

10. Михневич Э.И. Новые способы гидравлического расчета каналов // Мелиорация. 2016. № 3. С. 7–12.
11. Косиченко Ю.М. Оценка достоверности расчетов удельного фильтрационного расхода через насыпную дамбу необлицованного канала // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2022. № 2(86). С. 135–142.
12. Бакланова Д.В. Расчет фильтрации через земляные дамбы на проницаемом основании // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1(21). С. 196–208.
13. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Особенности гидравлических и фильтрационных расчетов осушительно-оросительной системы // Природообустройство. 2021. № 4. С. 90–98. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-90-98.

## REFERENCES

1. Sangadzhiev M.M., Onkaev V.A. Voda Kalmykii – jekologija i sovremennoe sostojanie // Vestnik Kalmyckogo universiteta. 2012. No 3(15). Pp. 18–25.
2. Dedova Je.B., Shabanov R.M., Dedov A.A. Puti povyshenija jeffektivnosti funkcionirovanija risovoj orositel'noj sistemy na territorii Sarpinskoj nizmennosti // Colloquium-journal. 2019. No 5(29). Pp. 41–43.
3. Gosudarstvennaja programma jeffektivnogo вовлечения в оборот zemel' sel'skohozjajstvennogo naznachenija i razvitiya meliorativnogo kompleksa Rossijskoj Federacii [Jelektronnyj resurs]: utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 14 maja 2020 g. No 731. Dostup iz sprav. pravovoj sistemy «Konsul'tant-Pljus».
4. Borodychev V.V., Dedova Je.B., Suharev Ju.I. Resursno-jekologicheskaja ocenka risovyh agrolandshaftov Sarpinskoj nizmennosti // Prirodobustrojstvo. 2016. No 2. Pp. 55–61.
5. Altunin V.S. Meliorativnye kanaly v zemljanyh ruslah. M.: Kolos, 1979. 255 p.

6. Kosichenko Ju.M. Gidravlicheskie i jekologicheskie aspekty jeksploatacii kanalov. Novoчеркасс: NGMA, 2000. 230 p.
7. Shterenliht D.V. Gidravlika. M.: Kolos S, 2007. 655 p.
8. Meliorativnye sistemy i sooruzhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.06.03–85 (s izm. № 1): SP 100.13330.2016: vved. v dejstvie s 17.06.17. M.: Standartinform, 2017. 231 p.
9. Kosichenko Ju.M., Baklanova D.V. Raschet fil'tracii cherez dambu kanala v nasypj i ocenka riska avarijnyh situacij // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 2012. No 4(168). Pp. 77–81.
10. Mihnevich Je.I. Novye sposoby gidravlicheskoгo rascheta kanalov // Melioracija. 2016. No 3. Pp. 7–12.
11. Kosichenko Ju.M. Ocenka dostovernosti raschetov udel'nogo fil'tracionnogo rashoda cherez nasypnuju dambu neoblicovannogo kanala // Puti povyshenija jeffektivnosti oroshaemogo zemledelija. 2022. No 2(86). Pp. 135–142.
12. Baklanova D.V. Raschet fil'tracii cherez zemljanye damby na pronicаемом osnovanii // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2016. No 1(21). Pp. 196–208.
13. Kosichenko Ju.M., Baev O.A. Osobennosti gidravlicheskih i fil'tracionnyh raschetov osushitel'no-orositel'noj sistemy // Prirodobustrojstvo. 2021. No 4. Pp. 90–98. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-90-98.
- Талаева Виктория Федоровна**, науч. сотр. гидротехнического отдела, vika-silchenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2541-204X; **Баев Олег Андреевич**, доктор техн. наук, доц., вед. науч. сотрудник, нач. гидротехнического отдела, Oleg-Baev1@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0142-4270; **Колганов Александр Васильевич**, доктор техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник отдела РВП в АПК, kolganov49@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0234-0079 (Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, г. Новочеркасс).

УДК 631.6:631.47

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-17-24

## ПОЧВЕННЫЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

Н.Н. ДУБЕНОК, В.Н. МАРКИН, А.Д. СОЛОШЕНКОВ, В.В. ШАБАНОВ

**Ключевые слова:** catena, ценность почвенной влаги, требования биотического сообщества к водному режиму почвы, депонирование углерода, точная мелиорация.

**Keywords:** catena, soil moisture capacity, soil reservoirs, requirements of the biotic community to the water regime of soils, carbon sequestration, precise hydro amelioration.

**Аннотация.** В статье для точного мелиоративного регулирования обоснована целесообразность введения «нового» научного понятия – почвенные водохранилища. Рассмотрение почвенных водохранилищ как самостоятельных объектов точного мелиоративного управления, в которых обитает почвенное биотическое сообщество, позволит дифференцировать управление водным режимом между сельскохозяйственными растениями и почвенной биотой, требования которых к условиям внешней среды во многих случаях не совпадают. Областью применения данной разработки может быть оптимизация мелиоративных режимов сельскохозяйственной культуры и почвенной биоты, что очень важно для обоснования режимов депонирования углерода при мелиорации земель. В результате проведенных исследований, создан определенный методологический подход и получены конкретные рекомендации, которые могут быть использованы не только в области мелиорации земель, но и в гидрологических расчетах. Предлагается рассматривать почвенные водохранилища, со всеми атрибутами, присущими наземным водохозяйственным системам. Обсуждается возможность увеличения объема почвенных водохранилищ, за счет увеличения свободной пористости, т. е. улучшения структуры почвы. Рассматривается возможность прогнозирования весеннего поверхностного стока с использованием линейной связи объемов почвенных вод перед заморозанием почвы осенью и перед оттаиванием весной. Информирование о наличии зарегистрированных баз данных продуктивных влагозапасов на различных элементах ландшафтных катен, по которым возможно определить объемы почвенных водохранилищ на территориях различных стран (территория бывшего Советского Союза).

