

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.62

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-202-223

Районирование при обосновании вероятности необходимости осушения земель и методы снижения загрязненности дренажного стока

Александр Михайлович Бакштанин¹, Вячеслав Николаевич Маркин²,
Ирина Викторовна Глазунова³, Светлана Анатольевна Соколова⁴,
Татьяна Ивановна Матвеева⁵, Маргарита Александровна Ширяева⁶

^{1, 2, 3, 4, 5}Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

⁶Федеральный научный центр гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Российская Федерация

¹bakshatin@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9307-0865>

²mvnarkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0976-371X>

³ivglazunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

⁴sokolovasvetlana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>

⁵timatveeva@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5598-8189>

⁶Shiryaeva.MA@fncg.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>

Аннотация. Цель: разработка механизмов районирования территорий по необходимости осушения земель и объемам вымыва веществ с дренажным стоком и выделение методов снижения загрязненности дренажного стока. Все выкладки сделаны на примере макрозоального районирования осушения при выращивании стратегически важных культур: яровой пшеницы и картофеля – на примере европейской части России. **Материалы и методы.** Обоснование осушения выполнено с помощью биоклиматического метода В. В. Шабанова. Использована методика анализа размерностей и лабораторные опыты по промывке монолитов почвы для определения основных факторов, влияющих на вымыв веществ из почвы. **Результаты.** Выполнено обоснование мелиоративных мероприятий (осушения) по регионам и областям РФ на примере зерновых и картофеля. Основные водоохранные мероприятия, снижающие загрязняющее воздействие на водоприемники со стороны дренажного стока, включают: создание биологических инженерных сооружений; пассивные мероприятия – точную мелиорацию, направленную на управление условиями формирования дренажного стока с учетом почвенной неоднородности на основе районирования осушения и объемов вымыва биогенов с осушаемых земель. **Выводы.** Сделано районирование европейской части России по необходимости осушения. Низкая степень потребности в осушении земель при выращивании яровой пшеницы отмечена примерно на 40 % площади. Высокая степень – на 50 %. При выращивании картофеля данные территории соответственно составляют 20 и 50 % площади. Выявлено влияние факторов на формирование дренажного стока и объемов вымыва веществ. Предложены водоохранные мероприятия: устройство биологических инженерных сооружений и проведение точной мелиорации как способа управления водным режимом почв.

Ключевые слова: осушение, дренажный сток, районирование территорий, вероятность необходимости осушения, загрязнение дренажного стока, формирование дренажного стока, биоинженерные сооружения



Для цитирования: Районирование при обосновании вероятности необходимости осушения земель и методы снижения загрязненности дренажного стока / А. М. Бакштанин, В. Н. Маркин, И. В. Глазунова, С. А. Соколова, Т. И. Матвеева, М. А. Ширяева // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 4. С. 202–223. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-202-223>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Zoning when justifying the probability of demand for land drainage and methods for reducing pollution of drainage runoff

Alexander M. Bakshtanin¹, Vyacheslav N. Markin², Irina V. Glazunova³, Svetlana A. Sokolova⁴, Tatyana I. Matveeva⁵, Margarita A. Shiryaeva⁶

^{1, 2, 3, 4, 5}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

⁶Federal Scientific Center of Hygiene named after F. F. Erisman of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Mytishchi, Russian Federation

¹bakshtanin@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9307-0865>

²mvnarkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0976-371X>

³ivglazunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

⁴sokolovasvetlana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>

⁵timatveeva@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5598-8189>

⁶Shiryaeva.MA@fncg.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>

Abstract. Purpose: to develop mechanisms for territory zoning according to demand for land drainage and the volume of substances leaching with drainage runoff and to identify the methods for reducing the pollution of drainage runoff. All calculations are made using the example of macrozonal zoning of drainage when growing strategically important crops: spring wheat and potatoes – using the example of the European part of Russia. **Materials and methods.** The justification for drainage was carried out using the bioclimatic method of V. V. Shabanov. A dimensional analysis technique and laboratory experiments on leaching soil monoliths for determining the main factors influencing the leaching of substances from soil were used. **Results.** A justification of reclamation measures (drainage) for regions and districts of the Russian Federation was carried out using the example of grains and potatoes. The main water protection measures reducing the polluting impact on water intakes from drainage runoff include: the creation of biological engineering structures; passive measures – precise reclamation aimed at managing the conditions for the drainage runoff formation, taking into account soil heterogeneity based on the zoning of drainage and the volume of nutrient leaching from drained lands. **Conclusions.** The European part of Russia has been zoned based on demand for drainage. A low degree of demand for land drainage when growing spring wheat was noted on approximately 40 % of the area and high degree was noted on 50 %. When growing potatoes, these areas account for 20 and 50 % of the area, respectively. The influence of factors on the drainage runoff formation and the volume of substance leaching was revealed. Water protection measures are proposed: construction of biological engineering structures and carrying out precise reclamation as a way to control the water regime of soils.

Keywords: drainage, drainage runoff, territory zoning, probability of demand for drainage, drainage runoff pollution, drainage runoff formation, bioengineering structures

For citation: Bakshtanin A. M., Markin V. N., Glazunova I. V., Sokolova S. A., Matveeva T. I., Shiryayeva M. A. Zoning when justifying the probability of demand for land drainage and methods for reducing pollution of drainage runoff. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(4):202–223. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-202-223>.

Введение. Осушение земель – это один из видов управления водным режимом почв. Осуществляется осушение с целью создания оптимальных условий для повышения почвенного плодородия и урожайности выращиваемых растений. Задача осложняется почвенной неоднородностью, в т. ч. водно-физических характеристик почв, которые учитываются посредством ранжирования территорий. При ранжировании выделяются кластеры, в пределах которых условия можно считать относительно однородными по соответствующим характеристикам. Неоднородность различается в зависимости от масштабов решения вопросов на макро-, мезо- и микронеоднородность.

Макронеоднородность (в пределах регионов) в мелиорации учитывается при обосновании вида мелиоративного воздействия (водные мелиорации, тепловые, пищевые, солевые и др.), обосновании вида севооборотов и подборе культур (наилучшим образом соответствующих конкретным условиям). Мезонеоднородность учитывается при выделении участков, в пределах севооборотов, при обосновании размещения культур и степени мелиоративного воздействия. Микронеоднородность учитывается при выделении участков в пределах поля для регулирования почвенных характеристик [1].

