.В., Степаненко Л.А., Соколов О.В., Третьяков А.С., Тащи С.М., Тегай Н.Д., Чен Н.К., Шекман Е.А., Шамов В.В. Речные системы Дальнего Востока России. Четверть века исследований. Владивосток: Дальнаука, 2015. 492 с.
12. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Красноперев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 20–29.
13. Горчаков А.М. Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. Л.: Гидрометеороиздат, 1983. 182 с.
14. Дедков А.П., Мозжерин В.И., Шарифуллин А.Н., Денмухаметов Р.Р. Современная денудация равнин Земли по данным о стоке наносов и растворенных веществ. // Изв. РАН. Сер. географическая. 2005. № 5. С. 30–38.
15. Иванова М.Ф. Общая геология. М.: Высш. шк., 1974. 400 с.
16. Ивлев А.М., Дербенцева А.М., Оздобихин В.И. Эрозия, дефляция (механическая деградация) и охрана почв: курс лекций. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2007. 128 с.
17. Керженцев А.С., Майснер Р., Демидов В.В. и др. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна. М.: Наука, 2006. 224 с.
18. Кинг Л. Морфология Земли. М.: Прогресс, 1967. 560 с.
19. Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н. Использование концептуальной модели речного стока HBV для анализа паводков на малых водосборах // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 84–94.
20. Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Шамов В.В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Вод. ресурсы. 2021. Т.48. № 4. С. 417–426. <https://doi.org/10.31857/S032105962104012X>
21. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.

22. Малые реки России / Под ред. *Н.И. Коронкевича, Г.М. Черногаевой*. М.: ИГРАН СССР, МЦГО РФ, 1994. 250 с.
23. *Мизеров А.В.* Эрозия почв юга Дальнего Востока и острова Сахалин и меры борьбы с нею. М.: Наука, 1966. 152 с.
24. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 / Под ред. *М.И. Герасимовой, П.В. Краильникова*. М.: ФАО, МГУ, 2017. 216 с.
25. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
26. *Назаркина А.В., Нестерова О.В., Дербенцева А.М. и др.* Гранулометрический состав твердого стока нерусловых и русловых водных потоков водосборного бассейна Японского моря. Владивосток: Изд-во Дальневосточ. ун-та, 2011. 172 с.
27. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. *С.А. Шобы*. М.: Астрель, 2011. 632 с.
28. *Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С.* Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона “Могот” // *Вод. хоз-во России*. 2018. № 1. С. 18–36. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-1-2>
29. *Никонов А.А.* Определение скорости врезания рек // *Геоморфология*. 1976. № 1. С. 24–36.
30. Процессы формирования рельефа Сибири / Под ред. *Н.А. Флоренсова, Г.С. Ананьева, Г.Ф. Уфимцева и др.* Новосибирск: Наука, 1987. 185 с.
31. *Степанова А.И.* Сток наносов рек Приморского края // *Режим, теория, методы расчета и измерения наносов и сточных вод*. Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1968. Вып. 156. С. 96–104.
32. *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.
33. *Шамов В.В.* Признаки и последствия усиления динамики крупномасштабных гидрологических процессов в связи с изменением климата // *Изв. ИГУ*. 2010. Т. 3. № 1. С. 183–193.
34. Эрозионно-русловые системы / Под ред. *Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука*. М.: ИНФРА, 2017. 792 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. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012. 457 p. <https://doi.org/10.1002/9781119951001>
37. *Bezak N., Matjaz M., Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Biddoccu M., Cerda A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li C., Lombardo L., Lopez-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Maerker M., Miao C., Modugno S., Moller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin S., Zema D.A., Zhao G., Panagos P.* Soil erosion modelling: A bibliometric analysis // *Environ. Res.* 2021. V. 197. 111087. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111087>
38. *Bobrovitskaya N.N.* Long-term variations in mean erosion and sediment yield from the rivers of the former Soviet Union // *IAHS Publ.* 1996. V. 236. P. 407–413.
39. *Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerda A., Chalise D., Chen S., Chen W., De Girolamo A.M., Gessesse G.D., Deumlich D., Diodato N., Efthimiou N., Erpul G., Fiener P., Freppaz M., Gentile F., Gericke A., Haregeweyn N., Hu B., Jeanneau A., Kaffas K., Kiani-Harchegani M., Villuendas I.L., Li C., Lombardo L., Lopez-Vicente M., Lucas-Borja M.E., Marker M., Matthews. F., Miao C., Mikos M., Modugno S., Moller M., Naipal V., Nearing M., Owusu S., Panday D., Patault E., Patriche C.V., Poggio L., Portes R., Quijano L., Rahdari M.R., Renima M., Ricci G.F., Rodrigo-Comino J., Saia S., Samani A.N., Schillaci C., Syrris V., Kim H.S., Spinola D.N., Oliveira P.T., Teng H., Thapa R., Vantas K., Vieira D., Yang J.E., Yin S., Zema D.A., Zhao G., Panagos P.* Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // *Sci. Tot. Environ.* 2021. V. 780. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
40. *Einstein H.A.* Spawning grounds. Berkeley: Univ. California, 1965. 16 p.
41. *Foster G.R., Lane L.J., Nowlin J.D., Laflen J.M., Young R.A.* Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas // *Transactions of the ASAE*. 1981. V. 24 (5). P. 1253–1262. <https://doi.org/10.13031/2013.34429>
42. *Gartsman B.I., Tegai N.D., Blöschl G., Parajka J.* Comparative testing of rainfall-runoff models in different climate and landscape conditions of Austria and Russia // *Geophysical Res. Abstracts*. 2008. V. 10. P. 1–2.
43. *Grayson R.B., Blöschl G.* Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modelling. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 423 p.
44. *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>
45. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models: Part I. 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. Temple: A&M Univ., 2011. 647 p.

47. *Pandey A., Himanshu S.K., Mishra S.K., Singh V.P.* Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // *Catena*. 2016. V. 147. P. 595–620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>
48. *Pemberton E.L., Lara J.M.* A procedure to determine sediment deposition in a settling basin. Denver: U.S. Bureau of reclamation sedimentation investigations technical guide series, 1971. 5 p.
49. *Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A.* Fractal River Basins: Chance and Self-Organization. Cambridge: Univ. Press, 1997. 547 p.
50. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys (Agriculture Handbook, Number 436). Washington D.C.: Natural Resour. Conservation Service, USDA, 1999. 869 p.
51. *Williams J.* Sediment routing for agricultural watersheds // *Water Res. Bull.* 1975. V. 11 (5). P. 965–974. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>
52. *Yang C.T.* Sediment Transport. Theory and Practice. N.Y.: The McGraw-Hill Companies, 1996. 396 p.