**Abstract.** The expediency of introducing the concept of «soil reservoirs» is considered in the article. Water in the soil plays an important role both in the

process of harvesting and carbon sequestration by the soil biota. Quantitative and qualitative assessment of soil water resources is necessary because the intensity of sequestration significantly depends on the volume of water in the soil. To consider soil reservoirs similarly to reservoirs on rivers is proposed. The Top of surcharge storage for soil reservoirs corresponds a full moisture capacity. The normal retaining level for soil ones does a maximum field moisture capacity. The optimal volume of soil reservoirs does a field moisture capacity. Dead storage of a reservoir – wilting moisture. The boundary of soil biota life (this is the capacity of water in which life is possible) is a maximum molecular moisture capacity or hygroscopic one, depending on the type of soil microorganisms. This approach makes it possible to quantify the value of various water forms for the activities of terrestrial and soil ecosystems and to determine their role in the deposition of the carbon footprint. In this case, one is able to calculate the economic efficiency of various types of land reclamation for carbon sequestration. The possibility of increasing the volume of soil reservoirs by increasing free porosity, i.e. improving the soil structure, is discussed. As one of the practical applications, to predict spring high water using a linear function of soil water capacity before and after freezing of the soil during the cold season is considered. The information about availability of registered databases of productive moisture capacity on various elements of landscape catenae is given. It allows you to determine volumes of soil reservoirs on the territories of various countries (the territory of the former Soviet Union).

**Введение.** Существующие глобальные «вызовы» (повышение концентрации углерода в атмосфере, изменение климата, рост численности населения) [10] повышают роль почвенных вод в создании оптимальных (для человека) условий жизни на Земле. Представляется, что сейчас почвенным водам в водном балансе Земли уделяется недостаточное внимание в связи с их «незначительным» абсолютным объемом (с гидрологической точки зрения – 10...25% от осадков). Однако роль, кото-

рую играют почвенные воды в создании биосферы Земли, огромна. Практически все органическое вещество суши, а это основная часть органики на Земле, создана на основе почвенных вод. Кроме того, нарушение биосферного (заложенного природой в данном географическом месте) режима почвенных вод приводит к уничтожению порового пространства (объемов почвенных водохранилищ) и деградации почв. Создание человеком искусственных почв, столь же эффективных, как природные, пока невозможно, но управление структурой и функционированием почв природоподобными методами не только экологически, но экономически целесообразно. Тем более что в настоящее время такие методы (ландшафтное земледелие, комплексная мелиорация, точное земледелие, органическое земледелие и др.) получили достаточно широкое распространение. Однако для дифференцированного управления почвенными водами, существующие методы не всегда дают ожидаемый эффект. В первую очередь это связано со стохастичностью распределения почвенных пор в пространстве и во времени, а также с существенной неоднородностью порового пространства в мезо- и микромасштабах [13].

Поскольку вода в почве играет основную роль при создании биомассы (депонировании углерода), количественная и качественная оценка почвенных вод весьма актуальна. Это связано с тем, что интенсивность депонирования углерода существенно зависит не только от объемов воды в почве, но и от распределения ее по глубине в соответствии с динамическим развитием растений и почвенной биоты. Отсюда важны не только интегральные характеристики, такие как декадные влагозапасы в метровом слое почвы, но и послойная (0...10, 10...25, 25...50, 50...100 см) динамика изменения запасов.

Есть еще один аспект рассматриваемой проблемы — экономико-правовой. На протяжении десятилетий во всем мире тратятся большие ресурсы на «восстановление плодородия», однако деградация почвенного покрова с каждым годом увеличивается. Причиной такого положения, как нам представляется, является неполная формулировка термина плодородие почвы. Существующее определение термина «плодородие почвы»: «Способность почвы создавать благоприятные условия для роста растения», предлагается в [17] заменить на: «Способность почвы создавать благоприятные условия для жизнедеятельности растения и почвенной биоты». В этом случае будет учтена почвенная биота как объект управления, и правовая неурегулированность действий относительно уничтожения почвенной боты (неоптимальные режимы, ядохимикаты и пр.) будет урегулирована. Создание оптимальных условий почвенной биоте, в том числе и по водному режиму, сейчас делается по остаточному принципу. По умолчанию считается, что требования сельскохозяйственной культуры совпадают с требованиями почвенного биотического сообщества. Но это, в большинстве случаев, не так. Большинство сельскохозяйственных культур «переселены» из других географических (климатических) зон. Требования биоты в местах происхождения сельскохозяйственных растений существенно отличаются от требований биоты в местах современного возделывания культур. Это относится

в первую очередь и к водному режиму. Поэтому введение понятия «почвенные водохранилища» связано с необходимостью обратить особое внимание на «многоцелевое» использование почвенных водных ресурсов. Все это позволит не только получать высокие урожаи и повышать (по крайней мере, сохранять) плодородие, но и максимизировать депонированием углерода.

Реализация такого подхода возможна при использовании положительного опыта, который накоплен при управлении наземными водохозяйственными системами. Хотя система почвенных водохранилищ и методы управления ими будут намного сложнее.

Почвенные водохранилища можно рассматривать, со всеми атрибутами, присущими наземным водохозяйственным системам. *Форсированный объем*, для почвенных водохранилищ — *полная влагоемкость*. *Нормальный подпорный уровень*, для почвы — *предельная полевая влагоемкость*. *Оптимальный уровень* почвенного водохранилища — *наименьшая влагоемкость*. *Мертвый объем* — *влажность завядания*. *Граница жизни почвенной биоты* (объем воды, при котором возможна жизнь) — *максимально молекулярная или гигроскопическая влажность*, в зависимости от вида почвенных микроорганизмов.

Такой подход дает возможность количественно установить *ценность различных форм воды* для деятельности наземных и почвенных экосистем и определить их роль в создании биомассы (депонировании углеродного следа). Это позволяет сделать расчет экономической эффективности различных видов мелиорации почв, для депонирования углерода. Кроме того, путем создания оптимальных условий в системе растение — почвенная биота, интенсифицируется их взаимодействие и запускается процесс «структурообразования» почвы. Это дает возможность увеличить объем почвенных водохранилищ, за счет увеличения свободной пористости, т. е. улучшения структуры почвы.

Следует отметить, что информация о продуктивных влагозапасах под разными культурами, на различных ландшафтных элементах накапливалась в течение десятков лет в системе агрометеорологической службы. В настоящее время она структурируется в виде зарегистрированных баз данных в четырехстах точках территории бывшего Советского Союза [7].

Таким образом, предлагаемый подход может существенно повлиять не только на экономическую заинтересованность сельхозтоваропроизводителя получать продукцию, но и экономить воду и, самое главное, сохранять или повышать почвенное плодородие, т. к. в этом случае объемы почвенных водохранилищ увеличиваются, режимы становятся более благоприятными и экономически выгодными. Учитывая, что наземная и подземная биомасса линейно связана с количеством депонированного углерода, управление почвенными водохранилищами, можно использовать в качестве инструмента минимизации углеродного следа.