Районирование земель для целей мелиорации делается по характеристикам почвенного плодородия, которые подвергаются управляющему воздействию. При осушении земель это почвенные влагозапасы и мощность зоны аэрации. Характеристики отражают природные и мелиоративно-хозяйственные условия, что позволяет учитывать:

- условия почвообразования и изменение плодородия под влиянием мелиорации;
- допустимость мелиоративного воздействия.

Влияние мелиорации на почвообразование связано с изменением водного, теплового, пищевого и других режимов, которые характерны для определенных природных условий. Конкретные природные условия определили ход естественного почвообразования и формирования конкретных типов почв, свойств и необходимого для создания устойчивых экосистем и их биоценозов разнообразия (почвенной неоднородности). Мелиорация направлена на сохранение типа почв и повышение их плодородия на основе оказания экологически допустимого воздействия на каждый элемент почвенной неоднородности. Последнее осуществляется на основе районирования земель. Районирование позволяет дифференцированно управлять факторами среды с учетом почвенной неоднородности с повышением урожайности растений на фоне экономии ресурсов [1].

Большие масштабы растениеводства и широкий ассортимент выращиваемых растений, каждое из которых предъявляет специфические требования к условиям выращивания, определяют значительное воздействие на природные экосистемы. Поэтому требуется строгое обоснование вида и степени мелиоративного воздействия, в первую очередь связанного с управлением водным режимом почв. Последнее обосновано тем, что именно гидромелиорация позволяет оперативно управлять не только водным режимом почв, но и тепловым и пищевым режимами.

В данной работе рассматриваются аспекты осушения земель. Интерес обоснован следующим. Осушение связано с увеличением дренированности земель, а следовательно, ростом вымыва веществ из почвы, что повышает опасность загрязнения не только самого дренажного стока, но и вод водоприемников дренажного стока.

Цель работы – разработка механизмов районирования территорий на макроуровне по необходимости осушения земель и объемам вымыва веществ с дренажным стоком для обоснования методов снижения загрязненности дренажного стока (на примере европейской части России при выращивании стратегически важных культур: яровой пшеницы и картофеля).

Материалы и методы. Районирование осушения осуществляется с помощью соответствующих методов, которые должны учитывать природно-климатические особенности территорий (условия среды) и биологические особенности сельскохозяйственных культур (требования растений). Данным условиям удовлетворяет биоклиматический метод В. В. Шабанова¹ [2]. Он основан на сопоставлении требований растений с условиями среды по конкретному фактору. Под требованиями растений понимается функция продуктивности (U) от рассматриваемого фактора (φ). Условия среды полностью описываются законом распределения фактора $f(\varphi)$.

Требования растений описываются функцией [3]:

$$U'_{\varphi} = \left(\frac{\varphi'}{\varphi'_{\text{opt}}} \right)^{\gamma \cdot \varphi'_{\text{opt}}} \cdot \left(\frac{1 - \varphi'}{1 - \varphi'_{\text{opt}}} \right)^{\gamma \cdot (1 - \varphi'_{\text{opt}})},$$

$$\varphi' = \frac{\varphi - \varphi_{\text{min}}}{\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}}},$$

$$U'_{\varphi} = \frac{U}{U_{\text{max}}},$$

где γ – коэффициент саморегуляции растений под действием фактора среды;

φ'_{opt} – оптимальное относительное значение фактора;

φ_{max} , φ_{min} – максимальное и минимальное значения фактора. В отношении водного режима почв это полная влагоемкость (ПВ) и влагоемкость при влажности завядания (ВЗ);

U , U'_{φ} – абсолютная фактическая и относительная продуктивность растения.

Параметры требований яровой пшеницы и картофеля к почвенным влагозапасам, взятые из агроклиматических справочников по рассматриваемым культурам, приведены в таблице 1.

¹Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций. М.: Гидрометеиздат, 1973. 165 с.

Таблица 1 – Параметры требований растений к водному фактору
Table 1 – Parameters of plant requirements for water factor

Вид растений	Водный фактор	
	W'_{opt}	γ_w
Яровая пшеница	0,56	6,2
Картофель	0,62	5,6

На рисунке 1 показан вид зависимости, иллюстрирующей требования растений к почвенным влагозапасам (W). Оптимальный предел регулирования почвенных влагозапасов (от W_1 до W_2) определяется на уровне плановой продуктивности, например, 0,8 от максимально возможной в конкретных условиях (U_{max}).

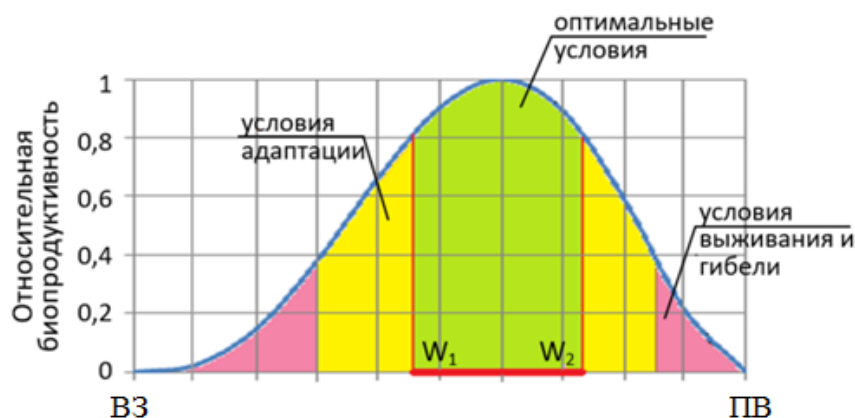


Рисунок 1 – Вид зависимости относительной продуктивности растений от почвенных влагозапасов

Figure 1 – Type of dependence of relative plant productivity on soil moisture reserves

Закон распределения почвенных влагозапасов (водного фактора) хорошо соответствует нормальному распределению [4], которое определяется средним значением фактора (W_{cp}) и его среднеквадратическим отклонением (σ). Удобно использовать относительный закон распределения:

$$f(W) = e^{-\frac{(W-W_{cp})^2}{2\sigma^2}}.$$

Нижнее (W_1) и верхнее (W_2) значения оптимального предела изменения фактора позволяют выделить под кривой распределения области, площади которых соответствуют (рисунок 2):

- вероятности необходимости понижения значения фактора $P \downarrow$, в случае регулирования водного режима почв – необходимости осушения;
- вероятности необходимости повышения значения фактора $P \uparrow$, например, необходимости орошения;
- вероятности оптимальности условий P_{opt} , т. е. условия среды отвечают требованиям растений.

