

УДК 556.164:004.94

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-4-52-69

С. А. Манжина, А. О. Матвиенко

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

РОССИЙСКИЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИФFUЗНОГО СТОКА И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ

Целью исследования на данном этапе стало обобщение российского и зарубежного опыта моделирования диффузного стока и процессов миграции в водосборном бассейне почвенных частиц и химических соединений в результате влияния талых и ливневых вод. *Материалы и методы.* В процессе исследований были изучены труды российских и зарубежных ученых, программные продукты, находящиеся в открытом доступе, и данные отчетов российских и зарубежных министерств и ведомств, организаций и образовательных учреждений. Применялся метод анализа и обобщения данных. *Результаты.* Авторами проведен анализ основных средств компьютерного моделирования поверхностного стока вод, водной эрозии почв и их последствий. Отмечено, что наибольшее распространение получили имитационные и аналитические средства моделирования. Большинство программных продуктов, наиболее широко используемых в настоящее время в целях изучения и моделирования поверхностного стока с водосборного бассейна, основаны на использовании инструментария имитационного моделирования и включают в себя базу данных, сформированную в результате многолетних наблюдений. Такие программы представлены как в виде продуктов, находящихся в свободном доступе, так и в виде коммерческих версий. *Выводы.* Наиболее актуальными для современного периода ведения исследования процессов переноса водой почв и веществ в границах водосборного бассейна являются модели с открытым исходным кодом и с возможностью широкого доступа к ним всех заинтересованных лиц, что позволяет осуществлять корректировку и пополнение (актуализацию) базы данных модели, а также способствует многофакторной апробации ее, уточнению и усовершенствованию посредством многочисленных калибровок.

Ключевые слова: диффузный сток; водная эрозия; водный объект; диффузионное загрязнение; имитационное моделирование; программные продукты; ГИС-технологии.

S. A. Manzhina, A. O. Matvienko

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

RUSSIAN AND FOREIGN COMPUTER SIMULATION EXPERIENCE OF DIFFUSE RUNOFF AND ITS CONSEQUENCES

The purpose of the study at this stage was to generalize Russian and foreign experience in modeling diffuse runoff and migration processes in catchment of soil particles and chemical compounds as a result of melt and storm water influence. *Materials and methods.* In the process of research, the works of Russian and foreign scientists, software products that are in the public domain, and data from reports of Russian and foreign ministries and depart-



ments, organizations and educational institutions were studied. The method of data analysis and generalization was applied. **Results.** The authors analyzed the main means of computer modeling of surface water runoff, soil water erosion and their consequences. It is noted that simulation and analytical modeling tools are the mostly widespread. Most of the software products widely used for the study and modeling of runoff from the catchment area are based on the use of simulation tools and include a database generated as a result of many years of observations. Such programs are presented both in the form of products that are freely available and in the form of commercial versions. **Conclusions.** The most relevant for the current period of studying the processes of water transporting soils and substances within the catchment area are open source models with the possibility of wide access to them by all interested sides, that allows the model database adjustment and replenishment (updating), and also contributes to its multifactor testing, refinement and improvement through numerous calibrations.

Key words: diffuse runoff; water erosion; water body; diffusion pollution; simulation modeling; software products; GIS technologies.

Введение. Один из родоначальников эрозиоведения в бывшем СССР Г. И. Швобс (1974) писал, что «под водной эрозией следует понимать часть процесса денудации, которая состоит из разрушения, перемещения и отложения частиц почвы и пород под действием дождя и текущей воды и определяется законами падения капель и движения водных потоков» [1]. Водная эрозия почв, происходящая вследствие практически нерегулируемых природных процессов (таких как паводок, таяние снегов, интенсивные дожди), является неблагоприятным фактором как для почвенного плодородия, так и для экологического состояния водных экосистем. Организация наблюдения за этими процессами, их контроля и прогнозирования в настоящее время считается одной из приоритетных экологических задач на международном уровне [1–7]. Для формирования баз данных и их обработки широко используется инструментарий моделирования и программные продукты.

Целью исследования является обобщение российского и зарубежного опыта моделирования диффузного стока и процессов миграции в водосборном бассейне почвенных частиц и химических соединений в результате влияния талых и ливневых вод.

Материалы и методы. В процессе исследований были изучены труды российских и зарубежных ученых, программные продукты, находящиеся-

ся в открытом доступе, и данные отчетов российских и зарубежных министерств и ведомств, организаций и образовательных учреждений.

Применялся метод анализа и обобщения данных.

Результаты. Особую важность в настоящее время имеет возможность прогноза условий, характеристик и сроков образования диффузного стока, а также действенности мероприятий по предотвращению переноса им химических веществ и почвенных частиц (водной эрозии почв). Для целей прогноза динамических составляющих систем, в т. ч. природных и антропогенных, широкое применение получило математическое моделирование: имитационное и аналитическое. Математический инструментарий используется как для описания результатов экспериментов и наблюдений, так и в качестве основы программных продуктов, позволяющих сократить время для обработки полученного массива данных [8–13]. Основные направления воздействия поверхностного стока вод приведены на рисунке 1, они являются определяющими при формировании моделей, в т. ч. компьютерных программ.