**Объекты и методы.** Водные ресурсы почвы составляют 0,004 % от общих запасов воды на Земле (80 тыс. км<sup>3</sup>), в том числе 0,02 % пресных вод. При этом сток рек, как наиболее широко используемого источника воды, составляет 0,0002 % (1,2 тыс. км<sup>3</sup>) от общих запасов воды,

или 0,006 % от общих запасов пресной воды, но благодаря круговороту воды реки несут в мировой океан 40 тыс. км<sup>3</sup> в год. Однако и этот объем намного меньше почвенных вод. Площадь распространения почвенных вод оценивается в 82 млн км<sup>2</sup> (при площади суши 149 млн км<sup>2</sup>). Это означает, что средняя мощность влагосодержащего слоя составляет 0,98 м. Однако объемы почвенных вод неравномерно распределены по территориям и в ряде в ряде регионов, влага лимитирует продуктивность живых организмов. Так, аридизация в мире захватывает 28 % территории суши, а избыток влаги наблюдается на площади 10 % [12].

Орошение и осушение позволяют управлять влагозапасами, в соответствии с требованиями живых организмов (растений и почвенной биоты) [16], подобно тому, как это делается при регулировании речного стока водохранилищами для целей водообеспечения населения и отраслей экономики.

Итак, «почвенное водохранилище» — природно-антропогенная емкость порового пространства почвы, воды которой поддерживают жизнедеятельность растений и почвенной биоты. Потенциальная емкость почвенного водохранилища и объемы воды в нем, регулируются специальными биотехнологическими, агротехническими и мелиоративными мероприятиями.

«Почвенные влагозапасы» располагаются в почвенных водохранилищах, режимы которых можно регулировать. Такое регулирование необходимо для решения следующих задач:

- получение стабильных и высокие урожаи с сохранением почвенного плодородия;
- регулирование «углеродного следа» на Планете (сельскохозяйственные растения и почвенная биота связывают углерод из атмосферы, создавая большое количество органической биомассы).

Управление почвенными водохранилищами позволяет решать данные вопросы в рамках стратегии Зеленой экономики [6, 20]. Управление возможно осуществлять пассивными и активными методами.

*Пассивные* — регулируют влагосодержание в почве косвенным путем с помощью агро-, лесо-, снеготехнических мероприятий (например, распашка поперек склона, рыхление почвы, устройство лесополос, уплотнение снега и снегозадержание). Эти мероприятия способствуют накоплению влаги в почве. Однако объемы и распределение влаги в системе растения–почвенная биота не контролируются, а это не гарантирует повсеместного создания оптимальных условий для растения и (или) почвенной биоты.

*Активные методы* — позволяют регулировать влагозапасы в соответствии с потребностью растений и (или) почвенной биоты. Основным механизмом служит комплексная мелиорация. Она позволяет на количественном уровне осуществлять подачу воды из почвенных водохранилищ ( $W$ ) для достижения ряда целей:

- получение высоких планируемых урожаев  $Y_{пл}$ ; для этого влага регулируется в соответствии с требованиями растений (например, при выращивании дорогостоящих культур, выращивание которых в конкретном регионе обусловлено целым комплексом благоприятных природно-климатических факторов):

$$Y = f_y(W) \rightarrow Y_{пл} \dots Y_{макс};$$

- сохранение и даже повышение почвенного плодородия; для этого влага регулируется в соответствии с требованиями почвенной биоты  $B$ , что может привести к некоторому снижению урожайности растений, но направлено на сохранение плодородия почв:

$$B = f_b(W) \rightarrow 0,8B \dots B_{макс};$$

- депонирование углерода в растениях  $D_y$  и почве  $D_b$ ; для этого почвенные влагозапасы регулируются для максимизации поглощения углерода системой почва–растение. Например, для условий орошения оптимальный вариант управления может определяться областью Парето, располагающейся между оптимальными влагозапасами для почвенной биоты  $B_{макс}(W_{опт}^B)$  и растений  $Y_{макс}(W_{опт}^Y)$ :

$$D_{\Sigma} = D_y + D_b \rightarrow f_{y,b}(W) \rightarrow B_{макс} \dots Y_{макс}.$$

Таким образом, целевое использование почвенных водохранилищ может быть направлено не только на достижение конкретной цели, но имеется возможность и «комплексного» многоцелевого использования. В определенные моменты времени, управление водохранилищами направляется на достижение конкретной цели (получение высоких урожаев растений; сохранение почв путем повышения биопродуктивности почвенной биоты или максимальное снижение углеродного следа) так, чтобы максимизировать суммарный эффект. Однако, если при оценке урожая и штрафов за углеродный след, денежные оценки законодательно установлены, то оценка «стоимости» почвенной биоты, как самостоятельного объекта управления в законах не прописана, поэтому «избыточное» использование ядохимикатов слабо регламентируется и тем более не оплачивается сохранение и преумножение плодородия.

«Углеродный след» деятельности человека (повышение содержания  $CO_2$  в атмосфере) породил «углеродную стратегию» в мире. Механизмы стратегии направлены на создания технологий, снижающих выбросы углерода, т. е. перехода на более высокие «углеродные стандарты», за счет мероприятий позволяющих более интенсивно поглощать углекислый газ из атмосферы. Это возможно при создании оптимальных условий не только для роста и развития растений, но и при создании условий для почвенного биотического сообщества.

Защита экспортеров сельскохозяйственной продукции России может быть основана на зеленом сельском хозяйстве, к методам которого относятся [3, 8]:

- карбоновое земледелие (аккумуляция углерода в почве за счет его поступлений с органическими удобрениями и сидератными культурами, а так же снижение темпов потерь углерода из почвы в результате дыхания и эрозии почвы);
- регенеративное сельское хозяйство (совокупность неразрушающих методов ведения сельского хозяйства, обеспечивающих восстановление почв, в процессе хозяйствования).

При этом применение любого метода ведения сельского хозяйства направляется на поглощение атмосферного углерода растениями и почвой, что позволяет

снизить углеродный след производства сельскохозяйственной продукции, повысить плодородие почв при получении экономически приемлемой урожайности.

Одним из путей снижения углеродного следа является оптимизация условий произрастания растений и жизнедеятельности почвенной биоты. Мобильным инструментом в этом случае служит точная мелиорация [17], которая, с одной стороны, учитывает требования растений и почвенной биоты [16], а с другой стороны, учитывает пространственно-временную неоднородность почв, в том числе почвенных влагозапасов на мезо- и микроуровнях [15]. Управление почвенными влагозапасами на мезоуровне, пространственной неоднородности, подразумевает рассмотрение территории ландшафтной катены.

