

## ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626.86

doi: 10.31774/2658-7890-2022-4-3-1-19

### **Возможности оценки химического состава дренажного стока с сельскохозяйственных полей**

**Светлана Александровна Манжина**

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,  
Российская Федерация, manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

**Аннотация. Цель:** исследование возможностей теоретической оценки химического состава дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных полей, при помощи математического инструментария. **Материалы и методы анализа.** Материалами послужили полученные зарубежными и российскими учеными, в т. ч. и самим автором, данные исследований химического состава коллекторно-дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных полей. В качестве методов использован комплексный анализ и обобщение полученных данных. **Результаты и обсуждение.** Поступление воды в почву сопровождается рядом процессов, обуславливающих миграцию элементов в ней и формирование физико-химических характеристик. Химический состав дренажных вод обусловлен химическим составом почв и других сопредельных сред (водные объекты, подстилающие породы и т. д.) и является результатом естественного процесса формирования геоландшафта и динамики его существования. Основным детерминантом будет являться распределение площадей с различными типами, подтипами и видами почв, а также с различными скоростями инфильтрации, что определяется видом почв и плотностью горизонтов. Инфильтрация для сельскохозяйственных полей имеет сезонную динамику, определяемую как способом обработки почв, так и видом и стадией развития культивируемых растений. В работе предложена модель для определения баланса химических веществ. **Выводы.** Прогнозируя состав дренажного стока, можно определять как количество химических соединений, которые могут поступить в водный объект за определенный период времени, так и динамику химических веществ в почвах с целью корректировки сроков и норм внесения удобрений. Предложенная модель для теоретической оценки химического состава дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных полей, позволит составлять прогнозы баланса веществ между агроэкосистемой и приемниками этих вод. Точность исследования и прогноза с помощью инструментария математического моделирования напрямую зависит от точности калибровки предложенной модели.

**Ключевые слова:** коллекторно-дренажные воды, дренаж, миграция химических веществ, выщелачивание почв, водный баланс территории, грунтовые воды

**Для цитирования:** Манжина С. А. Возможности оценки химического состава дренажного стока с сельскохозяйственных полей // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 3. С. 1–19. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-3-1-19>.

## ECOLOGY

Original article

### **Possibilities for assessing chemical composition of the drainage runoff from agricultural fields**

## Svetlana A. Manzhina

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,  
Russian Federation, manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

**Abstract. Purpose:** to study the possibilities of theoretical assessment of the chemical composition of drainage water discharged from agricultural fields using mathematical tools. **Materials and methods of analysis.** The materials were the research data of the chemical composition of collector-drainage waters discharged from agricultural fields obtained by foreign and Russian scientists, including the author herself. The complex analysis and generalization of the data obtained were used as methods. **Results and discussion.** The water entry into the soil is accompanied by a number of processes that cause the migration of elements in it and the formation of physical-chemical characteristics. The chemical composition of drainage water is determined by the chemical composition of soils and other adjacent environments (water bodies, underlying rocks, etc.) and is the result of the natural process of the geolandscape formation and the dynamics of its existence. The main determinant will be the distribution of areas with different types, subtypes and kinds of soils, as well as with different infiltration rates, which is determined by the type of soil and the density of horizons. Infiltration for agricultural fields has seasonal dynamics, determined both by the tillage method, and by the type and development stage of cultivated plants. The model for determining the balance of chemicals is proposed in this paper. **Conclusions.** Predicting the composition of drainage runoff, it is possible to determine both the amount of chemical compounds that can enter the water body for a particular period of time, and the dynamics of chemicals in soils to adjust the timing and rates of fertilizer application. The proposed model for theoretical assessment of the chemical composition of drainage water discharged from agricultural fields will make it possible to predict the balance of substances between the agroecosystem and the water inlets. The accuracy of research and forecasting with the help of mathematical modeling tools depends directly on the calibration accuracy of the proposed model.

**Keywords:** collector-drainage water, drainage, migration of chemicals, soil leaching, water balance of the territory, groundwater

**For citation:** Manzhina S. A. Possibilities for assessing chemical composition of the drainage runoff from agricultural fields. *Ecology and Water Management*. 2022;4(3):1–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-3-1-19>.

**Введение.** Термин «дренаж» (от англ. drain – осушать) широко применяется в США, Великобритании и других странах для обозначения любого вида осушения почвенных массивов [1]. Этот термин для обозначения процесса и устройства отвода воды с осушаемых и орошаемых земель, с территории застройки, действующих линейных объектов (например, автомобильных дорог и железнодорожного полотна) получил широкое распространение и в бывшем СССР. Практика применения его сохранилась и в Российской Федерации (РФ) [2, 3].

В соответствии со ст. 1 Водного Кодекса РФ (ВК РФ) «дренажные воды – воды, отвод которых осуществляется дренажными сооружениями для

сброса в водные объекты». Под дренажным сооружением понимают устройство для сбора и отвода профильтрованных и подземных вод. Дренажные сооружения бывают открытого и закрытого типа. Сооружения закрытого типа представлены подземными водотоками-дренами (горизонтальными, вертикальными) в виде перфорированных труб или иных полостей (например, штолен, туннелей), в т. ч. коллектора, принимающих избыток грунтовых вод (в т. ч. инфильтрата). Отвод открытым способом предполагает обустройство открытых каналов, траншей, канав, коллекторов, колодцев, в которые вода поступает различными способами: в результате фильтрации, поверхностного (диффузного) стока, за счет организованного источника сброса вод из открытых и закрытых водотоков. В соответствии с п. 72 ГОСТ 26967-86<sup>1</sup> дренажными водами при осушении земель являются воды, поступившие в результате осушения земель в осушительную сеть, а дренажный сток – это сток дренажных вод по осушительной сети (п. 70 ГОСТ 26967-86).

В соответствии со ст. 1 ВК РФ дренажные воды наряду с дождевыми, тальными, инфильтрационными, поливомоечными, сточными водами централизованной системы водоотведения и другими водами, «отведение (сброс) которых осуществляется в водные объекты после их целевого использования или сток которых осуществляется с водосборной площади», отнесены к «сточным водам».