При формировании моделей наилучшие показатели дает наиболее полный учет всех возможных факторов, поэтому процесс изучения и учета водной эрозии ведут, начиная от падения дождевой капли. В мировой практике существуют общие подходы к моделированию образования ливневого стока и его последствий. Последовательность формирования самого дождевого стока принято разделять на стадии (AGL/MISC/17/91) [14].

Начальная стадия характеризуется началом выпадения осадков, при этом часть осадков, не достигая поверхности земли, перехватывается зеленой массой и древесной растительностью, которые в зарубежной практике моделирования получили название «хранилище перехвата». В зависимости от вида и густоты растительного покрова масштабы перехвата могут достигать значительных размеров. Так, например, по оценкам группы American Forests, в период с 1973 по 1997 г. вследствие истончения кроны

деревьев в Вашингтоне (округ Колумбия) на 43 % количество ливневых стоков, поступивших в канализационную систему города, увеличилось на 34 % при том же количестве выпадения осадков, что, по мнению экспертов, указывает на изменение показателя задержки дождевой воды кронами деревьев [15].

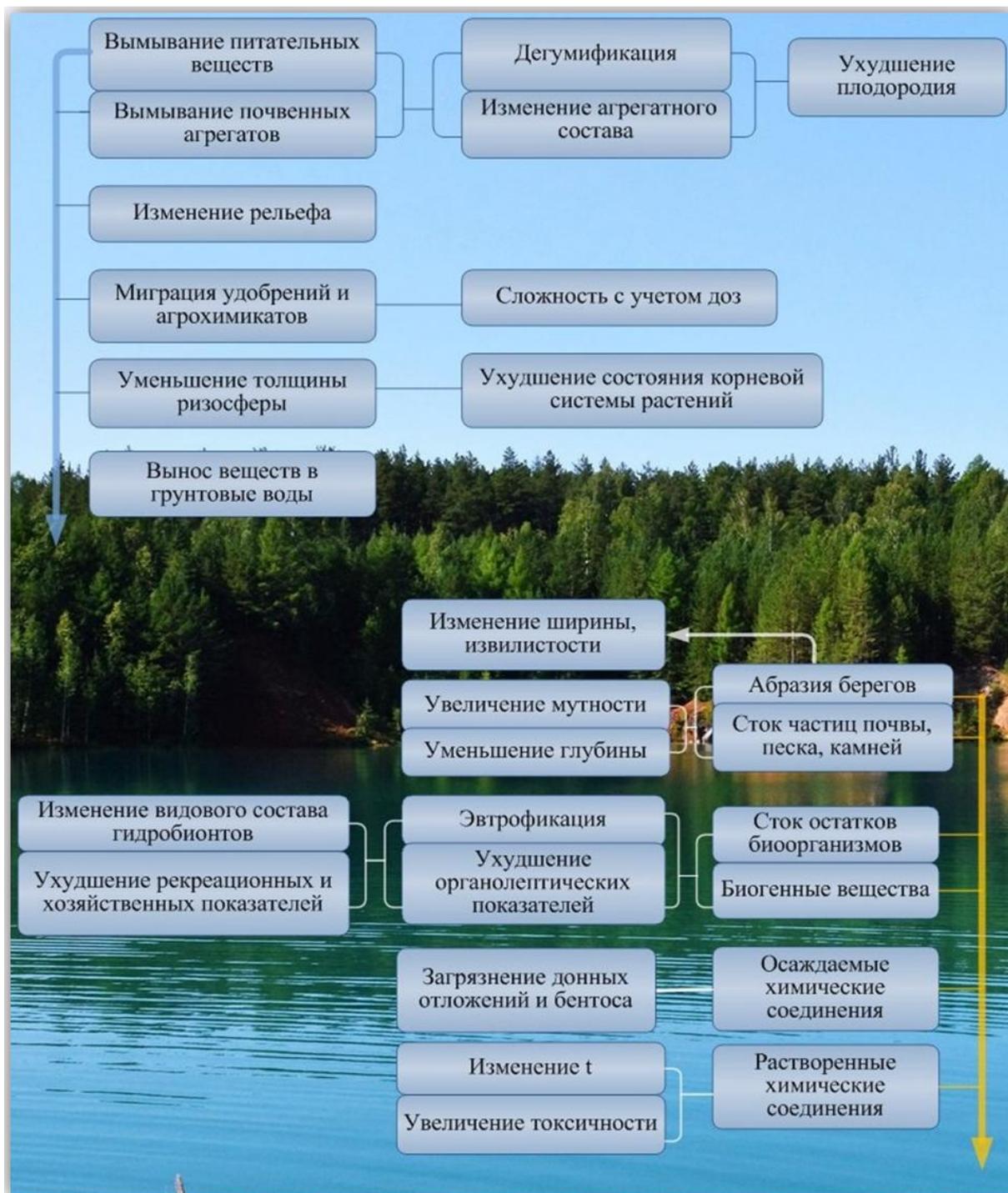


Рисунок 1 – Основные направления воздействия диффузного стока

Вторая стадия характеризуется инфильтрацией воды, достигшей поверхности почвы, что происходит до тех пор, пока количество осадков не превысит инфильтрационную способность почв (вместе с тем инфильтрационная способность почв зависит от ряда показателей, таких как наличие рытвин, нор, пористость, структура сложения, плотность, глубина залегания грунтовых вод, предшествующая влажность почв), при этом отмечается так называемая «конечная скорость инфильтрации», величина последней будет уменьшаться пропорционально увеличению интенсивности осадков.