В настоящее время пахотные земли на планете увеличились до 1,87 млрд га. Средняя урожайность зерновых составляет 3,96 т/га. Доля с.-х. сектора в общем количестве глобальных антропогенных выбросов парниковых газов составляет, приблизительно, 13% (5...6 Гт экв. CO<sub>2</sub> в год) [1]. Сельское хозяйство способствует значительному уменьшению парниковых газов, поглощая 10% выбросов парниковых газов, в том числе 32% выбросов CO<sub>2</sub>.

Секвестрация углерода (сохранение в твердой устойчивой форме посредством прямой или опосредованной фиксации атмосферной двуокиси углерода) биологическими системами, рассматривается как способ консервации углерода. Улавливание углерода в сельскохозяйственном производстве связано с урожайностью растений и является одним из лучших способов сохранения углерода в биологической системе. Повышение урожайности путем внесения удобрений позволяет улавливать 0,3 т С/га в год, а орошение еще — 0,2 т С/га в год [20]. Можно полагать, что увеличение биомассы почвенной биоты путем создания оптимальных условий по водному режиму позволит увеличить депонирование углерода еще на 10...20%.

Нерациональные способы ведения сельского хозяйства привели к деградации трети территории мировых почв, что вызвало огромный выброс углерода в атмосферу. Восстановление этих почв может привести к поглощению до 63 млрд т углерода, что в значительной степени будет способствовать смягчению последствий изменения климата [5].

Управление процессами почвообразования, путем оптимизации режимов почвенных водохранилищ, позволит производить на 58% больше продовольствия. В этом случае почвы смогут поглотить около 800 Мт углерода в год, т. е. более 0,4% выбросов парниковых газов. А лесотехнические мероприятия позволят дополнительно поглощать 24 Мт углерода (учитывая, что лесополоса шириной 5 м составляет 5% площади поля и 2,5 га поглощают 1 т углерода в год) [3].

Таким образом, еще одной целью работы является определение возможности использования почвенных водохранилищ для снижения углеродного следа, путем управления продукционными процессами растений и жизнедеятельностью почвенной биоты (почвенным плодородием).

**Результаты и обсуждение.** Запасы влаги в почвенных водохранилищах неоднородны в пространстве и во времени, изменяются в соответствии с почвенной неоднородностью, например на мезоуровне, т. е. на уровне катены. Катены отражают закономерную последовательность размещения типов почв на склонах [21], формируя агрогидрологические районы. Их влагозапасы и представляют своего рода почвенные водохранилища. На европейской части России выделяются девять агрогидрологических районов (рис. 1) [14]: ОБВ (обводнение); МКУ (максимального капиллярного увлажнения); ПКУ (периодического капиллярного увлажнения); ВИУ (временного избыточного увлажнения); КППВ (увлажнения капиллярно-подвешенной и капиллярно-подперто-подвешенной влагой); ПВП (полного весеннего промачивания); УВП (умеренного весеннего промачивания); СВП (слабого весеннего промачивания); ОСВП (очень слабого весеннего промачивания).

Вверх по склону влагозапасы закономерно уменьшаются, вследствие оттока воды с вышерасположенных участков в пониженные элементы рельефа местности. Переток оценивается в 170...280 мм (рис. 2) от района ОСВП до ОБВ или примерно 56...93 мм составляют перетоки между тремя районами (верхняя часть склона, средняя и нижняя). Это сопоставимо с величиной оросительной нормы.

Например, на территории европейской части России для кормовых культур средняя оросительная норма составляет 192 мм (изменяясь в пределах 77...555 мм), а для многолетних трав — 266 мм (89...747 мм). Для условий степной зоны величина коэффициента водопотребления капусты изменяется от 55 до 114 м<sup>3</sup>/т [2]. Для травосмеси люцерны и злаковых трав данный коэффициент составляет 67...133 м<sup>3</sup>/т [4]. В данном случае учет объемов почвенных водохранилищ позволяет экономить водные ресурсы, размещая культуры в соответствии с емкостью водохранилищ. При этом почвенные водохранилища работают как бы в каскаде.

Каждому водохранилищу каскада, соответствуют определенные запасы воды, что и позволяет сделать

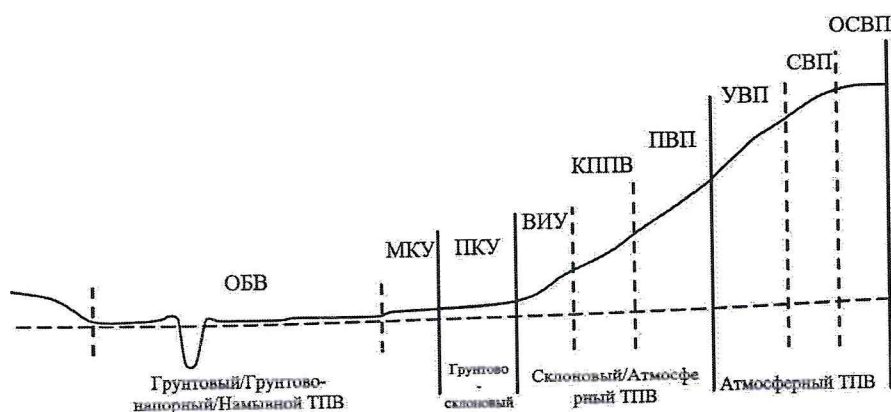


Рис. 1. Расположение агрогидрологических районов и типов водного питания (по Брудастову) на катене [15]

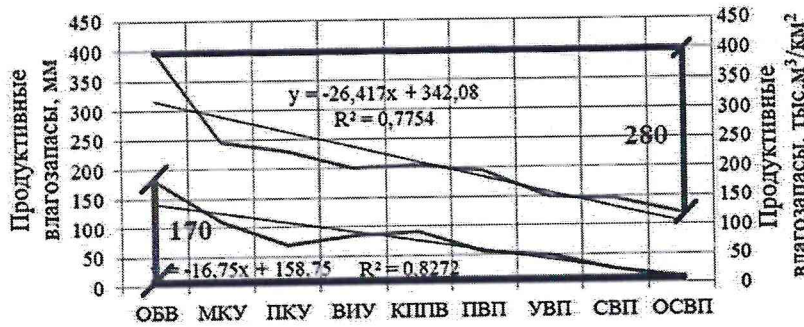


Рис. 2. Изменение размаха продуктивных почвенных влагозапасов в слое 0...100 см по агрогидрологическим районам [15]

выбор культур, чьи требования наилучшим образом соответствуют фактическим продуктивным почвенным влагозапасам.