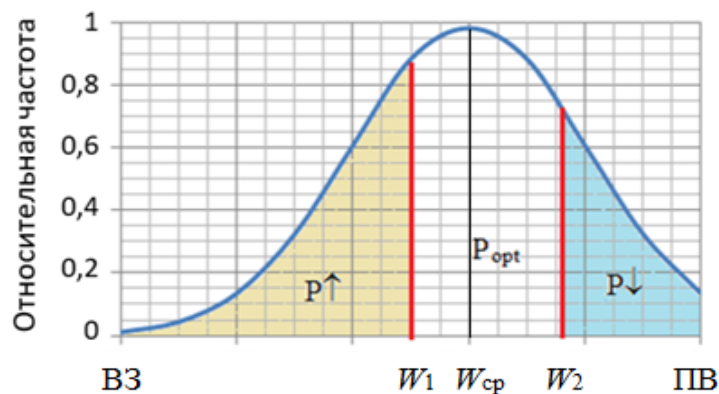


Рисунок 2 – Кривая распределения фактора среды и области мелиоративного воздействия
Figure 2 – Environmental factor distribution curve and areas of reclamation impact

Значения вероятностей определяются с помощью функции Лапласа. Данная функция зависит от относительных влагозапасов, которые определяются по формуле:

$$W' = 5 - \frac{W_{cp} - W}{\sigma}. \quad (1)$$

Функция Лапласа позволяет получать значения вероятности для заданного значения влагозапасов табличным или графическим способом. Такая процедура не всегда подходит для обработки больших массивов данных, которые необходимы при районировании территорий. Поэтому была подобрана простая S-образная функция [3], хорошо соответствующая функции Лапласа, %:

$$P = \frac{100}{1 + \exp(1,7 \cdot (5 - W'))}.$$

Вероятность необходимости осушения определится с учетом формулы (1) по формуле, %:

$$P \downarrow = 100 - \frac{100}{1 + \exp\left(1,7 \cdot \left(\frac{W_{\text{cp}} - W_2}{\sigma}\right)\right)}.$$

В таблице 2 представлены характеристики водных условий почв для разных областей европейской части России, полученные по результатам исследований В. В. Шабанова и В. Н. Маркина² [1, 3].

Таблица 2 – Средние за вегетационный период продуктивные влагозапасы в слое почвы 0–50 см W_{cp} и среднеквадратическое отклонение почвенных влагозапасов σ_w по регионам России

Table 2 – Average productive moisture reserves for the growing season in the soil layer 0–50 cm W_{cp} and standard deviation of soil moisture reserves σ_w by regions of Russia

Регион	W_{cp} , мм	σ_w , мм
Северо-Западный	180–200	60–75
Центральный	85–192	30–70
Приволжский	80–150	30–60
Южный	95–115	40–50
Северо-Кавказский	70	36

При статистической обработке расчетов вероятности необходимости гидромелиоративных мероприятий выявлена корреляция с гидротермическим коэффициентом, который является климатической характеристикой среды (ГТК). Это позволяет в первом приближении оценить потребность в гидромелиоративных мероприятиях.

Яровая пшеница:

$$P \downarrow = \frac{\text{ГТК} + 0,8}{1,2}, r = 0,906 \pm 0,03,$$

$$P \uparrow = \frac{1,58 - \text{ГТК}}{0,85}, r = -0,820 \pm 0,04.$$

Картофель:

²Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций.

$$P \downarrow = \frac{\text{ГТК} + 0,8}{1,2}, r = 0,874 \pm 0,02,$$
$$P \uparrow = \frac{1,6 - \text{ГТК}}{0,75}, r = -0,780 \pm 0,03.$$

Построены карты европейской части России (в системе NextGIS и QGIS), на них выделены зоны с разной степенью потребности в осушении земель на примере яровой пшеницы и картофеля. Для экстраполяции данных по областям использованы зависимости вероятностей от ГТК (рисунок 3).

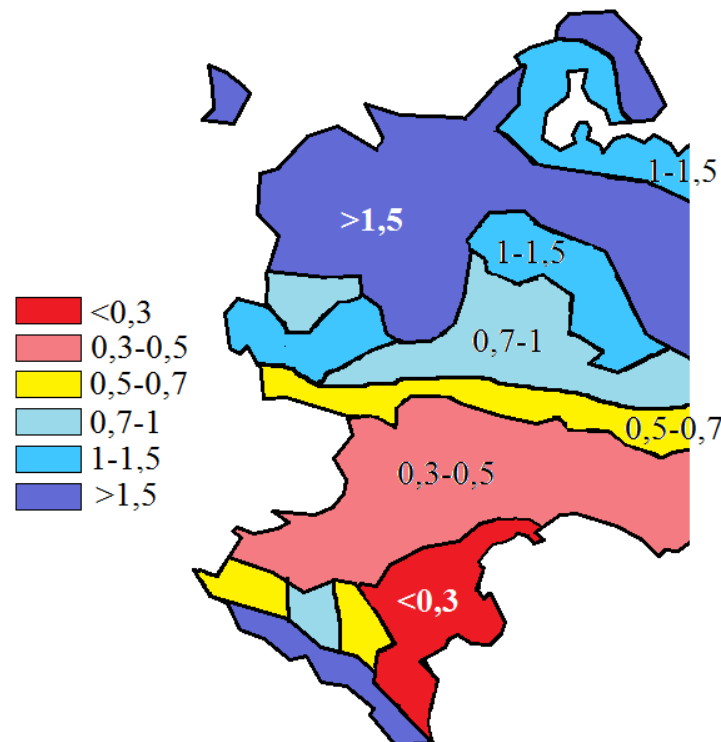


Рисунок 3 – Значения гидротермического коэффициента для европейской части России
Figure 3 – Hydrothermic coefficient values for the European part of Russia

Вымыв веществ с осушаемых земель как негативный фактор осуществляется инфильтрационным потоком воды. Инфильтрационный сток (g) определяется количеством поступающей воды (M), начальной влажностью почвы, ее распределением по почвенному горизонту (W), глубиной залегания грунтовых вод (h) и интенсивностью поступления в почву воды (i):

$$g = f(M, W, h, i).$$

Скорость передвижения влаги в слое аэрации почвы будет ограничиваться коэффициентом фильтрации (k_{ϕ}). Поэтому данный коэффициент можно использовать для характеристики интенсивности вертикальных потоков. Кроме того, он учитывает водно-физические характеристики почв:

$$g = f(M, W, h, k_{\phi}). \quad (2)$$

Объем вымыва веществ из почвы можно представить в зависимости от объемов поступающей воды (M), содержания в почве загрязняющих (C) веществ, способных к миграции по почвенному профилю, начальной влажности почвы (W), мощности зоны аэрации (h). Величины W и h определяют объем начальных влагозапасов, тем самым устанавливается объем свободного порового пространства, в котором может разместиться часть поступающей в почву воды. Это приведет к снижению объемов инфильтрационного стока:

$$G = f(M, C, W, h, k_{\phi}). \quad (3)$$

Зависимость (3) учитывает основные факторы, определяющие объем вымыва из почвы в дренажные воды. Их необходимо указывать при описании процессов миграции веществ из почвы. Это позволит делать сопоставление между собой разных условий формирования стока.