Третья стадия характеризуется заполнением рельефных углублений поверхности (впадин, канав и др.), которые, в свою очередь, получили название «депресссионные хранилища».

Четвертая стадия характеризуется непосредственно образованием стока, который будет продолжаться, пока интенсивность осадков будет превышать фактическую инфильтрационную способность почвы.

Конечная стадия – прекращение образования стока, наблюдается при падении скорости выпадения осадков ниже фактической скорости инфильтрации почв.

Процесс создания эмпирических формул, описывающих водный режим территорий и вынос почвы с поверхностным стоком, получил широкое распространение начиная с 30-х гг. прошлого столетия [16, 17]. В конце 1950-х гг. на основании собранного массива данных многолетних исследований и наблюдений Службой охраны почв Министерства сельского хозяйства США (в настоящее время – Служба охраны природных ресурсов Министерства сельского хозяйства США) была разработана универсальная формула водной эрозии почв – Universal Soil Loss Equation (USLE), которая активно используется на практике до наших дней [18]. Сама формула включает в себя ряд составляющих, которые учитывают все возможные характеристики территории, способные оказать влияние на интенсивность эрозионного процесса. Дальнейшие исследования, проводимые с приме-

нием этой формулы, вносят коррективы при определении входящих в нее коэффициентов и способствуют ее уточнению и адаптации к реальным условиям и процессам [17].

Чуть позднее, в 1974 г. советский ученый Г. И. Швебс [1] выявил по крайней мере 18 эмпирических формул, применяемых для описания водной эрозии почв, с тех пор их количество увеличилось в разы [17, 19–24].

Для упрощения обработки большого массива данных, собранных в результате наблюдения за поверхностным стоком и его эрозионной активностью, в настоящее время широко применяется программный инструментарий, интегрированный с ГИС-технологиями [22]. При помощи имеющихся (в свободном и коммерческом доступе) программ осуществляется процесс сбора и обработки информации, прогнозирования и моделирования последствий диффузного стока для различных компонентов водосбора. Например, для моделирования диффузного стока и определения поступления азота и фосфора в водный объект (что способствует его эвтрофикации), а также определения приоритетных областей в водосборе, которые требуют первостепенного регулирования, нашла применение модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), разработанная Службой сельскохозяйственных исследований (ARS – Agricultural Research Service) Министерства сельского хозяйства США (USDA) [17, 25–27]. Эта модель является имитационной и позволяет отслеживать изменения почвенного и гидрологического баланса в водосборах при различной предположительной комбинации факторов, а также биопродуктивность бассейновых экосистем. Для удобства использования модели она ежедневно пополняется данными наблюдений, что позволило сформировать обширную базу данных для США и ряда стран Европы. Более того, она полностью совместима с ArcGIS и позволяет получать данные с временным интервалом осреднения в 24 ч [25].

Во Франции опробован при осуществлении мониторинга диффузного стока метод IRIP (индикатор интенсивного плювиального стока – фран-

цузская аббревиатура), основанный на построении карт для выявления восприимчивости различных участков речного бассейна к поверхностному стоку [28]. При его осуществлении используют комбинацию ландшафтных факторов для создания трех карт посредством ГИС-технологий, представляющих восприимчивость водосборного бассейна: 1) к генерации, 2) переносу, 3) накоплению поверхностного стока и транспортируемых им веществ. Исходными данными для осуществления картирования в рамках этого метода являются данные топографии, землепользования и типов почв. По предположению исследователей, этот метод будет являться наиболее простым в реализации и достаточно надежным для любого типа исследуемой области, без требования к калибровке или определенному формату ввода исходных данных [28]. Упомянутый метод применялся на водосборе р. Лезард (210 км², Северная Франция). Сравнительные тесты выполнялись с использованием стандартного метода верификации для дихотомического прогнозирования наряду с пятью показателями верификации: точность, смещение, коэффициент успешности, вероятность обнаружения и коэффициент ложной тревоги. Проведенные исследования показали, что карта восприимчивости накопления поверхностного стока способна идентифицировать концентрированные потоки поверхностного стока по почвенным частицам. Карта восприимчивости переноса способна идентифицировать районы, которые подвержены эрозии почвы. На основании полученных результатов L.-R. Lagadec и др. (2016) делают вывод, что метод IRIP может быть ценным инструментом для облегчения анализа поверхностного стока и выполнения зонирования участков водосборного бассейна, но он не дает представления о миграции химических веществ, вынесенных с почвой. Судить об их переносе, используя этот метод, можно исключительно косвенно, посредством сопоставления массы вынесенной почвы со средним содержанием имеющихся в ней питательных веществ и агрохимикатов, которые определяются в результате лабораторных исследований отобранных проб почв с репрезентативных участков [28].