На примере Воронежской области (рис. 3), где выделяются пять агрогидрологических районов [9], многолетние травы наилучшим образом соответствуют району УВП.

Хорошее соответствие наблюдается и для районов: ПВП; УВП и СВП. В отношении капусты наилучшие условия соответствуют району КППВ. Хорошее соответствие наблюдается и для района ПВП.

Влагозапасы в почвах Воронежской области накапливаются в марте и расходуются до октября включительно (рис. 4). Наблюдается закономерное снижение влагозапасов за период вегетации растений, которое описывается полиномиальной зависимостью с коэффициентом достоверности не ниже 0,93. Минимум зависимости приходится на август месяц с последующим незначительным повышением влагозапасов, что согласуется с количеством атмосферных осадков за теплый период года (снеготаяние приводит к накоплению влаги в почве в конце марта).

Для почвенных водохранилищ Воронежской области в слое почвы 0...100 см наблюдается зависимость между влагозапасами на начало (конец марта) и конец холодного периода (конец октября) (рис. 5).

Зависимость практически линейная, что показывает достаточно высокий «коэффициент связности». Потери воды оцениваются в 3%. Данная зависимость определяет несколько стратегий управления гидромелиоративным режимом:

- оптимизация условий выращивания растений (чем меньше накоплено влагозапасов, тем больше потребуются вегетационных поливов и большей оросительной нормы);
- оптимизация условий почвообразования (увеличение активности почвенных организмов), это позволит увеличить поглощение углерода из атмосферы в период слабой активности посевов;
- снижение паводковой опасности – меньшая влагонасыщенность почв весной, позволит большую часть талой (поверхностной) воды перевести в грунтовую, снижая объем поверхностного стока, а значит, снижая максимальные расходы в водоприемнике. (Паводок 2024 г. показал необходимость учета данной составляющей).

Рассмотрим указанные стратегии применительно к вопросам снижения углеродного следа. Первая

стратегия подразумевает проведение влагозарядковых поливов и эффективна для создания оптимальных условий произрастания многолетних трав и озимых растений (весной растения активно вегетируют). Растения фотосинтезируют и поглощают атмосферный углерод.

В случае выращивания яровых культур следует оптимизировать условия для почвенных организмов, повышая почвенного плодородия. В этом случае управление почвенными влагозапасами (водохранилищами)

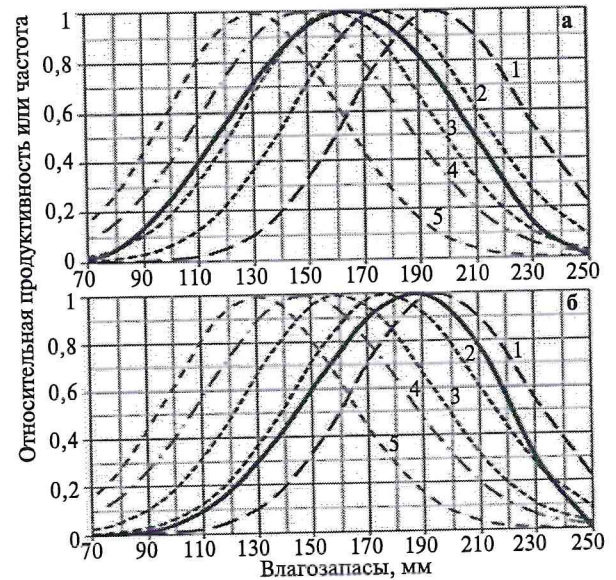


Рис. 3. Соответствие требований многолетнего злакового травостоя (а) и капусты (б) кривым распределения почвенных влагозапасов в слое 0...50 см: 1 – КППВ; 2 – ПВП; 3 – УВП; 4 – СВП; 5 – ОСВП

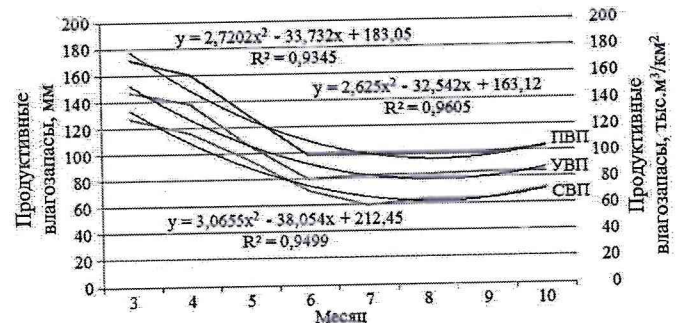


Рис. 4. Изменение продуктивных почвенных влагозапасов (слой 0...100 см) в течение теплого периода года

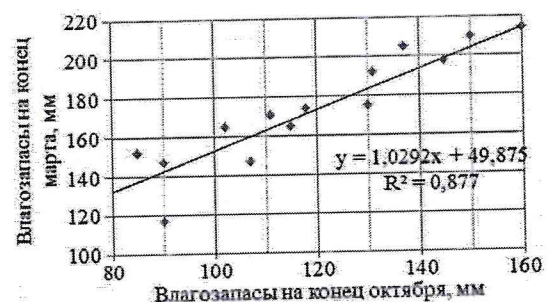


Рис. 5. Зависимость влагозапасов на конец марта от влагозапасов на конец октября

осуществляется в соответствии со второй стратегией, для активизации почвенной биоты. Это позволит депонировать углерод.

По мере роста растительности, приоритет оптимизации водного режима изменяется в сторону создания оптимальных условий для растений (первая стратегия). Это позволит повысить продуктивность и максимизировать поглощение углерода. К концу теплого периода, после уборки урожая, приоритет опять переходит к почвенной биоте (вторая стратегия). Таким образом, в течение всего теплого периода года, максимизируется суммарная биомасса системы растение–почва. Суммарная биомасса включает надземную и подземную части растений. Количество поглощенного углерода можно оценить, зная, что в среднем, содержание углерода в растениях составляет 45 % их массы.