Сточные воды от коммунально-бытовой службы, животноводческие стоки, шахтные и промышленные воды, предназначенные для отведения от места их образования для дальнейшего сброса в водные объекты, проходят обязательную очистку, установленную законодательством РФ, до требуемых нормативных показателей [4, 5]. Дренажные воды, отводимые от линий транспортных дорог, оснований и фундаментов зданий и сооружений, в слу-

---

<sup>1</sup>ГОСТ 26967-86 (СТ СЭВ 5183-85). Гидромелиорация. Термины и определения. Введ. 1986-07-30. М.: Изд-во стандартов, 1986. 8 с.

чае необходимости обустривают локальной системой очистки. Дренажные воды, отводимые с сельскохозяйственных полей, в большинстве своем сбрасываются без предварительной очистки [6–13]. Тем не менее в мировой практике собраны данные о возможном неблагоприятном влиянии дренажных вод с сельскохозяйственных земель на природные экосистемы [14–19], например, в результате выноса ими растворенных солей, элементов питания, взвешенных веществ, биогенов и остатков органики. На химический состав отводимых вод влияют следующие факторы: геология и гидрология, почвы, климат, структура посевов, использование сельскохозяйственных ресурсов, управление ирригацией и дренажем, методы организации отвода и конструктивные решения самого дренажа [14].

Целью исследования является возможность теоретической оценки химического состава дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных полей.

**Материалы и методы анализа.** Материалами послужили полученные зарубежными и российскими учеными, в т. ч. и самим автором, данные исследований химического состава коллекторно-дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных полей, нормативно-методическая документация и тематический инструментарий, описанный в научных публикациях.

В качестве методов использован комплексный анализ и обобщение полученных данных, проводились аналогии между различными разновидностями объекта исследования, на основании чего делались индуктивные умозаключения. Для прогнозирования попадания геоландшафтных и антропогенных компонентов в дренажные воды наилучшие результаты показывают методы лабораторных и полевых исследований, в т. ч. планирования и постановки эксперимента. Прогнозной компонентой таких методов является математическая модель, которая калибруется по результатам длительных наблюдений и экспериментальных исследований.

В настоящее время, руководствуясь ВСН 33-2.2.03-86<sup>2</sup>, составляют водный и солевой баланс зоны аэрации почв и оценивают интенсивность инфильтрационного питания подземных вод для регионов, массивов, участков с учетом характерных периодов их мелиоративного освоения. Расчет для каждой выделенной по гидрогеологическому и почвенно-мелиоративному районированию территории необходимо производить с учетом природно-хозяйственных условий, техники и режима орошения, состава основных сельскохозяйственных культур. Однако использование данной нормы в моделях для детального изучения и прогнозирования экологически обусловленного баланса ионов и органических веществ в водах и почвенном профиле исследуемой территории, который может спровоцировать возникновение и развитие деградации вплоть до утраты устойчивости экосистемы, будет некорректным. В данном случае все большую популярность в мировой практике почвоведения набирает использование концепции педотрансферных функций (ПТФ), что представляет собой прогностические функции определенных свойств почвы с использованием данных почвенных исследований. Для формирования модели ПТФ широко используют различные методы регрессионного и интеллектуального анализа данных для извлечения правил, связывающих основные свойства почвы (легко определяемые в лабораторных и полевых исследованиях) с более трудными для измерения свойствами.

**Результаты и обсуждение.** Согласно данным Росприроднадзора<sup>3</sup>, региональные ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения», имеющие на балансе осушительные системы, если и внесены в список объектов негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), то не по параметрам их сбросов. Согласно информации Фе-

---

<sup>2</sup>Мелиоративные системы и сооружения. Дренаж на орошаемых землях. Нормы проектирования: ВСН 33-2.2.03-86: введ. в действие с 01.01.87. М., 1987. 42 с.

<sup>3</sup>Государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [Электронный ресурс]. URL: <https://70.rpn.gov.ru/opendata/7703381225-reestr-onv> (дата обращения: 28.07.2022).

дерального агентства водных ресурсов<sup>4</sup>, не все региональные бюджетные управления мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения, имеющие на балансе коллекторно-дренажные системы, получают разрешение на сброс вод в водные объекты. Региональные ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения», имеющие на балансе оросительные системы, снабженные коллекторно-дренажной сетью, через которую осуществляется сброс вод в водные объекты, относят к III и IV категориям объектов НВОС<sup>5, 6</sup>.

Считается, что при соблюдении норм и технологии использования агрохимикатов в сельскохозяйственном производстве эти компоненты не попадают в отводимые воды. Эти данные подтверждаются результатами экологического мониторинга, поступившими в Росприроднадзор.

Из анализа ряда полученных данных о химическом составе дренажных вод [8–12] и данных, указанных в характеристиках НВОС – региональных ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения», видим некоторое превышение содержания ряда веществ в дренажном стоке. Остается вопросом: обусловлено ли это экосистемными параметрами, и в первую очередь геохимическим фоном территории, или является результатом загрязнения в процессе возделывания сельскохозяйственных культур? Для оценки возможного химического состава дренажных вод рассмотрим закономерности попадания в них веществ из сопредельных сред.

---

<sup>4</sup>Федеральное агентство водных ресурсов. Информация о предоставлении водных объектов в пользование по состоянию на 28.07.2022 [Электронный ресурс]. URL: [https://voda.gov.ru/activities/informatsiya-o-predostavlenii-vodnykh-obektov-v-polzovanie/558486/?sphrase\\_id=139448](https://voda.gov.ru/activities/informatsiya-o-predostavlenii-vodnykh-obektov-v-polzovanie/558486/?sphrase_id=139448) (дата обращения: 28.07.2022).