В 1997 г. на основе ряда моделей (LISEM, HBV и WOFOST) Европейской комиссией была разработана рабочая распределенная гидрологическая модель осадков – стока с открытым исходным кодом Lisflood, находящаяся в открытом доступе. С ее помощью осуществляют моделирование основных гидрологических процессов, происходящих в зоне водосбора [29]. Целью разработки этой модели являлось создание инструмента (программного продукта), который можно было бы использовать на крупных и транснациональных водосборах для решения различных задач, включая:

- моделирование и прогнозирование наводнений;
- моделирование водных ресурсов, их баланса в водосборных бассейнах водных объектов, в т. ч. процесса таяния снега и поступления (маршрутизации) поверхностного стока в водный объект;
- оценку последствий для водного объекта и его водосборного бассейна в случае изменений в землепользовании;
- оценку последствий проведения различных антропогенных мероприятий, таких как регулирование рек, повышение эффективности использования водных ресурсов и др.;
- оценку последствий изменения климата для водосборного бассейна и водного объекта [29].

В качестве входных компонентов в программном комплексе использованы имеющиеся базы данных, содержащие общеевропейскую информацию о почвах (Kingetal, 1997; Wöstenetal, 1999), почвенно-растительном покрове (СЕС, 1993), топографии (Hiederer & de Roo, 2003) и метеорологии (Rijksetal, 1998) [29]. Моделирование при помощи приложений Lisflood основано на сетке: ячейки сетки имеют размер 100 м для средних водосборов, до 5000 м для моделирования всей Европы и до $0,1^\circ$ (около 10 км) для моделирования в глобальном масштабе [29]. Долгосрочный водный баланс может быть смоделирован с использованием ежедневного временного шага, отдельные события (например, наводнения) – с использованием

часовых временных интервалов (или даже меньше). С помощью этого программного продукта можно моделировать процессы таяния снега, инфильтрацию, перехват осадков, испарение и поглощение воды растительностью, поверхностный сток, преимущественный сток (обход почвенного слоя), обмен почвенной влагой между двумя почвенными слоями и дренаж в грунтовые воды, подпочвенный и подземный сток, а также сток, проходящий с водным потоком через речные русла. Выходные данные могут быть записаны в виде сеток или временных рядов в определенных пользователем точках или областях [29–31].

Еще один программный комплекс получил достаточно широкое распространение в международной практике исследований – это MIKE SHE. В отличие от Lisflood и ряда других программ, программный комплекс MIKE SHE является коммерческой разработкой Датского института гидравлики (Danish Hydraulic Institution – DHI) и не распространяется свободно [32]. Разработчик программы заявляет о том, что с помощью нее можно [32]:

- осуществить комплексную гидрологическую, гидравлическую и качественную оценку качества воды для управления водоснабжением и составлением карт уязвимости;

- произвести оценку количества подземных и поверхностных вод, которые можно использовать для орошения и борьбы с засухой, а также оценить распространение и перемещение пестицидов и питательных веществ с подземным и поверхностным стоком;

- создать целостные планы управления наводнениями для речных, плювиальных и подземных наводнений, которые будут учитывать не только изменение климата, но и варианты землепользования;

- разработать надежные стратегии управления реками и водохранилищами, которые будут включать в себя дождевой сток, наводнения, прогнозирование водного баланса и качества вод;

- произвести количественную оценку комплексного воздействия зем-

лепользования на водосборный бассейн и качество вод водного объекта, а также последствий управления грунтовыми и поверхностными водами и их влияния на качество водно-болотных угодий и планы их восстановления;

- осуществить интеграцию управления водосбором с оценкой рисков и состоянием экосистем.

В России наиболее широкое распространение получили методы геоинформационного моделирования, с помощью которых оценивается эрозийность территорий [8, 13, 33].

Все модели, используемые в описании гидрологии поверхностного стока, имеют уравнения, которые включают в себя множество различных входных данных и переменных состояния. Существуют входные данные, определяющие геометрию водосбора, такие данные обычно считаются постоянными в течение всего периода конкретного моделирования. Есть данные, которые определяют изменяющиеся во времени граничные условия в период осуществления моделирования, к таким данным относятся влажность почвы, осадки и другие метеорологические переменные, которые будут наблюдаться на данном временном шаге. Существуют также переменные состояния, такие как накопление грунтовых вод или глубина их залегания, которые изменяются во время моделирования в результате расчетов модели. Существуют начальные значения переменных состояния, которые определяют состояние водосбора в начальный период времени, он при построении модели совпадает с началом моделирования. Наконец, существуют параметры модели, которые определяют характеристики области водосбора или области течения [34, 35].

Параметры модели могут включать такие характеристики, как пористость и гидравлическая проводимость различных горизонтов почвы в пространственно распределенной модели или среднее время пребывания в зоне насыщения для модели, использующей переменные состояния в масштабе водосбора. Они обычно считаются постоянными в течение пе-

риода моделирования (хотя для некоторых параметров, таких как емкость перехватывающего хранилища – развитого растительного покрова, может существовать сильная временная зависимость, которая может быть определяющей для формирования некоторых моделей). Во всех случаях, даже если они рассматриваются как постоянные во времени, априори нелегко определить значения параметров для конкретного водосбора. Поэтому любая модель требует калибровки после своего создания. Калибровка представляет собой процесс, когда на практике, в полевых условиях определяют соответствие полученных в процессе моделирования результатов реальным данным. Она позволяет корректировать параметры модели, чтобы приблизить к реальным условиям ее выходные данные. При этом наиболее часто используемым методом калибровки параметров модели является метод корректировки значений или их границ для достижения наилучшего соответствия между прогнозами модели и любыми наблюдениями за фактическим откликом водосбора, который возможно выявить и оценить [35, 36].