Влияние M , C , W , h на величину вымыва веществ (в работе рассмотрены биогенные вещества) определено на основании лабораторных опытов по промывке монолитов почвы. Для исследований был взят низинный торф с характеристиками: плотность 0,28 г/см³; коэффициент фильтрации 1 м/сут; зольность 12 %; степень разложения 35 %; кислотность $pH_{KCl} = 6,5$; полная, наименьшая и максимальная молекулярная влагоемкости, соответственно равные: ПВ = 83 %, НВ = 72 % и $W_0 = 20$ % объема почвы. Промывки проводились в три серии. Для каждой серии отбирались монолиты торфа высотой $h = 10, 50$ и 100 см площадью 0,05 м² в трех-

кратной повторности. Методика промывок позволяла исследовать влияние каждого из перечисленных выше факторов отдельно, при фиксированных значениях других. В качестве загрязняющих веществ были исследованы нитраты (NO_3), аммоний (NH_4), калий (K_2O). Данные биогенные вещества являются характерными загрязнителями дренажного стока, поступающего с сельскохозяйственных угодий.

В исследованиях проведены оценки и расчеты вымыва веществ из зоны аэрации почвы и возможности поступления их в дренажный сток при таянии снега, выпадении дождей или проведении поливов. Объем вымыва или потерь веществ (G) зависит от содержания водорастворимых форм в слое почвы (C) и объема инфильтрационного стока (g) (по формуле (2)):

$$G = f(C, g).$$

Вид зависимости объемов вымыва веществ от их содержания в почвенном профиле (зоне аэрации) $G = f_c(C)$ оценивается по доступным для растений формам, так как они используются для обеспечения растений биогенными веществами и являются обычными в агрохимической практике, общедоступны для рассмотрения.

Вид зависимости $g = f_w(W)$ можно выявить на основе рассмотрения функции $g = f(\theta)$. Здесь используется не фактическая влажность (начальная перед промывкой) почвы W , а ее относительная величина θ . Для этого применяется уравнение Ю. Н. Никольского, пригодное для разных условий, которое позволяет учесть водно-физические характеристики почв:

$$\theta = \left(\frac{W - W_0}{\text{ПВ} - W_0} \right)^n,$$

где n – коэффициент, учитывающий механический состав почв и равный 3,5 для торфяников;

W_0 – максимальная гигроскопическая влажность.

Влияние начальной влажности монолитов на объем стока воды, задаваемой в пределах 50–70 % объема почвы, показано на рисунке 4.

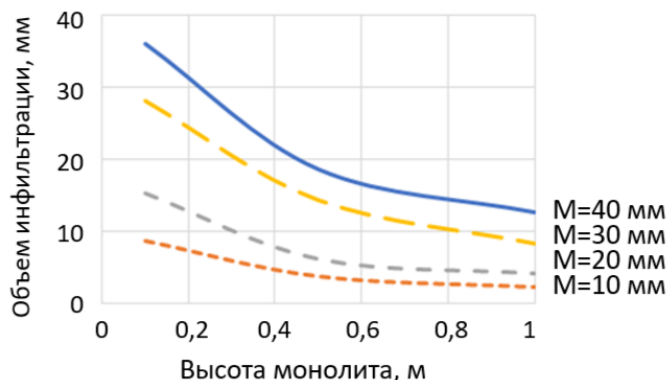


Рисунок 4 – Зависимость объемов инфильтрационного стока от мощности рассматриваемого слоя торфа
Figure 4 – Dependence of infiltration flow volumes on the peat layer thickness under consideration

Зависимость (3) можно определить, используя теорию анализа размерности. Для этого перепишем зависимость, объединяя величины $\theta \cdot k_{\phi}$ (физический смысл – удельная интенсивность инфильтрации при ПВ $\theta = 1$ и $\theta \cdot k_{\phi} = k_{\phi}$), в виде:

$$G = f(M, \theta \cdot k_{\phi}, C, h),$$

где M – слой воды, м;

$\theta \cdot k_{\phi}$ – скорость инфильтрации, м/с;

C – содержание вещества в слое почвы, кг/м;

h – слой почвы, м.

На основе анализа размерности получается функция:

$$G = M \cdot C \cdot k_{\phi} \cdot \theta / h \text{ или } G = M \cdot C \cdot k_{\phi} \cdot \left(\frac{W - W_0}{\text{ПВ} - W_0} \right)^n / h. \quad (4)$$

Выражение (4) можно использовать для приведения литературных данных к сопоставимому виду, для целей выявления влияния конкретных природных условий и условий использования земель на вымыв из почвы загрязняющих веществ.

Результаты и их обсуждение. Вероятности необходимости осушения при возделывании яровой пшеницы и картофеля по регионам (обла-

стям) европейской части России приведены в таблице 3 и на рисунке 5. Степень необходимости осушения: низкая – при вероятности необходимости менее 10 % (осушение не требуется); средняя – 10–30 % (необходимость осушения определяется технико-экономическими расчетами) и высокая – более 30 % (осушение необходимо).