<sup>5</sup>Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 31 дек. 2020 г. № 2398. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

<sup>6</sup>Порядок ведения собственниками водных объектов и водопользователями учета объема забора (изъятия) водных ресурсов из водных объектов и объема сброса сточных, в том числе дренажных, вод, их качества [Электронный ресурс]: приказ М-ва природ. ресурсов и экологии РФ от 9 нояб. 2020 г. № 903. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

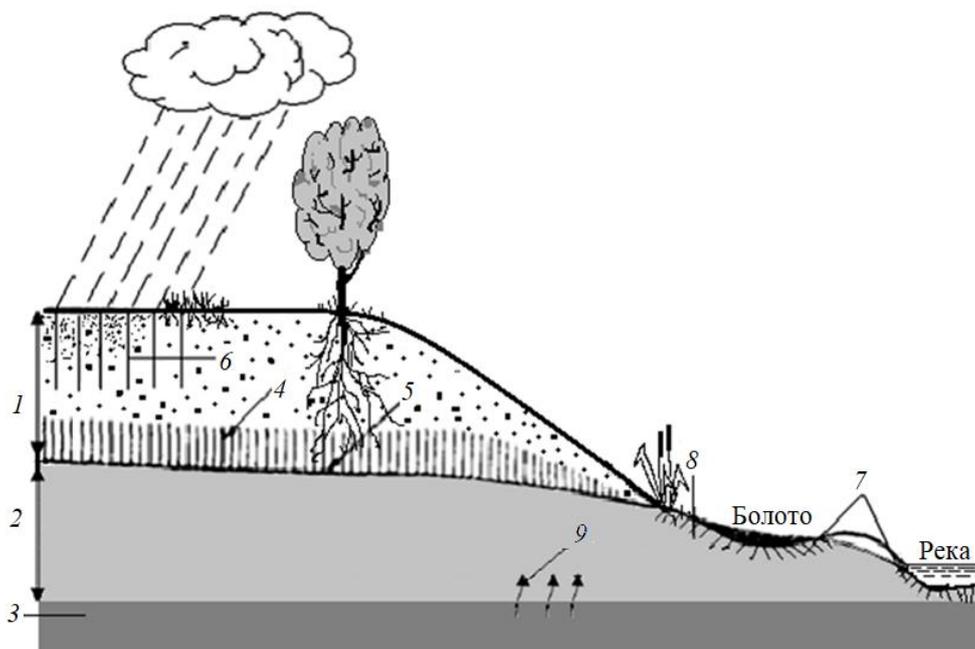
Поступление воды в почву сопровождается процессами, обуславливающими миграцию элементов в ней и формирование физико-химических характеристик. К таким процессам относятся изменение аэрации почв, аккумуляция почвенными частицами химических компонентов, растворенных в самой воде, и выщелачивание почв. Согласно «Большой российской энциклопедии»<sup>7</sup> под выщелачиванием почв понимают «передвижение по почвенному профилю и вымывание за его пределы растворимых солей, в основном щелочных и щелочноземельных металлов, а также мелких минеральных частиц и почвенных коллоидов», в результате этого наблюдается недостаточное насыщение почвенного поглощающего комплекса основаниями, что, в свою очередь, «обуславливает повышение кислотности почв и способствует подзолообразованию». Определяющим фактором для оценки состава поступивших в случае выщелачивания в сбросные воды веществ и их количества будет являться тип почвенного покрова и наличие у него признаков деградации. Результатом выщелачивания будет миграция химических элементов, например, вынос солей в нижние горизонты почв и в грунтовую воду, уменьшение содержания элементов питания растений в верхней части почвенного профиля. Учет показателей грунтовых вод в процессе рассмотрения осушения сельскохозяйственных территорий зависит от уровня их воздействия в связи с глубиной залегания, в т. ч. в условиях обмена ионами через капиллярную кайму.

Под грунтовыми водами понимают все неглубоко залегающие безнапорные и с местным напором подземные воды, дренируемые гидрографической сетью<sup>8</sup>. Состав грунтовых вод складывается, соответственно, из состава пород водоупорного слоя, солей и других химических элементов, вымываемых из почвенного горизонта, и состава профильтровавшихся поверхностных вод, в т. ч. из водных объектов [20, 21] (рисунок 1).

---

<sup>7</sup>Булгаков Д. С. Выщелачивание почвы // Большая российская энциклопедия. Т. 6. М., 2006. С. 167.

<sup>8</sup>Михайлов Л. Е. Грунтовые воды. Конспект лекций / под ред. С. А. Чечкина. Л.: ЛПИ, 1982. 40 с.



1 – зона аэрации; 2 – зона насыщения (грунтовые воды в грунтовом водоносном горизонте); 3 – водонепроницаемый (водоупорный) слой; 4 – капиллярная кайма; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – зона инфильтрации и инфлюации осадков и поверхностного стока; 7 – зона гидравлического взаимодействия грунтовых вод и водных объектов; 8 – зона гипорейка; 9 – просачивание из нижележащих слоев (приток напорных вод) через литологические окна в водоупоре

1 – aeration zone; 2 – saturation zone (groundwater in the groundwater aquifer); 3 – impervious (watertight) layer; 4 – capillary fringe; 5 – water table; 6 – zone of precipitation and surface runoff infiltration and influent; 7 – zone of hydraulic interaction of groundwater and water bodies; 8 – hyporheic zone; 9 – seepage from the underlying layers (pressure water inflow) through lithological windows in confining layer