Выводы. Применение программных продуктов не исключает проведение натурных наблюдений и изысканий, которые позволяют обеспечить исследования исходными (вводимыми) данными, а на заключающем этапе произвести калибровку полученной модели.

Основной задачей, которую решают с помощью моделей, является прогноз и вариация последствий в связи с различными сценариями развития событий (например, изменение вариантов природопользования, интенсивности освоения и нагрузки на водосборную территорию, принятие природоохранных мер и пр.) и поддержка принятия решений на основании полученных прогнозных данных.

Моделирование процессов переноса частиц почвы, питательных и загрязняющих веществ с диффузным потоком представляет особый интерес как для уточнения вклада диффузного стока в валовой объем растворенных загрязнений, взвешенных веществ и наносов, которые обнаружи-

ваются в потоке и русле рек, в воде и донных отложениях водохранилищ, озер и морей, так и для прогнозирования дальнейшего развития ситуации в водосборном бассейне, подбора и принятия мер по улучшению ситуации в нем, оценки эффективности принятых мер.

Учитывая, что время от времени, в результате научно-технического прогресса и накопления нового числа данных может потребоваться внесение изменений и корректировок либо расширение возможностей имеющихся моделей, наиболее актуальными и востребованными в настоящее время считаем программные продукты с открытым исходным кодом и с возможностью широкого доступа к ним всех заинтересованных лиц, что позволяет произвести многофакторную апробацию модели, улучшить ее адаптацию к различным естественным условиям и усовершенствовать посредством многочисленных калибровок.

Список использованных источников

1 Швебс, Г. И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии) / Г. И. Швебс. – Л.: Гидрометиздат, 1974. – 183 с.

2 Коронкевич, Н. И. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек / Н. И. Коронкевич, С. В. Долгов // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 4(72). – С. 103–110. – DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.103–110.

3 Water pollution from agriculture: a global review. Executive summary / J. Mateo-Sagasta, S. Marjani Zadeh, H. Turrall, J. Burke; Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Water Management Institute. – Rome, Colombo, 2017. – 29 p.

4 Bennett, E. M. Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: A global perspective / E. M. Bennett, S. R. Carpenter, N. F. Caraco // BioScience. – 2001. – № 51(3). – P. 227–234. – DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0227:ННОЕРА]2.0.CO;2.

5 Robertson, G. P. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource / G. P. Robertson, P. M. Vitousek // Annual Review of Environment and Resources. – 2009. – Vol. 34(1). – P. 97–125. – DOI: 10.1146/annurev.enviro.032108.105046.

6 The murky future of global water quality: New global study projects rapid deterioration in water quality / IFPRI and Veolia. – 2015. – 12 p.

7 Diffuse Pollution, Degraded Waters. Emerging Policy Solutions [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.oecd.org/environment/resources/Diffuse-Pollution-Degraded-Waters-Policy-Highlights.pdf>, 2020.

8 Михайлов, С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: аналит. обзор / С. А. Михайлов; СО РАН, Ин-т вод. и экол. проблем. – Барнаул: День, 2000. – 130 с.

9 Оценка потерь биогенных веществ с использованием портативной дождевальной установки / Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов, Ю. А. Соловьева, А. В. Прущик, С. И. Санжарова // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 8. – С. 15–18.

10 Егоров, И. Е. Полевые методы изучения почвенной эрозии / И. Е. Егоров // Вестник Удмуртского университета. – 2009. – № 1. – С. 157–169.

11 Изучение зависимости потери биогенных веществ с дождевым стоком от их содержания в почве методом дождевания / Ю. П. Сухановский, Ю. А. Соловьева, В. А. Вытовтов, С. И. Санжарова, А. Г. Титов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 7. – С. 12–17.

12 Дождевание как экспресс-метод изучения водной эрозии почв / А. В. Прущик, Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов, А. Г. Титов // Биология растений и садоводство: теория, инновации. – 2019. – Т. 148. – С. 163–169. – DOI: 10.25684/NBG.scbook.148.2019.17.

13 Сухановский, Ю. П. Компьютерная модель водной эрозии на пахотных гетерогенных склонах 0 (черноземы, гидрология) / Ю. П. Сухановский, А. Н. Пискунов, А. В. Прущик // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 8. – С. 74–78.

14 Critchley, W. Water harvesting (AGL/MISC/17/91) [Electronic resource] / W. Critchley, K. Siegert, C. Chapman. – Rome, 1991. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/u3160e/u3160e00.htm#Contents>, 2020.

15 How sewage pollution ends up in rivers [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.americanrivers.org/threats-solutions/clean-water/sewage-pollution/>, 2020.

16 Лисецкий, Ф. Н. Современные проблемы эрозиоведения / Ф. Н. Лисецкий, А. А. Светличный, С. Г. Черный; под ред. А. А. Светличного. – Белгород: Константа, 2012. – 456 с.

17 Светличный, А. А. Математическое моделирование водной эрозии: проблема классификации // Вестник Одесского национального университета. Географические и геологические науки. – 2010. – Т. 15, вып. 5. – С. 32–39.

18 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) – Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/docs/revised-universal-soil-loss-equation-rusle-welcome-to-rusle-1-and-rusle-2/>, 2020.

19 Незнанова, В. А. Изменение параметров формирования поверхностного и речного стока в современных условиях / В. А. Незнанова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 2, ч. 2. – С. 74–76.

20 Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / С. С. Быховец, М. П. Волокитин, В. В. Демидов, Д. В. Демин, Т. А. Ильина, А. С. Керженцев, О. Е. Киселева, И. Кистнер, Н. В. Коломийцев, Р. Майснер, Г. Оллеш, А. Н. Пискунов, М. Роде, Б. К. Сон, Ю. П. Сухановский; Ин-т фундам. проблем биологии РАН. – М.: Наука, 2006. – 224 с.

21 Математическое моделирование водно-эрозионных процессов на проточных водоемах / К. К. Бейшекеев, И. Абдурасулов, М. К. Ордабаев, А. И. Абдурасулов // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2015. – № 6. – С. 46–48.

22 Пьянков, С. В. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений: монография / С. В. Пьянков, А. Н. Шихов; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – 148 с.

23 Моделирование гидрологических процессов и массопереноса в системе «водосбор – водоем» / С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, К. Д. Крейман, Н. В. Игнатьева // Водные ресурсы. – 1998. – № 2. – С. 571–580.

24 Васильев, С. А. Энергетический подход для построения гидродинамической характеристики водного потока на склоновом агроландшафте / С. А. Васильев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 4. – С. 194–200.

25 The ecohydrological approach, SWAT modelling, and multi-stakeholder engage-

ment – A system solution to diffuse pollution in the Pilica basin, Poland / K. Izydorczyk, M. Piniewski, K. Krauze, L. Courseau, P. Czyż, M. Giełczewski, I. Kardel, P. Marcinkowski, M. Szuwart, M. Zalewski, W. Frątczaka // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 248. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109329.

26 Лычак, А. И. Прогнозное моделирование геоэкологических ситуаций в Крыму с использованием SWAT-моделей / А. И. Лычак, Т. В. Бобра, В. О. Яшенков // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География*. – 2011. – Т. 24(63), № 2, ч. 3. – С. 116–121.

27 The soil and water assessment tool: Historical Development, application, and future research direction / P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, J. G. Arnold // *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. – 2007. – Vol. 50(4). – P. 1211–1250. – DOI: 10.13031/2013.23637.

28 Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method / L.-R. Lagadee, P. Patrice, I. Braud, B. Chazelle, L. Moulin, J. Dehotin, E. Hauchard, P. Breil // *Journal of Hydrology*. – 2016. – Vol. 541, pt. A. – P. 495–509. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.049.

29 Open Source Lisflood [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ec-jrc.github.io/lisflood/>, 2020.

30 Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution / T. J. Coulthard, P. D. Bates, J. C. Neal, J. Ramirez, G. A. M. de Almeida, G. R. Hancock // *Earth Surface Process Landforms*. – 2013. – DOI: 10.1002/esp.3478.

31 Van Der Knijff, J. M. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation / J. M. Van Der Knijff, J. Younis, A. P. J. De Roo // *International Journal of Geographical Information Science* [Electronic resource]. – 2010. – Vol. 24, iss. 2. – P. 189–212. – Mode of access: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810802549154>. – DOI: 10.1080/13658810802549154.

32 Fully integrated hydrological modelling [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she>, 2020.

33 Павлова, А. И. Применение методов цифрового моделирования рельефа для картографирования эрозионных земель / А. И. Павлова // *В мире научных открытий*. – 2016. – № 2(74). – С. 159–169. – DOI: 10.12731/wsd-2016-2-12.

34 Hydrodynamic and sediment transport modeling of New River Inlet (NC) under the interaction of tides and waves / J.-L. Chen, T.-J. Hsu, F. Shi, B. Raubenheimer, S. Elgar // *J. Geophys. Res.* – 2015. – Vol. 120, iss. 6. – P. 4028–4047. – DOI: 10.1002/2014JC010425.

35 Sumita, N. Water quality models: A review / N. Sumita, B. S. Kaur // *Int. J. Res. Granthaalayah*. – 2017. – Vol. 5, iss. 1. – P. 395–398. – DOI: 10.29121/granthaalayah.v5.i1.2017.1914.

36 Beven, K. Rainfall-runoff modelling: the primer / K. Beven. – 2nd ed. – Noida, India, 2012. – 450 p. – DOI: 10.1002/9781119951001.

References

1 Shwebs G.I., 1974. *Formirovanie vodnoy erozii stoka nanosov i ikh otsenka (na primere Ukrainy i Moldavii)* [Formation of water erosion of sediment runoff and their assessment: the example of Ukraine and Moldova Formation]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 183 p. (In Russian).

2 Koronkevich N.I., Dolgov S.V., 2017. *Stok s vodosbora kak istochnik diffuznogo zagryazneniya* [The runoff from a watershed as a source of diffuse river pollution]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and Ecology: Problems and Solutions], no. 4(72), pp. 103–110, DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.103–110. (In Russian).

3 Mateo-Sagasta J., Marjani Zadeh S., Turrall H., Burke J., 2017. Water pollution from agriculture: a global review. Executive summary. Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Water Management Institute. Rome, Colombo, 29 p.

4 Bennett E.M., Carpenter S.R., Caraco N.F., 2001. Human impact on erodable phos-

phorus and eutrophication: A global perspective. *BioScience*, no. 51(3), pp. 227-234, DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2.

5 Robertson G.P., Vitousek P.M., 2009. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 34(1), pp. 97-125, DOI: 10.1146/annurev.enviro.032108.105046.

6 The murky future of global water quality: New global study projects rapid deterioration in water quality. IFPRI and Veolia, 2015, 12 p.

7 Diffuse Pollution, Degraded Waters. Emerging Policy Solutions, available: <https://www.oecd.org/environment/resources/Diffuse-Pollution-Degraded-Waters-Policy-Highlights.pdf> [accessed 2020].

8 Mikhailov S.A., 2000. *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ekosistem. Metody otsenki i matematicheskie modeli: analit. obzor* [Diffuse Pollution of Aquatic Ecosystems. Assessment Methods and Mathematical Models: Analytical Review]. SB RAS, Institute of Water and Environment Problems. Barnaul, Day Publ., 130 p. (In Russian).

9 Sukhanovsky Yu.P., Vytovtov V.A., Solovyova Yu.A., Prushchik A.V., Sanzharova S.I., 2015. *Otsenka poter' biogennykh veshchestv s ispol'zovaniem portativnoy dozhdeval'noy ustanovki* [Method for determination of biogenic substances losses from soil using a portable sprinkler]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of Agroindustrial Complex], vol. 29, no. 8, pp. 15-18. (In Russian).

10 Egorov I.E., 2009. *Polevye metody izucheniya pochvennoy erozii* [Field methods of studying soil erosion]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bull. of Udmurt University], no. 1, pp. 157-169. (In Russian).

11 Sukhanovsky Yu.P., Solovyova Yu.A., Vytovtov V.A., Sanzharova S.I., Titov A.G., 2017. *Izuchenie zavisimosti poteri biogennykh veshchestv s dozhdevym stokom ot ikh sodержaniya v pochve metodom dozhdevaniya* [Studying of influence of biogenic substances content in rainwater on its removal from soil by sprinkling method]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bull. of Kursk State Agricultural Academy], no. 7, pp. 12-17. (In Russian).

12 Prushchik A.V., Sukhanovsky Yu.P., Vytovtov V.A., Titov A.G., 2019. *Dozhdevanie kak ekspress-metod izucheniya vodnoy erozii pochv* [Rainfall simulation as an express-method for studying soil water erosion]. *Biologiya rasteniy i sadovodstvo: teoriya, innovatsii* [Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovations], vol. 148, pp. 163-169, DOI: 10.25684/NBG.scbook.148.2019.17. (In Russian).

13 Sukhanovskiy Yu.P., Piskunov A.N., Prushchik A.V., 2018. *Komp'yuternaya model' vodnoy erozii na pakhotnykh geterogennykh sklonakh TSCHR (chernozemy, gidrologiya)* [Computer model of water erosion on arable heterogeneous slopes of the Central Black Earth region (chernozems, hydrology)]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bull. of Kursk State Agricultural Academy], no. 8, pp. 74-78. (In Russian).

14 Critchley W., Siegert K., Chapman C., 2020. Water harvesting (AGL/MISC/17/91). Rome, 1991, available: <http://www.fao.org/3/u3160e/u3160e00.htm#Contents> [accessed 2020].

15 How sewage pollution ends up in rivers, available: <https://www.americanrivers.org/threats-solutions/clean-water/sewage-pollution/> [accessed 2020].

16 Lisetskiy F.N., Svetlichny A.A., Cherny S.G., 2012. *Sovremennye problemy eroziovedeniya* [Modern Problems of Erosion Studies]. Belgorod, Constanta Publ., 456 p. (In Russian).

17 Svetlichny A.A., 2010. *Matematicheskoe modelirovanie vodnoy erozii: problema klassifikatsii* [Mathematical modeling of water erosion: the problem of classification]. *Vestnik Odesskogo natsional'nogo universiteta. Geograficheskie i geologicheskie nauki* [Bull. of Odessa National University. Geographical and Geological Sciences], vol. 15, no. 5, pp. 32-39. (In Russian).

18 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) – Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2, available: <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation->

laboratory/watershed-physical-processes-research/docs/revise-universal-soil-loss-equation-rusle-welcome-to-rusle-1-and-rusle-2/ [accessed 2020].

19 Neznanova V.A., 2012. *Izmenenie parametrov formirovaniya poverkhnostnogo i rechnogo stoka v sovremennykh usloviyakh* [Changing the parameters of the formation of surface and river runoff under modern conditions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Bull. of the South-West State University. Series: Engineering and Technology], no. 2, pt. 2, pp. 74-76. (In Russian).

20 Bykhovets S.S., Volokitin M.P., Demidov V.V., Demin D.V., Ilyina T.A., Kerzhentsev A.S., Kiseleva O.E., Kistner I., Kolomytsev N.V., Meisner R., Olesh G., Piskunov A.N., Rode M., Son B.K., Sukhanovsky Yu.P., 2006. *Modelirovanie erozionnykh protsessov na territorii malogo vodosbornogo basseyna* [Modeling of erosion processes within a small water catchment basin]. *Institut fundamentalnykh problem biologii RAN* [Institute of Fundamental Problems of Biology RAS]. Moscow, Nauka Publ., 224 p. (In Russian).

21 Beishekeev K.K., Abdurasulov I., Ordabaev M.K., Abdurasulov A.I., 2015. *Matematicheskoe modelirovanie vodno-erozionnykh protsessov na protochnykh vodoemakh* [Mathematical modeling of water-erosion processes on flowing reservoirs]. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana* [Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan], no. 6, pp. 46-48. (In Russian).

22 P'yankov S.V., Shikhov A.N., 2017. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy: monografiya* [Geoinformation Support for Modeling Hydrological Processes and Phenomena: monograph]. Perm State National Research University, Perm, 148 p. (In Russian).

23 Kondrat'ev S.A., Golosov S.D., Kreiman K.D., Ignatieva N.V., 1998. *Modelirovanie gidrologicheskikh protsessov i massoperenosa v sisteme "vodosbor – vodoem"* [Modeling of hydrological processes and mass transport in the “watershed – reservoir” system]. *Vodnye resursy* [Water Resources], no. 2, pp. 571-580. (In Russian).

24 Vasiliev S.A., 2015. *Energeticheskii podkhod dlya postroeniya gidrodinamicheskoy kharakteristiki vodnogo potoka na sklonovom agrolandshafte* [Energy approach for constructing the hydrodynamic characteristics of a water flow on a slope agrolandscape]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bull. of Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 4, pp. 194-200. (In Russian).

25 Izydorczyk K., Piniewski M., Krauze K., Courseau L., Czyż P., Gielczewski M., Kardel I., Marcinkowski P., Szuwart M., Zalewski M., Frątczaka W., 2019. The ecohydrological approach, SWAT modeling, and multi-stakeholder engagement - A system solution to diffuse pollution in the Pilica basin, Poland. *Journal of Environmental Management*, vol. 248, DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109329.

26 Lychak A.I., Bobra T.V., Yashenkov V.O., 2011. *Prognoznnoe modelirovanie geokologicheskikh situatsiy v Krymu s ispol'zovaniyem SWAT-modeley* [Predictive modeling of geocological situations in Crimea using SWAT models]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya* [Proc. Tavricheskiy National University named after V.I. Vernadsky. Series: Geography], vol. 24(63), no. 2, pt. 3, pp. 116-121. (In Russian).

27 Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G., 2007. The soil and water assessment tool: Historical Development, application, and future research direction. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 50(4), pp. 1211-1250, DOI: 10.13031/2013.23637.

28 Lagadec R., Patrice P., Braud I., Chazelle B., Moulin L., Dehotin J., Hauchard E., Breil P., 2016. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology*, vol. 541, pt. A, pp. 495-509, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.049.

29 Open Source Lisflood, available: <https://ec-jrc.github.io/lisflood/> [accessed 2020].

30 Coulthard T.J., Bates P.D., Neal J.C., Ramirez J., De Almeida G.A.M., Hancock G.R.,

2013. Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Process Landforms*, DOI: 10.1002/esp.3478.

31 Van Der Knijff J.M., Younis J., De Roo A.P.J., 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 24, iss. 2, pp. 189-212, available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810802549154>, DOI: 10.1080/13658810802549154.

32 Fully integrated hydrological modeling, available: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she> [accessed 2020].

33 Pavlova A.I., 2016. *Primenenie metodov tsifrovogo modelirovaniya rel'efa dlya kartografirovaniya erozionnykh zemel'* [Application of digital terrain modeling methods for mapping erosional lands]. *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the world of scientific discoveries], no. 2(74), DOI: 10.12731/wsd-2016-2-12. (In Russian).

34 Chen J.-L., Hsu T.-J., Shi F., Raubenheimer B., Elgar S., 2015. Hydrodynamic and sediment transport modeling of New River Inlet (NC) under the interaction of tides and waves. *J. Geophysics Res.*, vol. 120, iss. 6, pp. 4028-4047, DOI: 10.1002/2014JC010425.

35 Sumita N., Kaur B.S., 2017. Water quality models: A review. *Int. J. Res. Granthaalayah*, vol. 5, iss. 1, pp. 395-398, DOI: 10.29121/granthaalayah.v5.i1.2017.1914.

36 Beven K., 2012. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. 2nd ed., Noida, India, 450 p., DOI: 10.1002/9781119951001.

Манжина Светлана Александровна

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Manzhina Svetlana Aleksandrovna

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Матвиенко Анна Олеговна

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Matvienko Anna Olegovna

Position: Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020

После доработки 16.11.2020

Принята к публикации 27.11.2020