Таблица 3 – Вероятности необходимости в осушении

B %

Table 3 – Probabilities of demand for land drainage

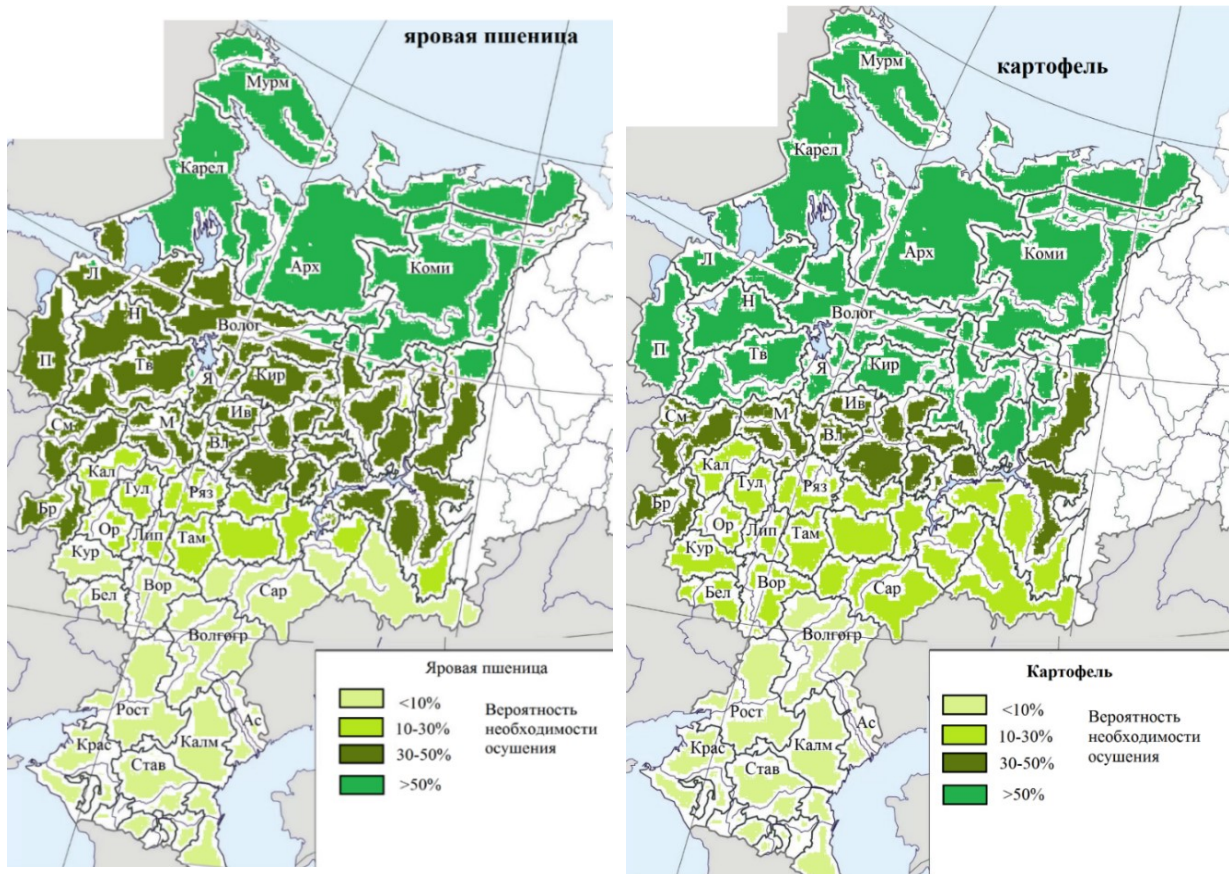
In %

Природная зона, административная область	Вероятность			
	Яровая пшеница		Картофель	
	P_{opt}	$P \downarrow$	P_{opt}	$P \downarrow$
Северо-таежная	16	67	13	86
Южно-таежная	28	67	33	50
Владимирская, Рязанская	49	33	39	35
Брянская	25	66	49	40
Ивановская	36	48	50	27
Калининградская	28	67	33	50

Потребность в осушении земель при выращивании яровой пшеницы отмечена примерно на 50 % площади (рисунок 4), средняя и низкая – на 50 %, низкая степень характерна для 40 % площади. Необходимость в осушении земель при выращивании картофеля существует на 50 % площади (рисунок 5), средняя и низкая – на 50 % и низкая на 20 % площади.

На основе литературных источников³ [1, 3] и полученных выше формул, которые позволили привести данные к сопоставимому виду, получено следующее влияние типов почв, их механического состава и условий использования земельных угодий на объемы вымыва азота и калия из почв (рисунок 6). Из черноземов вымыв минерального азота в 1,5–2 раза выше, чем из серых лесных и дерново-подзолистых почв. Относительно калия достоверного влияния типа почв на вымыв его из зоны аэрации при прочих равных условиях не выявлено.

³Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций.



Обозначения к рисунку 5: Мурман – Мурманская; Карел – Республика Карелия; Арх – Архангельская; Коми – Республика Коми; Л – Ленинградская; Н – Новгородская; П – Псковская; Тв – Тверская; Волог – Вологодская; Я – Ярославская; Кир – Кировская; Ив – Ивановская; М – Московская; Вл – Владимирская; См – Смоленская; Кал – Калужская; Тул – Тульская; Ряз – Рязанская; Бр – Брянская; Ор – Орловская; Лип – Липецкая; Там – Тамбовская; Кур – Курская; Вор – Воронежская; Бел – Белгородская; Сар – Саратовская; Волгогр – Волгоградская; Рост – Ростовская; Калм – Республика Калмыкия; Крас – Краснодарский край; Став – Ставропольский край

Рисунок 5 – Вероятности потребности в осушении земель при выращивании яровой пшеницы и картофеля по областям европейской части России

Figure 5 – Probabilities of demand for land drainage when growing spring wheat and potatoes by regions of the European part of Russia

Большое влияние на миграционные процессы оказывает механический состав почв и условия использования угодий. Из дерново-подзолистых песчаных почв величина годового вымыва минерального азота в 5 раз выше его потерь из суглинистых почв. Выращивание культур сплошного сева на супесчаной дерново-подзолистой почве более чем в 2 раза уменьшает вымыв азота по сравнению с пропашными культурами и в 3 раза по сравнению

с чистым паром. Вымыв калия в аналогичных условиях снижается соответственно в 2 и 4 раза.