На примере Воронежской области, проведена оценка поглощения углерода растениями, с учетом

оптимизации условий произрастания растений и деятельности почвенной биоты на катене. При этом выбираются растения, которые наилучшим образом соответствуют условиям, формирующимся в разных частях катены (агрогидрологических районах) – влаголюбивые и малотребовательные к влаге культуры (табл. 1).

Эти параметры входят в уравнение продуктивности [18], которое в безразмерном виде выглядит так:

$$S = \left( \frac{\varphi}{\varphi_{opt}} \right)^{\gamma_{opt}} \left( \frac{\varphi_{max} - \varphi}{\varphi_{max} - \varphi_{opt}} \right)^{\gamma(\varphi_{max} - \varphi_{opt})}$$

где S – относительная продуктивность; φ – относительные влагозапасы. Величина параметра γ зависит от вида растения или почвенной биоты.

Требования биоты почв учитываются на основе «Закона оптимальности» и «Закона адаптации», в которых говорится, что система оптимальным образом развивается в определенных пространственно-временных пределах и наилучшим образом приспособлена к условиям ее исторического и эволюционного развития [11], поэтому они могут быть описаны уравнением, приведенным выше [18]. В связи с тем, что формирование почвенной биоты происходит в природных условия формирования почв, вид кривых требований почвенной биоты должен совпадать с кривыми распределения вероятности основных факторов, в частности влагозапасов [9]. Кривая распределения почвенных влагозапасов в слое 0...50 см хорошо соответствует закону нормального распределения. Для параметризации его используются среднееголетние влагозапасы и их среднеквадратическое отклонение (табл. 2).

На рис. 6 показано соответствие требований растений (кривая 1) кривым распределения влагозапасов. Последние отражают условия произрастания растений в конкретных агрогидрологических районах Воронежской области (по В.Н. Маркину) и характеризуют требования почвенной биоты.

Наилучшее соответствие условий среды и требований зерновых наблюдается для района СВП. Картофелю и капусте лучше соответствуют условия района УВП и ПВП, а многолетним злаковым травам – УВП (табл. 3). Выращивая данные культуры в соответствующих районах катены, получим урожайность растений на уровне продуктивности не менее 0,8, а степень оптимальности условий почвообразования более 0,8. В табл. 3 выделены районы, где условия для растения и почвенной биоты наиболее благоприятны для получения высокого урожая при сохранении плодородия.

Высокие значения относительной продуктивности соответствующим

Характеристика растений: оптимальные влагозапасы в долях от полной продуктивной влагоемкости  $w_{opt}$ , коэффициент саморегулирования растений  $\gamma$ , максимальная урожайность  $Y_{max}$

Вид растений	$w_{opt}$	$\gamma$	$Y_{max}$ , ц/га	Соотношение надземной и подземной части
Зерновые (яровая пшеница)	0,65	5,0	106	1,5/1,5*
Овощи (капуста)	0,67	5,3	600	1,0/0,5
Картофель	0,54	5,6	400	0,6/1,0
Многолетние травы	0,57	6,2	190	1,0/3,0

Примечание. \*Солома и корни по отношению к массе зерна.

Таблица 1

Среднеголетние влагозапасы  $w_{cp}$  в слое 0...50 см и их среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  за период вегетации

Тип почвы	ВЗ	ПВ	Агрогидрологические районы					
			СВП		УВП		ПВП	
			$w_{cp}$ , мм	$\sigma$ , мм	$w_{cp}$ , мм	$\sigma$ , мм	$w_{cp}$ , мм	$\sigma$ , мм
Суглинок	60	250	130	33	165	33	185	45

Примечание. ВЗ – влажность завядания; ПВ – полная влагоемкость.

Таблица 2

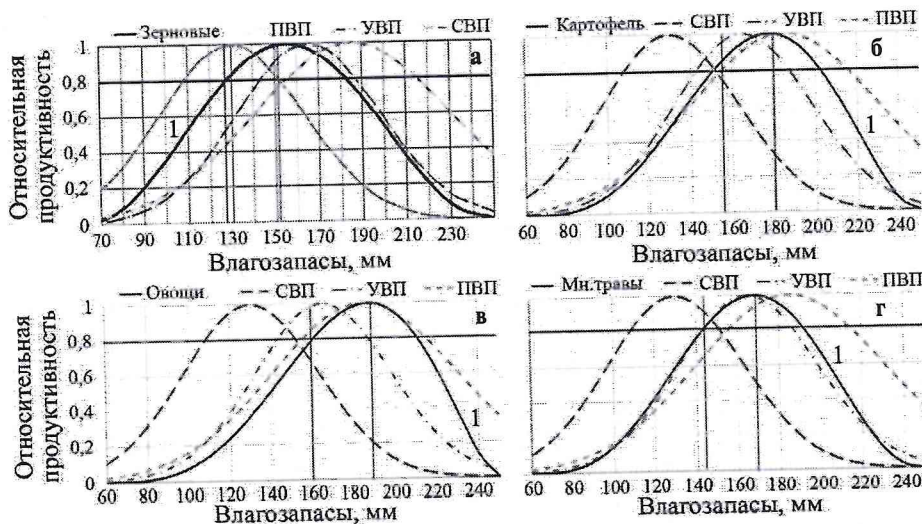


Рис. 6. Соответствие требований растений (кривая 1) кривым распределения влагозапасов в слое 0...50 см

Таблица 3

Урожайность растений, биомасса надземной и подземной части, относительная характеристика продуктивности почвенной биоты

Растение	У, ц/га	Биомасса, ц/га		Агрогидрологический район**		
		Надземная	Подземная	СВП	УВП	ПВП
Зерновые	80	200*	120	0,98/0,8	0,5/0,99	0,4/0,75
Картофель	320	192	320	0,8/0,3	0,9/0,9	0,85/1
Капуста	480	480	240	0,7/0,2	0,98/0,8	0,8/1
Многолетние травы	152	152	456	0,9/0,5	0,8/1	0,65/0,97

Примечание. \*Урожай зерна + солома; \*\*относительная биомасса растения (числитель) и почвенной биоты (знаменатель) на уровне продуктивности растений  $0,8 \leq S \leq 1$ .

ют значительной массе поглощенного углерода, в надземной и подземной частях растений (табл. 4). Наибольшее депонирование углерода зерновыми культурами отмечается в районах СВП и ПВП. В отношении картофеля и многолетних трав таким районом является УВП. Капуста дает наибольшее поглощение углерода в районах УВП и ПВП.

**Закключение.** Управление ресурсами почвенных вод в эпоху зеленой экономики является актуальной задачей, которую невозможно решить без целенаправленного управления внутрипочвенным пространством.