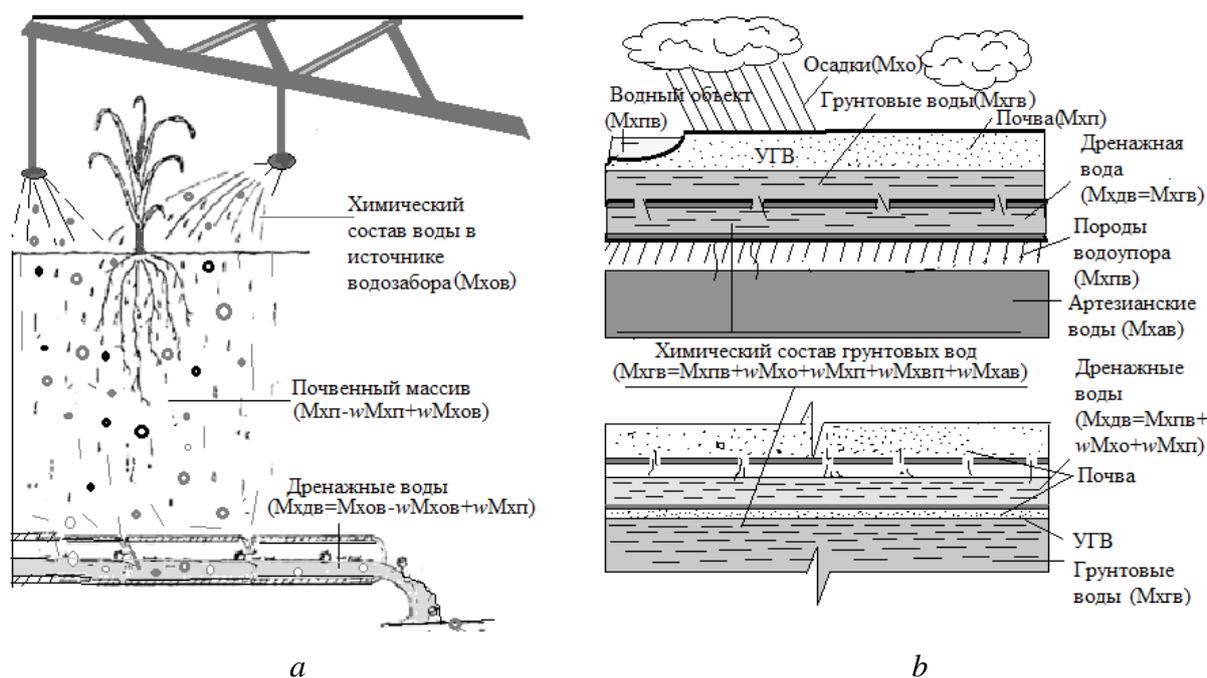
**Рисунок 1 – Схема залегания грунтовых вод**

**Figure 1 – Scheme of groundwater occurrence**

Известно, что происходит активный обмен химическими элементами между почвой и грунтовыми водами в зоне аэрации, который обеспечивается явлениями капиллярного подъема жидкости и диффузии.

Глубина залегания грунтовых вод, температура, их дебит (расход), минерализация подвержены систематическим колебаниям разной периодичности, как правило, ежесуточно, ежемесячно, в течение одного и нескольких лет. При этом основным детерминантом взаимодействия подземных и поверхностных вод, в т. ч. поступивших на поверхность при поливе сельскохозяйственных культур, будет являться распределение площадей с различными типами, подтипами и видами почв, а также с различными скоростями ин-

фильтрации. Следует учитывать, что инфильтрация для сельскохозяйственных полей имеет сезонную динамику, определяемую способом обработки почв, видом и стадией развития культивируемых растений [22, 23]. Отметим, что обнаружение химических компонентов почв и составляющих других сопредельных сред (водные объекты, подстилающие породы) является результатом естественного процесса формирования геоландшафта и динамики его существования (рисунок 2).



*a* – на оросительных системах; *b* – на осушительных системах  
*a* – on irrigation systems; *b* – on drainage systems

**Рисунок 2 – Формирование химического состава дренажных вод**  
**Figure 2 – Formation of chemical composition of drainage water**

Обозначения, принятые на рисунке 2:  $M_{хов}$  – масса химических веществ в оросительной воде, мг/дм<sup>3</sup>;  $M_{хп}$  – масса химических веществ в почве (почвенной вытяжке), мг/кг;  $wM_{хп}$  – масса химических веществ, выщелоченных из почвы, мг/кг;  $wM_{хов}$  – масса химических веществ из оросительной воды, аккумулированных почвенными частицами, мг/кг;  $M_{хдв}$  – масса химического вещества в дренажных водах, мг/дм<sup>3</sup>;  $M_{хгв}$  – масса хи-

мических веществ в грунтовых водах, мг/дм<sup>3</sup>;  $M_{\text{хпв}}$  – масса химических веществ в поверхностных водах, мг/дм<sup>3</sup>;  $M_{\text{хо}}$  – масса химических веществ, содержащихся в осадках, мг/дм<sup>3</sup>;  $M_{\text{хп}}$  – масса химических веществ в почве (почвенной вытяжке), мг/кг;  $M_{\text{хвп}}$  – масса химических веществ в породах, слагающих водоупор, мг/кг;  $M_{\text{хав}}$  – масса химических веществ в артезианских водах, мг/дм<sup>3</sup>;  $w$  – количество соответствующей массы химических веществ, попавшее в грунтовые воды, в долях (доли имеют разное значение для различных веществ).

Известно, что типичный для почв и грунтовых вод состав солей, расположенный по степени растворимости, имеет вид:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ . Скорость перехода солей из почвенного комплекса в состав инфильтрата зависит от наличия и концентрации солей с такими же ионами в профильтровавшейся воде, от температуры, давления, влажности почв и длительности контакта поступивших вод с почвенными частицами определенного горизонта [23–26].

Как показывает ряд исследований [9, 10, 27], проведенных на мелиоративных системах Ростовской области, состав дренажных вод, отводимых с орошаемых полей, приблизительно соответствует составу оросительной воды с привнесенными в нее химическими соединениями, выщелоченными из почвенного массива (рисунок 2 а). В случае достаточно высокого солевого гидрогеоландшафтного фона при орошении пресными водами, по данным архивов и многолетних наблюдений, регистрируется улучшение показателей агроландшафта за счет его рассоления [27].

В случаях с осушением территорий состав дренажных вод теоретически сопоставим с химическим составом осушаемого ландшафта, так как все виды вод, поступающих в него, имеют природный характер происхождения (рисунок 2 б) [11]. Наиболее вероятным антропогенным фактором в данном случае является попадание агрохимикатов в случае либо наруше-

ния требований по их применению, либо неожиданного выпадения ливневых осадков в период, совпадающий с периодом присутствия указанных химических веществ в почвенном слое в несвязанном состоянии.