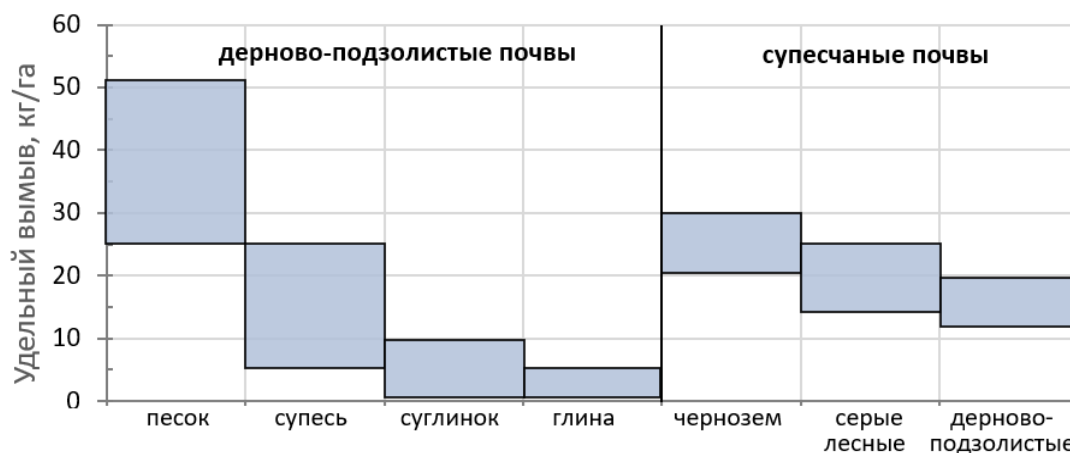
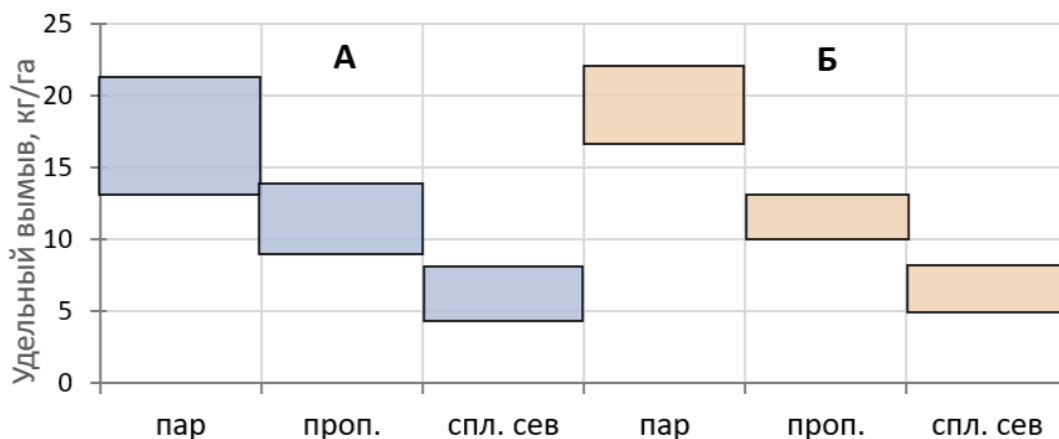


Рисунок 6 – Зависимость вымыва минерального азота от механического состава (дерново-подзолистые) и типа (супеси) почв
Figure 6 – Dependence of mineral nitrogen leaching on mechanical composition (sod-podzolic) and type (loamy sand) of soils

Зависимости вымыва азота и калия из почв разных типов от механического состава и вида их использования показаны на рисунке 7.



пар – чистый пар; проп. – пропашные культуры; спл. сев – культуры сплошного сева

Рисунок 7 – Вымыв минерального азота и калия из дерново-подзолистых (А) и супесчаных почв (Б) в зависимости от вида использования угодий

Figure 7 – Leaching of mineral nitrogen and potassium from sod-podzolic (A) and loamy sand soils (B) depending on the type of land use

В таблице 4 представлены результаты расчетов относительных потерь калия из почв разных природных зон.

Таблица 4 – Относительные объемы вымыва калия из почв различных природно-климатических зон (слой аэрации почвы $h = 1$ м)
Table 4 – Relative volumes of potassium leaching from soils of different natural and climatic zones (soil aeration layer $h = 1$ m)

Параметр	Природно-климатическая зона и тип почв								
	Лесная			Лесо- степная	Черноземы			Каштано- вые	
	глесвые	типичные	дерновые	серые лесные	оподзо- ленные	выщело- ченный	обычно- венный	темные	светлые
Осадки, мм	800	750	700	650	600	550	500	400	300
K ₂ O, мг/100 г	5	8	13	21	34	60	55	34	21
НВ, %	28	31	34	37	41	45	41	37	34
W_0 , % объемные	3,5	4,5	5,9	7,7	10	13	10	7,7	5,9
Удельный объем вымыва, кг/га									
Черный пар	8,8	12,3	17,5	22,7	35	56	47	24,5	12,3
Пропашные	5	7	10	13	20	32	27	14	7
Культуры сплошного сева	2,5	3,5	5	6,5	10	16	13	7	3,5

Полученные результаты исследования влияния факторов на формирование дренажного стока и объемов вымыва веществ могут использоваться для районирования территорий по опасности загрязнения грунтовых вод и формированию объемов и качества дренажного стока.

Мероприятия по снижению опасности дренажного стока для рек-водоприемников делятся на активные и пассивные. Активные позволяют непосредственно управлять качеством воды. Пассивные направлены на создание условий для снижения загрязненности дренажно-коллекторного стока [2–4].

Активные водоохраные мероприятия направлены на снижение загрязненности дренажного стока путем его очистки и вторичного использования посредством создания повторных и оборотных систем [5–7]. Оборотные системы возможны в условиях осушения орошаемых земель, т. е. при двустороннем регулировании водного режима почв. Повторные систе-

мы возможны при использовании дренажного стока для других целей, например, рыбохозяйственных, рекреационных, пожарных и др.

Наиболее распространенным активным мероприятием является очистка стоков. С этой целью делают биологические инженерные сооружения (БИС), включающие биологическое плато (биоплато). БИС позволяют снизить загрязненность сточных вод за счет: поглощения загрязняющих веществ водной растительностью, сорбции и фильтрации. Эффективность поглощения веществ растениями зависит от их биопродуктивности. Широко используются полупогруженные растения, чья биомасса достигает 2–20 т/га. Высокая эффективность поглощения веществ достигается при глубинах в пределах 0,3–1,5 м, скорости течения воды 0,2–0,3 м. Мировой опыт исследований, так же как и исследования авторов, подтверждает, что эффективность использования биоплато на осушительных системах достигает 90 % по биогенным элементам. При этом повторное использование дренажного стока для нужд орошения увеличивает площадь нерегулярного орошения на 11,6 % и снижает загрязняющую нагрузку на водные объекты до 23 % [2, 8].

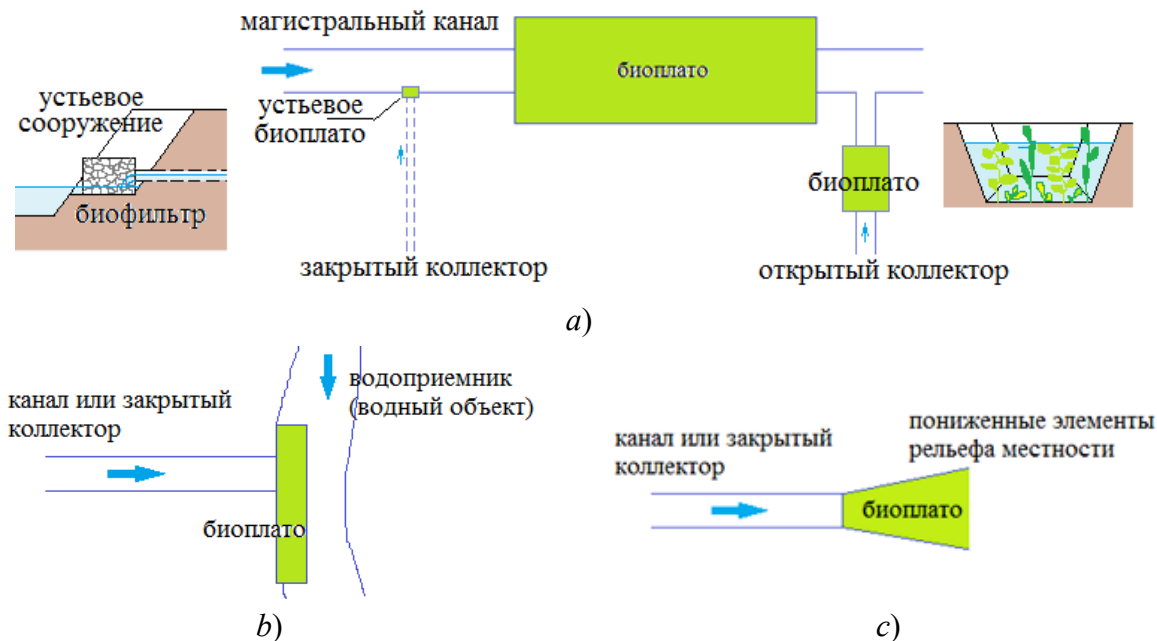
Сорбция определяется фракционным составом донных отложений и используемых фильтров (вертикальных или горизонтальных). БИС могут выполняться в разном виде, в зависимости от места их создания:

- на магистральном осушительном канале и коллекторах (открытых и закрытых) (рисунок 8а);
- в пределах водоприемника (рисунок 8б);
- в пониженных элементах рельефа местности (рисунок 8с).

Пассивные водоохранные мероприятия позволяют стимулировать естественные цепные реакции, в т. ч. отвечающие за формирование дренажного стока на осушаемых землях. К таким мероприятиям относятся: ландшафтное планирование и точная мелиорация.

Ландшафтное планирование – это планирование природопользова-

ния на основе сбалансированного освоения всех видов ресурсов и минимизации негативных экологических последствий, в т. ч. с учетом сохранения разнообразия биоты и рекреационных качеств ландшафта [6, 8, 9].



a – на магистральном осушительном канале и коллекторах (открытых и закрытых);
b – в пределах водоприемника; *c* – в пониженных элементах рельефа местности
a – on the main drainage channel and collectors (open and closed);
b – within the water intake; *c* – in low terrain elements

Рисунок 8 – Биологические инженерные сооружения
Figure 8 – Biological engineering structures

Точная мелиорация – это звено системы «точное земледелие – точная мелиорация – точное водное хозяйство» [7, 10–12]. Данная триединая система позволяет управлять потоками веществ, энергии и информации на водосборе. Точная мелиорация направлена на создание благоприятных условий для выращивания сельскохозяйственных растений и формирования высокоплодородных почв. Это дает возможность получать достаточно высокую урожайность растений и сохранять (и даже повышать) почвенное плодородие.

Выводы. Обоснование мелиоративных мероприятий с помощью методики В. В. Шабанова позволяет выполнять районирование территорий по необходимости осушения (методика пригодна для обоснования многих

видов мелиоративного воздействия). До 80 % территорий нуждаются в осушении временно переувлажненных земель при выращивании картофеля.

Основные водоохранные мероприятия, снижающие загрязняющее воздействие на водоприемники со стороны дренажного стока, включают: активные мероприятия (создание БИС), пассивные мероприятия – точную мелиорацию, направленную на управление условиями формирования дренажного стока с учетом почвенной неоднородности.

Эффективность использования биоплато для очистки дренажного стока достигает до 90 %. Использование дренажного стока в водооборотной системе позволит дополнительно орошать до 11,6 % площади и снизить загрязненность на 23 %.

Список источников

1. Шабанов В. В., Голованов А. И. Некоторые аспекты точной мелиорации // Природообустройство. 2019. № 1. С. 92–96.
2. Кирейчева Л. В. Биосферно-экологическое обоснование комплексных мелиораций // Природообустройство. 2023. № 2. С. 15–22. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-15-22.
3. Вопросы управление качеством дренажного стока / А. М. Бакштанин, И. В. Глазунова, В. Н. Маркин, С. А. Соколова, Т. И. Матвеева. Курск: Унив. кн., 2022. 208 с. DOI: 10.47581/2022/ML-70/VUKDS-Glazunova.01. EDN: WZXPGB.
4. Кирейчева Л. В., Тимошкин А. Д., Аветисян А. Л. Информационно-справочная система агроклиматических и почвенных показателей Нечерноземной зоны РФ // International Agricultural Journal. 2022. Т. 65, № 3. DOI: 10.55186/25876740_2022_6_3_18.
5. Кирейчева Л. В., Шевченко В. А. Роль мелиорации в повышении продуктивности сельскохозяйственных земель в условиях Калининградской области // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 4. С. 19–25. DOI: 10.32962/0235-2524-2022-4-19-25.
6. Перспективы использования данных дистанционного зондирования в оценке состояния мелиоративных систем и эффективности использования мелиорированных земель / Н. Н. Дубенок, Ю. Г. Янко, А. Ф. Петрушин, Р. В. Калининченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 96–104. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104.
7. Якушев В. В. Точное земледелие – практика внедрения и перспективы. Национальное движение сберегающего земледелия. СПб.: Агрофизический НИИ, 2016. 16 с.
8. Кирейчева Л. В., Глазунова И. В. Развитие и размещение сельскохозяйственных мелиораций в изменяющихся климатических условиях // Природообустройство. 2017. № 4. С. 80–87. EDN: ZGUVOD.
9. Экосистемное водопользование и точная мелиорация – основные инструменты зеленой экономики / В. В. Шабанов, С. Д. Исаева, О. А. Стрижников, И. Г. Бондарик // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной безопасности, г. Москва, 14–15 апр. 2022 г. М.: ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2022. С. 241–248.