1. Целенаправленное управление емкостью водосодержащего порового пространства почвы позволяет одновременно решать две задачи: экономическую и экологическую. Но для создания законодательной базы и оплаты экологической составляющей целесообразно введение понятия «почвенные водохранилища».

2. Неправильный режим управления почвенной влагой (объемами почвенных водохранилищ) приводит к снижению биомассы растения и почвенной биоты.

3. Снижение биомассы растений и почвенной биоты на водосборе реки снижает общий объем депонирования углерода, приводит к разрушению порового пространства (уменьшению емкости почвенного водохранилища) и смыву почв.

4. В целях разработки количественных методов управления водными ресурсами почв целесообразно рассматривать влагозапасы почвы как воды «почвенных водохранилищ», а пространство доступной биотическому сообществу почвенной влаги — как «емкость почвенного водохранилища».

5. Емкость почвенного водохранилища может меняться по глубине в зависимости от механического состава почвы, методов воздействия на почву и деятельности в системе почвенная биота—растение.

6. «Ценность» водных ресурсов почвы для продукционного процесса различна по глубине почвы и во времени, что необходимо учитывать при регулировании водного режима в системе растение—почвенная биота.

7. Требования почвенной биоты и сельскохозяйственного растения к водному режиму могут не совпадать. Это необходимо учитывать при разработке мелиоративных систем управления.

8. При разработке режимов управления почвенными водохранилищами максимизация целевой функции — суммарной биомассы сельскохозяйственного растения и почвенной биоты, дает возможность максимизировать объем депонирования углерода.

9. Максимизация урожая сельскохозяйственной культуры может привести к созданию неоптимальных условий для почвенной биоты и снижению суммарно-

Суммарная масса углерода, депонированная в биомассе растений в разных агрогидрологических районах, т/га

Растение	Агрогидрологический район			Максимум по культуре
	СВП	УВП	ПВП	
Зерновые	14	12	14	14
Картофель	14	25	22	25
Капуста	24	32	32	32
Многолетние травы	20	27	24	27
Максимум по катене	24	32	32	

Таблица 4

го эффекта: [(стоимость урожая) + (стоимость плодородия)] — (штрафы за углеродный след).

10. Почвенные водохранилища содержат огромные запасы воды, связанные между собой, которые могут управляться с помощью агротехнических, лесотехнических и мелиоративных мероприятий. Наибольшую мобильность обеспечивают гидромелиоративные мероприятия, что позволяет их выделить как основные.

11. Учет разнообразия почвенных водохранилищ на катене позволяет: решать задачи сохранения почвенного плодородия и повышать продуктивность почвенной биоты; определять оптимальное размещение культуры для выращивания на конкретном элементе катены в соответствии с требованиями растений к условиям среды; планировать дифференциацию использования элементов катены для снижения углеродного следа.

**Благодарность.** Авторы признательны кафедре гидромелиорации и проблемной лаборатории РГАУ-МСХА за предоставленные материалы для проведения работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технологии для смягчения последствий изменения климата. Сельскохозяйственный сектор / Д.С. Апреди, Субаш Дхар, Донг Хонгмин, Брюс А. Кимбал, Амит Гарг, Джикшиша Ападжэй. UNEP, 2012 166 с. URL: <https://unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/2/2019/06/5-technologies-for-climate-change-mitigation-agriculture-russian-final-2.pdf>.
2. Ахмедов А.Д., Абдулова Р.Ю. Продуктивность использования влаги белокачанной капустой при орошении в Волго-Донском междуречье // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 2(62). С. 32–41. DOI 10.32786/2071-9485-2021-02-03. EDN LUWIDI.
3. Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России: экспертный доклад / Под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова (рук. авт. кол.); М.П. Орлов, К.В. Пиксендеев, Ю.Е. Ровнов и др. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с.
4. Великандь Н.Т., Желтопузов В.Н., Хонина О.В. Урожайность и водопотребление агрофитоценозов многолетних трав // Вестник АПК Старополя. 2017. № 2(26). С. 181–184. EDN YULID.

5. ФАО: Выпущена самая полная в мире карта запасов углерода в почве [Электронный ресурс]. URL: <https://agroexpert.md/rus/v-mire/fao-vypushchena-samaya-polnaya-v-mire-karta-zapasov-ugleroda-v-pochve>

6. О Федеральной научно-технической программе в области экологического развития российской федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг. [Электронный ресурс]. URL: <http://science.gov.ru/media/files/file/wJgekXcVWebxcQmGATo4C8EHE2ZFjBh9.pdf> (дата обращения 27.07.2022).

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620353 РФ. Декадная продуктивность озимых зерновых культур на почвах глинистого и суглинистого механических составов по агрогидрологическим районам Саратовской области: № 2021620248; заявл. 20.02.2021; опубл. 01.03.2021 / Н.Н. Дубенок, А.Д. Солошенко, В.В. Шабанов; заявитель ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». EDN IVQEJY.

8. Ковалев Ю.Ю., Поршнева О.С. Страны БРИКС в международной климатической политике // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Международные отношения. 2021. Т. 21. № 1. С. 64–78.

9. Маркин В.Н., Шабанов В.В. Обоснование орошения с учетом сохранения условий естественного почвообразования в Воронежской области // Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства: материалы III Международной научно-практической конференции факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 348–356.

10. О стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176 // СЗ РФ. 24.04.2017. № 17. Ст. 2546.

11. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). М.: Журнал «Россия молодая», 1994. 368 с.

12. Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г. Природные ресурсы мира. М.: Изд-во московского университета, 1993. 304 с.

13. Скворцова С.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенноизмененных почв: дис. ... д-ра с.-х. наук: 03.00.27. М., 1999. 387 с.

14. Средние многолетние запасы продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми зерновыми культурами по областям, краям, республикам и экономическим районам: Европейская часть СССР: справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. 122 с.

15. Шабанов В.В., Солошенко А.Д. Дифференциация типов увлажнения по катене для рационального размещения сельскохозяйственных культур и планирования мелиоративных воздействий // Природообустройство. 2016. № 3. С. 104–109. EDN WJLCRX.

16. Шабанов В.В., Маркин В.Н., Солошенко А.Д. Оценка требований почвенной биоты к гидротермическим условиям внешней среды // Доклады ТСХА, Москва, 3–5 декабря 2019 г. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. С. 173–178. EDN JLEAZR.