По собранным данным, на территории РФ химический состав дренажно-сбросных вод весьма разнообразен, зависит от регионального гидрохимического режима и в целом соответствует природным закономерностям галогеохимических процессов [3, 8–11].

Если основываться на оценке взаимодействия дренажных вод с сопредельными средами, в случае отвода их с полей в процессе орошения (пример – рисунок 2 а) математическое выражение состава стока по  $i$ -му иону будет иметь вид:

$$M_{\text{ХДВ}_i} = \sum_{j=1}^n \left[ C_{\text{ХОВ}_i} (1 - w_{1j}) + w_{2j} C_{\text{ХП}_{ij}} \cdot 1000 \cdot \rho_j + w_{3j} C_{\text{ХГВ}_{ij}} \right] \cdot W_{dj},$$

где  $M_{\text{ХДВ}_i}$  – масса  $i$ -го иона в дренажных водах, г;

$C_{\text{ХОВ}_i}$  – концентрация  $i$ -го иона в оросительной воде либо в источнике забора воды на орошение, г/м<sup>3</sup>;

$w_{1j}$ ,  $w_{2j}$  и  $w_{3j}$  – доля химических веществ: 1 – аккумулярованных почвой из оросительной воды на  $j$ -м участке; 2 – выщелоченных из почвы оросительной водой на  $j$ -м участке; 3 – поступивших с грунтовыми водами  $j$ -го участка;

$C_{\text{ХП}_{ij}}$  – концентрация  $i$ -го иона в почвенной вытяжке  $j$ -го участка, мг/кг почвы;

$i$  –  $i$ -й ион, содержащийся в исследуемом компоненте;

$j$  – участок на исследуемой территории, имеющий однородные характеристики по всем физико-химическим параметрам почв (гранулометрический состав, плотность сложения, влажность, химический состав, трещиноватость и т. д.) и по покрытию растительностью, что, в свою очередь, будет определять одинаковые условия водопоглощения и водоперемещения;

$\rho_j$  – плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{ХГВ_{ij}}$  – масса  $i$ -го иона в грунтовых водах (участие грунтовых вод будет определяться уровнем их залегания и попаданием дренажа в область их присутствия, в т. ч. капиллярной каймы), определяемая на  $j$ -м участке,  $г/м^3$ ;

$W_{dj}$  – объем дренажного стока за рассматриваемый период времени с  $j$ -го участка,  $м^3$ .

В случае отвода воды с осушаемой территории для правильного формирования модели химического состава сбросных вод необходимо в первую очередь определиться с типом водного питания осушаемых земель. Выделяют шесть основных типов водного питания: атмосферный, грунтовый, грунтово-напорный, склонный (делювиальный), намывной (аллювиальный) и смешанный (несколько типов водного питания) [28]. Тип водного питания будет определять базовый (фоновый) состав растворенных химических веществ в водах, отводимых с осушаемых территорий. Исходя из приведенного, математическое выражение состава стока по  $i$ -му иону будет иметь вид:

$$M_{ХДВ_i} = \sum_{j=1}^n [C_{ХПВ_{ij}} \cdot (1 - w_{1j}) + w_{2j} C_{ХП_{ij}} \cdot 1000 \cdot \rho_j + w_{3j} C_{ХГВ_{ij}} + C_{ХО_i} \cdot (1 - w_{4j})] \cdot W_{dj},$$

где  $C_{ХПВ_{ij}}$  – концентрация  $i$ -го иона в поверхностных водах на  $j$ -м участке,  $г/м^3$ ;

$w_{1j}$ ,  $w_{2j}$ ,  $w_{3j}$ ,  $w_{4j}$  – доля химических веществ: 1 – аккумулярованных почвой из инфильтрата поверхностных вод на  $j$ -м участке; 2 – выщелоченных из почвы инфильтратом поверхностных вод и (или) атмосферных осадков на  $j$ -м участке; 3 – поступивших с грунтовыми водами  $j$ -го участка; 4 – аккумулярованных почвой из инфильтрата атмосферных осадков на  $j$ -м участке;

$C_{ХО_i}$  – концентрация  $i$ -го иона в осадках,  $г/м^3$ .

Объемы дренажного стока, отведенные коллекторно-дренажной сетью (или отдельными ее элементами) с мелиорируемой территории за определенный период времени, в соответствии с ВСН 33-2.2.03-86 приближенно можно оценить по формуле:

$$W_{dj} = gFt,$$

где  $W_{dj}$  – объем дренажного стока за рассматриваемый период времени на  $j$ -м участке, м<sup>3</sup>;

$g$  – модуль дренажного стока, м<sup>3</sup>/(га·сут);

$F$  – площадь дренируемого участка, га;

$t$  – продолжительность работы дренажа, сут.

В свою очередь модуль дренажного стока можно определить по формуле [29]:

$$g = \frac{\Delta W_{\text{вод}} \cdot \delta}{t},$$

где  $\Delta W_{\text{вод}}$  – объем вод (грунтовых, оросительных, выпавших в виде осадков), подлежащий отводу с осушаемого участка, отражает разность между поступившим на территорию объемом воды и удержанным почвой за соответствующий период времени, м<sup>3</sup>/га;

$\delta$  – удельная водоотдача (влагоотдача) почвы – количество воды, которое можно получить из 1 м<sup>3</sup> почвы, в долях.

Объем вод, поступивший на исследуемый участок, определяется воднобалансовым методом на основании данных наблюдений [29, 30]:

$$\Delta W_{\text{вод}} = W_{\text{вод}} - (W_{\text{п.в.}} - W_{\text{в.гр.}}) - ET_t \cdot \Delta t,$$

где  $\Delta W_{\text{вод}}$  – полный объем влаги – воды, поступившей на осушаемый участок за время наблюдения, м<sup>3</sup>/га;

$W_{\text{п.в.}}$  – полная влагоемкость, определяется суммарным содержанием в 50-сантиметровом слое почвы всех видов воды при полном заполнении всех пор, т. е. максимально возможная влажность для данного типа почв, отмеченная за период наблюдения, м<sup>3</sup>/га;

$W_{\text{в.гр.}}$  – начальная влажность почв, определенная до поступления воды, подлежащей отводу с осушаемого участка, либо в случае отсутствия данных наименьшая влагоемкость, м<sup>3</sup>/га;

$ET_t$  – эвапотранспирация при регистрируемой температуре,  $\text{м}^3/(\text{га}\cdot\text{сут})$  (обычно выражается в  $\text{мм}/\text{сут}$ , для перевода:  $1 \text{ мм}/\text{сут}$  эквивалентен  $10 \text{ м}^3/(\text{га}\cdot\text{сут})$ );

$\Delta t$  – время наблюдения, сут.

Предложенную модель можно использовать для определения баланса химических веществ по схемам «гидромелиорируемая территория → дренажный сток», «вода ↔ почва» и составления прогнозов баланса с высокой степенью вероятности.

На основании моделирования данных, полученных в результате длительных наблюдений за состоянием исследуемого участка и уровнями воздействия на него, в каждом конкретном случае принимается решение об экологической безопасности сбрасываемых с сельскохозяйственных полей дренажных вод и о соответствии их химического состава геохимическому и биохимическому фону агроландшафта.

**Выводы.** Прогнозируя состав дренажного стока, можно определять как количество химических соединений, которые могут поступить в водный объект за определенный период времени, так и динамику химических веществ в почвах с целью корректировки сроков и норм внесения удобрений. Предложенная модель для теоретической оценки химического состава дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных полей, позволит осуществлять прогнозы по балансу веществ между агроэкосистемой и приемниками этих вод. Точность исследования и прогноза с помощью инструментария математического моделирования напрямую зависит от точности калибровки предложенной модели. Калибровка модели традиционно осуществляется на основании имеющихся архивных данных и результатов полевых и лабораторных исследований.

### Список источников

1. Теодоронский В. С., Сабо Е. Д., Фролова В. А. Строительство и эксплуатация объектов ландшафтной архитектуры: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / под ред. В. С. Теодоронского. 4-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 397 с.

2. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85: СП 104.13330.2016: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17. М.: Стандартинформ, 2017. 26 с.

3. Расчет параметров дренажа на орошаемых землях. Пособие к ВСН 33-2.2.03-86. М., 1990. 140 с.

4. Миронов К. В. Справочник геолога-угольщика: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1991. 363 с.

5. Экология: учебник / В. В. Денисов [и др.]. М.: Вуз. кн., 2002. 728 с.

6. Стрельбицкая Е. Б., Соломина А. П. Регулирование нагрузки осушительно-увлажнительных систем на водные объекты // Природообустройство. 2018. № 4. С. 98–104.

7. Кожанов А. Л., Кириленко А. А., Грушко Д. В. Оценка потенциала дренажного стока в России для использования в целях увлажнения с применением осушительно-увлажнительных систем // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2021. Т. 11, № 3. С. 1–18. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1211> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-1-18.

8. Дровозова Т. И., Паненко Н. Н., Манжина С. А. Оценка пригодности воды из открытых коллекторов Семикаракорского района Ростовской области для орошения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2020. № 3(39). С. 154–169. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1144> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-154-169.

9. Экологическое обоснование применения дренажного стока при орошении сельскохозяйственных угодий / Д. Г. Васильев, В. Ц. Челахов, Ю. Е. Домашенко, С. М. Васильев // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. 2019. № 3(03). С. 1–13. URL: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=34> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.31774/2658-7890-2019-3-1-13.

10. Химический состав коллекторно-дренажного стока в открытых каналах Семикаракорского района / Т. И. Дровозова, Т. Ю. Кокина, С. А. Марьяш, Е. С. Кулакова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2019. № 4(36). С. 88–99. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1019> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10/31774/2222-1816-2019-4-88-99.

11. Муромцев Н. А., Шуравилин А. В., Пивень Е. А. Содержание химических веществ в дренажных и речных водах долины реки Москвы и особенности их миграции // АГРО XXI. 2008. № 1–3. С. 46–48.

12. Захаров Р. Ю., Волкова Н. Е. Предупреждение развития экологически опасных процессов на ранее орошаемых землях в Крымском регионе // Экономика строительства и природопользования. 2018. № 2(67). С. 35–42.

13. Agricultural Drainage. Bulletin 871-98. Beneficial and Adverse Water Quality Impacts of Drainage / Ed.: L. A. Zucker, L. C. Brown; Ohio State University. 1998. 91 p.

14. Tanji K. K., Kielen N. C. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. FAO irrigation and drainage paper 61 / Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2002. 190 p.

15. Frankenberger J., Kladvik E. Agricultural and environmental impacts of drainage [Electronic resource]. URL: <https://engineering.purdue.edu/SafeWater/Drainage/drainintro.htm> [date of access: 01.06.2022].

16. Management of agricultural drainage water quality. Water Reports 13 [Electronic resource] / Ed.: C. A. Madramootoo, W. R. Johnston, L. S. Willardson; FAO. Rome, 1997. URL: <https://www.fao.org/3/w7224e/w7224e00.htm#Contents> [date of access: 01.06.2022].

17. Zubarev V. A., Mazhaysky Yu. A., Guseva T. M. The impact of drainage reclama-

tion on the components of agricultural landscapes of small rivers // *Agronomy Research*. 2020. 18(4). P. 2677–2686. <https://doi.org/10.15159/ar.20.218>.

18. Дровозова Т. И., Кириленко А. А. Проблема «солевого загрязнения» природных вод Ростовской области, приуроченных к орошаемому массиву // *Экология и водное хозяйство* [Электронный ресурс]. 2021. Т. 3, № 3. С. 55–71. URL: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=122> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.31774/2658-7890-2021-3-3-55-71.

19. Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review / M. V. Carstensen, F. Hashemi, C. C. Hoffmann, D. Zak, J. Audet, B. Kronvang // *Ambio*. 2020. 49. P. 1820–1837. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01345-5>.

20. Гидрохимический режим и качество грунтовых вод застроенных территорий на юге Ростовской области / А. М. Никаноров, Д. Н. Гарькуша, Е. А. Зубков, О. Б. Барцев, Л. И. Минина // *Водные ресурсы*. 2018. № 2(45). С. 171–178. DOI: 10.7868/S0321059618020062.

21. Тернов А. Ф. Гидравлика грунтовых вод: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2010. 63 с.

22. Macheleidt W., Nestler W., Grischek T. Determination of hydraulic boundary conditions for the interaction between surface water and groundwater // *Geological Society London Special Publications*. 2002. 193(1). P. 235–243. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.17>.

23. Бабилов Б. В., Пахучий В. В. Гидротехнические мелиорации (осушение лесных земель): учеб. пособие / Сыктывк. лес. ин-т. Сыктывкар: СЛИ, 2014. 160 с.

24. Мамонтов В. Г., Гладков А. А., Кузелев М. М. Практическое руководство по химии почв: учеб. пособие / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Рос. гос. аграр. ун-т – МСХА им. К. А. Тимирязева. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2012. 225 с.

25. Орлов Д. С. Химия почв: учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 376 с.

26. Кац Д. М., Пашковский И. С. Мелиоративная гидрогеология. М.: Агропромиздат, 1988. 256 с.

27. Дровозова Т. И., Паненко Н. Н., Чигрин А. А. Изучение динамики химических элементов в орошаемых почвах Семикаракорского района Ростовской области // *Охрана биоразнообразия и экологические проблемы природопользования: сб. ст. всерос. (нац.) науч.-практ. конф.* 2020. С. 103–105.

28. Залесов С. В., Тукачева А. В. Гидролесомелиорация избыточно увлажненных земель. Термины, понятия и определения: учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2018. 67 с.

29. Мелиорация земель / А. И. Голованов [и др.]; под ред. А. И. Голованова. М.: Колос, 2011. 824 с.

30. Дровозова Т. И., Марьяш С. А. Определение объемов дренажного стока с орошаемых земель Семикаракорского района Ростовской области // *Мелиорация и водное хозяйство: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 130-летию со дня рождения акад. Б. А. Шумакова*. Новочеркасск: Лик, 2019. С. 103–106.

## References

1. Teodoronsky V. S., Sabo E. D., Frolova V. A., 2019. *Stroitel'stvo i ekspluatatsiya ob"ektov landshaftnoy arkhitektury: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Construction and Operation of Objects of Landscape Architecture: Textbook for Students of Higher Educational Institutions]. 4<sup>th</sup> ed., rev. and add., Moscow, Yurayt Publ., 397 p. (In Russian).

2. *Inzhenernaya zashchita territorii ot zatopleniya i podtopleniya* [Engineering protection of the territory against flooding and underflooding]. Updated edition of SNiP 2.06.15-85. SP 104.13330.2016. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 26 p. (In Russian).

3. *Raschet parametrov drenazha na oroshaemykh zemlyakh* [Calculation of Drainage Parameters on Irrigated Lands]. Textbook for ISCS 33-2.2.03-86. Moscow, 1990, 140 p. (In Russian).

4. Mironov K. V., 1991. *Spravochnik geologa-ugol'shchika: spravochnik* [Handbook of a Coal Geologist: a handbook]. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and add., Moscow, Nedra Publ., 363 p. (In Russian).

5. Denisov V. V. [et al.], 2002. *Ekologiya: uchebnik* [Ecology: textbook]. Moscow, Vuzbook Publ., 728 p. (In Russian).

6. Strelbitskaya E. B., Solomina A. P., 2018. *Regulirovanie nagruzki osushitel'no-uvlazhni-  
tel'nykh sistem na vodnye ob"ekty* [Regulation of the loading of drainage and humidification systems  
on water bodies]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 98-104.  
(In Russian).

7. Kozhanov A. L., Kirilenko A. A., Grushko D. V., 2021. [Drainage runoff potential as-  
sessment in Russia for humidification with drainage and humidification systems]. *Melioratsiya  
i gidrotehnika*, vol. 11, no. 3, pp. 1-18, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1211> [ac-  
cessed 01.06.2022], DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-1-18. (In Russian).

8. Drovovozova T. I., Panenko N. N., Manzhina S. A., 2020. [Assessment of water  
availability from open collectors of Semikarakorsky district Rostov region for irrigation].  
*Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 3(39), pp. 154-169, available:  
<http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1144> [accessed 01.06.2022], DOI: 10.31774/2222-1816-  
2020-3-154-169. (In Russian).

9. Vasiliev D. G., Chelakhov V. Ts., Domashenko Yu. Ye, Vasiliev S. M., 2019. [Eco-  
logical justification of drainage flow application when irrigating agricultural lands]. *Ekologiya i  
vodnoe khozyaystvo*, no. 3(03), pp. 1-13, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=34>  
[accessed 01.06.2022], DOI: 10.31774/2658-7890-2019-3-1-13. (In Russian).

10. Drovovozova T. I., Kokina T. Yu., Maryash S. A., Kulakova E. S., 2019. [Chemical  
composition of the collector-drainage runoff in the open canals of Semikarakorsk region].  
*Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 4(36), pp. 88-99, available:  
<http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1019> [accessed 01.06.2022], DOI: 10/31774/2222-1816-  
2019-4-88-99. (In Russian).

11. Muromtsev N. A., Shuravilin A. V., Piven E. A., 2008. *Soderzhanie khimicheskikh  
veshchestv v drenazhnykh i rechnykh vodakh doliny reki Moskvy i osobennosti ikh migratsii*  
[Content of chemicals in drainage and river waters of the Moskva river valley and features of  
their migration]. *Agro XXI* [AGRO XXI], no. 1-3, pp. 46-48. (In Russian).

12. Zakharov R. Yu., Volkova N. E., 2018. *Preduprezhdenie razvitiya ekologicheskoi  
opasnykh protsessov na ranee oroshaemykh zemlyakh v Krymskom regione* [Prevention of the  
development of environmentally hazardous processes on previously irrigated lands in the Cri-  
mean region]. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya* [Construction Economics and En-  
vironmental Management], no. 2(67), pp. 35-42. (In Russian).

13. Zucker L. A., Brown L. C., 1998. Beneficial and Adverse Water Quality Impacts of  
Drainage. *Agricultural Drainage. Bulletin 871-98*. Ohio State University, 91 p.

14. Tanji K. K., Kielen N. C., 2002. *Agricultural drainage water management in arid and  
semi-arid areas*. FAO irrigation and drainage paper 61. Food and Agriculture Organization of  
the United Nations. Rome, 190 p.

15. Frankenberger J., Kladvko E. *Agricultural and environmental impacts of drainage*,  
available: <https://engineering.purdue.edu/SafeWater/Drainage/drainintro.htm> [accessed 01.06.2022].

16. Madramootoo C. A., Johnston W. R., Willardson L. S., 1997. *Management of agri-  
cultural drainage water quality*. Water Reports 13. FAO. Rome, available: [https://www.fao.org/3/  
w7224e/w7224e00.htm#Contents](https://www.fao.org/3/w7224e/w7224e00.htm#Contents) [accessed 01.06.2022].

17. Zubarev V. A., Mazhaysky Yu. A., Guseva T. M., 2020. The impact of drainage rec-  
lamation on the components of agricultural landscapes of small rivers. *Agronomy Research*,  
18(4), pp. 2677-2686, <https://doi.org/10.15159/ar.20.218>.

18. Drovovozova T. I., Kirilenko A. A., 2021. [The problem of “saline contamination” of  
natural waters of Rostov region, confined to the irrigated area]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo*,

vol. 3, no. 3, pp. 55-71, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=122> [accessed 01.06.2022], DOI: 10.31774/2658-7890-2021-3-3-55-71. (In Russian).

19. Carstensen M. V., Hashemi F., Hoffmann C. C., Zak D., Audet J., Kronvang B., 2020. Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review. *Ambio*, 49, pp. 1820-1837, <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01345-5>.

20. Nikanorov A. M., Garkusha D. N., Zubkov E. A., Bartsev O. B., Minina L. I., 2018. *Gidrokhimicheskiy rezhim i kachestvo gruntovykh vod zastroyennykh territoriy na yuge Rostovskoy oblasti* [Hydrochemical regime and quality of subsoil water in built-up territories in the southern Rostov region]. *Vodnye resursy* [Water Resources], no. 2(45), pp. 171-178, DOI: 10.7868/S0321059618020062. (In Russian).

21. Ternov A. F., 2010. *Gidravlika gruntovykh vod: uchebnoe posobie* [Groundwater Hydraulics: textbook]. Tomsk, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 63 p. (In Russian).

22. Macheleidt W., Nestler W., Grischek T., 2002. Determination of hydraulic boundary conditions for the interaction between surface water and groundwater. *Geological Society London Special Publications*, 193(1), pp. 235-243, <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.17>.

23. Babikov B. V., Pakhuchy V. V., 2014. *Gidrotekhnicheskie melioratsii (osushenie lesnykh zemel'): uchebnoe posobie* [Hydraulic Reclamation (Drainage of Forest Lands): textbook]. Syktyvkar Forestry Institute, Syktyvkar, 160 p. (In Russian).

24. Mamontov V. G., Gladkov A. A., Kuzelev M. M., 2012. *Prakticheskoe rukovodstvo po khimii pochv: uchebnoe posobie* [Practical Guide into Soil Chemistry: textbook]. Ministry of Agriculture of the RF, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Moscow, RGAU-MSHA Publ., 225 p. (In Russian).

25. Orlov D. S., 1985. *Khimiya pochv: uchebnik* [Soil Chemistry: textbook]. Moscow, Moscow University Publ., 376 p. (In Russian).

26. Kats D. M., Pashkovsky I.S., 1988. *Meliorativnaya gidrogeologiya* [Land Reclamation Hydrogeology]. Moscow, Agroprom Publ., 256 p. (In Russian).

27. Drovovozova T. I., Panenko N. N., Chigrin A. A., 2020. *Izuchenie dinamiki khimicheskikh elementov v oroshaemykh pochvakh Semikarakorskogo rayona Rostovskoy oblasti* [Study of dynamics of chemical elements in irrigated soils of Semikarakorsky district Rostov region]. *Okhrana bioraznoobraziya i ekologicheskie problemy prirodopol'zovaniya: sbornik statey vseros. (natsionalnoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Biodiversity Protection and Ecological Problems of Nature Management: Proc. of All-Russian (National) Scientific-Practical Conference], pp. 103-105. (In Russian).

28. Zalesov S. V., Tukacheva A. V., 2018. *Gidrolesomelioratsiya izbytochno uvlazhnennykh zemel'. Terminy, ponyatiya i opredeleniya: uchebnoe posobie* [Hydroforestry Reclamation of Excessively Moistened Lands. Terms, Concepts and Definitions: textbook]. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University, 67 p. (In Russian).

29. Golovanov A. I. [et al.], 2011. *Melioratsiya zemel'* [Land Reclamation]. Moscow, Kolos Publ., 824 p. (In Russian).

30. Drovovozova T. I., Maryash S. A., 2019. *Opredelenie ob'emov drenazhnogo stoka s oroshaemykh zemel' Semikarakorskogo rayona Rostovskoy oblasti* [Determination of the volume of drainage runoff from irrigated lands of Semikarakorsky district Rostov region]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo: materialy Vseros. nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 130-letiyu so dnya rozhdeniya akad. B. A. Shumakova* [Land Reclamation and Water Management: Proc. of All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation, devoted to 130<sup>th</sup> anniversary of the birth of Academician B. A. Shumakov]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 103-106. (In Russian).

---

#### **Информация об авторе**

**С. А. Манжина** – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент.

Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 3. С. 1–19.  
Ecology and water management. 2022. Vol. 4, no. 3. P. 1–19.

***Information about the author***

**S. A. Manzhina** – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

*Автор несет ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*The author is responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

*The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 16.08.2022; принята к публикации 12.09.2022.*

*The article was submitted 01.06.2022; approved after reviewing 16.08.2022; accepted for publication 12.09.2022.*