10. Якушев В. П., Якушев В. В. Перспективы «умного сельского хозяйства» в России // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88, № 9. С. 773–784. DOI: 10.31857/S086958730001690-7.

11. Постников А. Н. Об изменении испарения с суши и водной поверхности на территории России за последние десятилетия // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 50. С. 88–96.

12. Дубенок Н. Н., Якушев В. П., Янко Ю. Г. Мелиорация земель Ленинградской области: проблемы и инновационные пути их разрешения // Агрофизика. 2013. № 2. С. 2–9.

References

1. Shabanov V.V., Golovanov A.I., 2019. *Nekotorye aspekty tochnoy melioratsii* [Some aspects of exact land reclamation]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 92-96. (In Russian).

2. Kireycheva L.V., 2023. *Biosferno-ekologicheskoe obosnovanie kompleksnykh melioratsiy* [Biospheric and ecological substantiation of complex land reclamation]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 15-22, DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-15-22. (In Russian).

3. Bakshtanin A.M., Glazunova I.V., Markin V.N., Sokolova S.A., Matveeva T.I., 2022. *Voprosy upravlenie kachestvom drenazhnogo stoka* [Issues of Drainage Runoff Quality Management]. Kursk, University Book Publ., 208 p., DOI: 10.47581/2022/ML-70/VUKDS-Glazunova.01, EDN: WZXPGB. (In Russian).

4. Kireycheva L.V., Timoshkin A.D., Avetisyan A.L., 2022. *Informatsionno-spravochnaya sistema agroklimaticheskikh i pochvennykh pokazateley Nechernozemnoy zony RF* [Reference - information system on agri-climatic and soil parameters for the non-chernozem zone of the Russian Federation]. *International Agricultural Journal*, vol. 65, no. 3, DOI: 10.55186/25876740_2022_6_3_18. (In Russian).

5. Kireicheva L.V., Shevchenko V.A., 2022. *Rol melioratsii v povyshenii produktivnosti selskokhozyaystvennykh zemel v usloviyakh Kaliningradskoy oblasti* [The role of land reclamation for agricultural land productivity increasing in Kaliningrad region]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 4. pp. 19-25, DOI: 10.32962/0235-2524-2022-4-19-25. (In Russian).

6. Dubenok N.N., Yanko Yu.G., Petrushin A.F., Kalinichenko R.V., 2019. *Perspektivy ispolzovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya v otsenke sostoyaniya meliorativnykh sistem i effektivnosti ispolzovaniya meliorirovannykh zemel* [Remote sensing data in land-reclamation systems and reclaimed land management assessment]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space], vol. 16, no. 3, pp. 96-104, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104. (In Russian).

7. Yakushev V.V., 2016. *Tochnoe zemledelie – praktika vnedreniya i perspektivy. Natsionalnoe dvizhenie sberegayushchego zemledeliya* [Precision farming – implementation practice and prospects. National Conservation Agriculture Movement]. Saint Petersburg, Agrophysical Research Institute, 16 p. (In Russian).

8. Kireycheva L.V., Glazunova I.V., 2017. *Razvitie i razmeshchenie sel'skokhozyaystvennykh melioratsiy v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh* [Development and placement of agricultural land reclamation in changing climatic conditions]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 80-87, EDN: ZGUVOD. (In Russian).

9. Shabanov V.V., Isaeva S.D., Strizhnikov O.A., Bondarik I.G., 2022. *Ekosistemnoe vodopolzovanie i tochnaya melioratsiya – osnovnye instrumenty zelenoy ekonomiki* [Ecosystem water use and precision reclamation are the main tools of the green economy]. *Rol melioratsii v obespechenii prodovolstvennoy bezopasnosti* [The Role of Land Reclamation in Ensuring Food Security]. Moscow, VNIIGiM im. A. N. Kostyakova, pp. 241-248. (In Russian).

10. Yakushev V.P., Yakushev V.V., 2018. *Perspektivy “umnogo sel'skogo khozyaystva” v Rossii* [Prospects for “smart agriculture” in Russia]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Herald of the Russian Academy of Sciences], vol. 88, no. 9, pp. 773-784, DOI: 10.31857/S086958730001690-7. (In Russian).

11. Postnikov A.N., 2018. *Ob izmenenii ispareniya s sushy i vodnoy poverkhnosti na territorii Rossii za poslednie desyatletiya* [About evaporation change from land and water surface on the territory of Russia for the last decades]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University], no. 50, pp. 88-96. (In Russian).

12. Dubenok N.N., Yakushev V.P., Yanko U.G., 2013. *Melioratsiya zemel Leningradskoy oblasti: problemy i innovatsionnye puti ikh razresheniya* [Land Reclamation in Leningrad Region: Problems and Innovative Solutions]. *Agrofizika* [Agrophysics], no. 2, pp. 2-9. (In Russian).

Информация об авторах

А. М. Бакштанин – доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, кандидат технических наук, доцент, Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, bakshatanin@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9307-0865>, AuthorID: 574085;

В. Н. Маркин – доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, кандидат технических наук, доцент, Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, mvnarkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0976-371X>, AuthorID: 378128;

И. В. Глазунова – доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, кандидат технических наук, доцент, Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, ivglazunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>, AuthorID: 127917;

С. А. Соколова – доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, кандидат технических наук, доцент, Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, sokolovasvetlana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>, AuthorID: 939094;

Т. И. Матвеева – доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, кандидат технических наук, доцент, Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, timatveeva@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5598-8189>, AuthorID: 939474;

М. А. Ширяева – младший научный сотрудник, Федеральный научный центр гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Российская Федерация, Shiryaeva.MA@fncg.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>, AuthorID: 1081861.

Information about the authors

A. M. Bakshatanin – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, bakshatanin@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9307-0865>, AuthorID: 574085;

V. N. Markin – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, mvnarkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0976-371X>, AuthorID: 378128;

I. V. Glazunova – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, ivglazunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>, AuthorID: 127917;

S. A. Sokolova – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, sokolovasvetlana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>, AuthorID: 939094;

T. I. Matveeva – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, timatveeva@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5598-8189>, AuthorID: 939474;

M. A. Shiryayeva – Junior Researcher, Federal Scientific Center of Hygiene named after F. F. Erisman of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Mytishchi, Russian Federation, Shiryayeva.MA@fncg.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>, AuthorID: 1081861.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023;
принята к публикации 16.11.2023.*

*The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 16.11.2023; accepted for
publication 16.11.2023.*