17. Шабанов В.В., Голованов А.И. Некоторые аспекты точной мелиорации // Природопользование. 2019. № 1.

18. Шабанов В.В. Биоклиматическое обоснование гидротермических мелиораций. Л.: Гидрометеиздат. 1973.

19. Экологический словарь (2001) [Электронный ресурс]. URL: <http://bio.niv.ru/doc/dictionary/ecological/index.htm>

20. Conant R.T., Paustian K. and Elliott E.T. (2001): Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. Ecological Applications, 11, pp. 343–355.

21. United Nations Environment Programme (2020). Greening the Blue Report 2020: The UN System's Environmental Footprint and Efforts to Reduce it. Geneva: UNEP.

#### REFERENCES

1. Apriti D.S., Subash Dhahr, Dong Hongmin, Bruce A. Kimball, Amit Garg, Jikisha Apadhya. Technologies for Climate Change Mitigation – Agricultural Sector. UNEP, 2012. P. 166. URL: <https://unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/2/2019/06/5-technologies-for-climate-change-mitigation-agriculture-russian-final-2.pdf>
2. Akhmedov A.D. Water Use Productivity of Cabbage under Irrigation in the Volga-Don Interfluvium / A.D. Akhmedov, R.Yu. Abduova // Izvestiya of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2021. No. 2(62). Pp. 32–41. DOI 10.32786/2071-9485-2021-02-03. EDN LUWDIU.
3. Battle for Climate: Carbon Farming as Russia's Bet [Text]: Expert Report / Ed. A.Yu. Ivanov, N.D. Durmanov (Head of the Author's Team); M.P. Orlov, K.V. Piskendejev, Yu.E. Rovnoy et al.; National Research

University «Higher School of Economics». Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2021. 120 p.

4. Velikdany N.T. Yield and Water Consumption of Agroecosystems of Perennial Grasses / N.T. Velikdany, V.N. Zheltopuzov, O.V. Khonina. // Bulletin of the Agricultural Complex of Stavropol. 2017. No. 2(26). Pp. 181–184. EDN YULJD.

5. The Most Comprehensive Carbon Stock Map in Soil Released [Electronic Resource]. URL: <https://agroexpert.md/rus/v-mire/fao-vypushchena-samaya-polnaya-v-mire-karta-zapasov-ugleroda-v-pochve>

6. On the Federal Scientific and Technical Program in the Field of Ecological Development of the Russian Federation and Climate Change for 2021–2030 [Electronic Resource]. URL: <http://science.gov.ru/media/files/file/wJgekXcVWebxcQmGATo4C8EHE2ZFjBh9.pdf> (accessed July 27, 2022).

7. Dubenok N.N. Certificate of State Registration of Database No. 2021620353, Russian Federation. Decadal Productivity of Winter Cereals on Clay and Loamy Soils by Agro-Hydrological Districts of Saratov Region: No. 2021620248; filed 20.02.2021; published 01.03.2021 / N.N. Dubenok, A.D. Soloshenkov, V.V. Shabanov; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy». EDN IVQEJY.

8. Kovalev Yu.Yu., Porshneva O.S. BRICS Countries in International Climate Policy // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: International Relations. 2021. Vol. 21. No. 1. Pp. 64–78.

9. Markin V.N., Shabanov V.V. Justification of Irrigation Considering the Preservation of Natural Soil Formation Conditions in Voronezh Region // Materials of the III International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Land Management and Cadastre of VSAU. Current Problems of Land Management, Cadastre, and Environmental Management. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2021. Pp. 348–356.

10. On the Strategy for Environmental Security of the Russian Federation for the Period up to 2025: Decree of the President of the Russian Federation No. 176 of April 19, 2017 // Collection of Legislation of the Russian Federation. April 24, 2017. No. 17. Art. 2546.

11. Reimers N.F. Ecology: Theories, Laws, Rules, Principles, and Hypotheses. Moscow: Journal «Young Russia», 1994. 368 p.

12. Romanova E.P. Natural Resources of the World / E.P. Romanova, L.I. Kurakova, Yu.G. Ermakov. Moscow: Moscow University Press, 1993. 304 p.

13. Skvortsova S.B. Structure of Pore Space in Natural and Anthropogenically Altered Soils // Dissertation for the Degree of Doctor of Agricultural Sciences: 03.00.27. Moscow, 1999. 387 p.

14. Average Long-Term Productive Moisture Reserves under Winter and Early Spring Grain Crops by Regions, Territories, Republics, and Economic Areas: European Part of the USSR: Reference Book. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. Vol. 1. 122 p.

15. Shabanov V.V. Differentiation of Moisture Types along the Catena for Rational Placement of Agricultural Crops and Planning of Meliorative Impacts / V.V. Shabanov, A.D. Soloshenkov // Nature Management. 2016. No. 3. Pp. 104–109. EDN WJLCRX.

16. Shabanov V.V. Assessment of Soil Biota Requirements for Hydrothermal Conditions of the External Environment / V.V. Shabanov, V.N. Markin, A.D. Soloshenkov. // Reports of the Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow, December 3–5, 2019. Moscow: Timiryazev Russian State Agrarian University, 2020. Pp. 173–178. EDN JLEAZR.

17. Shabanov V.V. Some Aspects of Precision Melioration / V.V. Shabanov, A.I. Golovanov. // Nature Management, 2019, No. 1.

18. Shabanov V.V. Bioclimatic Justification of Hydrothermal Meliorations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973.

19. Ecological Dictionary (2001) [Electronic Resource]. URL: <http://bio.niv.ru/doc/dictionary/ecological/index.htm>

20. Conant R.T., Paustian K., and Elliott E.T. (2001): Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. Ecological Applications, 11, pp. 343–355.

21. United Nations Environment Programme (2020). Greening the Blue Report 2020: The UN System's Environmental Footprint and Efforts to Reduce it. Geneva: UNEP.

**Дубенок Николай Николаевич**, зав. кафедрой сельскохозяйственных мелиораций; <https://orcid.org/0000-0002-9059-9023>; **Маркин Вячеслав Николаевич**, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами, SPIN-код: 8019-0920, AuthorID: 378128; **Шабанов Виталий Владимирович**, науч. руководитель проблемной лаборатории, <https://orcid.org/0000-0001-9798-519X> (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва); **Солошенко Александр Дмитриевич**, науч. сотрудник лаборатории сравнительной генетики животных, <https://orcid.org/0000-0002-4601-9140> (Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва).