

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-39-61



Ссылки для цитирования:

Болотов А.Г., Калнина А.И., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Калиниченко Р.В., Филь П.П. Водный режим почвенного покрова агроландшафта для агроэкологической группировки земель // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 127. С. 39-61. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-39-61

Cite this article as:

Bolotov A.G., Kalnina A.I., Shein E.V., Dembovetskiy A.V., Kalinichenko R.V., Phil P.P., The water regime of the soil cover of the agricultural landscape and its components (using the example of the VNIIMZ experimental field in the Tver region), Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 127, pp. 39-61, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-127-39-61

Благодарность:

Исследования проведены по темам госзадания: FGUR-2025-0008 “Оптимизация сельскохозяйственного землепользования по экологическим и экономическим условиям в контексте современных вызовов” и “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” ЦИТИС: 121040800146-3.

Авторы выражают благодарность Лозбенеvu Н.И., Козлову Д.Н., Хитрову Н.Б., Шилову П.М. за предоставленную карту агроэкологических видов земель (Лозбенеv и др., 2024).

Acknowledgments:

The research was conducted on the topics of the State Assignment: FGUR-2025-0008 “Optimization of agricultural land use under environmental and economic conditions in the context of modern challenges” and “Physical foundations of ecological functions of soils: monitoring, forecasting, and management technologies” (CITIS: 121040800146-3).

The authors express their gratitude to Lozbenev N.I., Kozlov D.N., Khitrov N.B., and Shilov P.M. for providing the map of agroecological land types (Lozbenev et al., 2024).

**Водный режим почвенного покрова
агроландшафта для агроэкологической
группировки земель**

© 2026 г. А. Г. Болотов¹, А. И. Калнина¹, Е. В. Шеин^{1,2,3*},
А. В. Дембовецкий², Р. В. Калиниченко¹, П. П. Филь¹

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: evgeny.shein@gmail.com.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1.

³Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, Россия,
601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, п. Новый,
ул. Центральная, д. 3.

Поступила в редакцию 12.05.2025, после доработки 05.06.2025,
принята к публикации 27.01.2026

Резюме: Рассматриваются вопросы классификаций, формирования и выделения различных водных режимов в пространстве сельскохозяйственного поля с осушенными гончарным дренажем агродерново-подзолистыми почвами разной степени гидроморфизма на двучлене (Опытное поле ВНИИМЗ, около 52 га). Разделение водных режимов проведено с помощью пространственно распределенной физически обоснованной модели SWAT на базе программы QGIS и послойно экспериментально определенных гранулометрического состава, содержания органического вещества, плотности почв, карты рельефа и метеоданных за 2020–2022 гг. Выделено 7 элементарных гидрологических ареалов, которые отнесены к агроэкологическим видам и типам земель и определяются не только условиями водопереноса по поверхности почвы, но и обуславливаются внутripочвенными факторами: глубинами горизонтов, их гранулометрическим составом и проницаемостью подпочвенных горизонтов. Данные гидрологические участки отличаются интенсивностью водообмена, находятся в пределах земель, обладающих разной степенью гидроморфности: от сильнополугидроморфно-литогенных на юге и северо-западе до слабогидроморфных на севере и северо-востоке исследованного участка. Основу группировки земель по гидрологическому режиму составляют данные о морфологии почвенного профиля, глубине залегания морены и грунтовых вод, соответственно, а группировку земель на основе рельефа можно использовать как предварительную с обязательным ее дополнением почвенными гидрофизическими данными и расчетными процедурами.

Ключевые слова: движение влаги в почвенном покрове; гидрология почв; адаптивно-ландшафтное земледелие; SWAT.

The water regime of the soil cover of the agricultural landscape and its components (using the example of the VNIMZ experimental field in the Tver region)

© 2026 A. G. Bolotov¹, A. I. Kalnina¹, E. V. Shein^{1,2,3*},
A. V. Dembovetskiy², R. V. Kalinichenko¹, P. P. Phil¹

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: evgeny.shein@gmail.com.

²Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119991, Russian Federation.

³Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center,
3 Tsentralnaya Str., Novy village, Suzdal district,
Vladimir region, 3601261, Russian Federation.

Received 12.05.2025, Revised 05.06.2025, Accepted 27.01.2026

Abstract: The classification of soils water regimes is a basic scientific fundament of an interdependent relationship between the movement of water and the formation of a soil profile. This kind of classification provides a scientific and methodological platform for studying both the water regimes of soils in the landscape and the distribution of soils in the soil cover of the landscape. Numerical methods for representing the hydrological regimes of soils in the agricultural landscape are based on physical mathematical models of the soil water movement and spatial GIS information, together allowing to calculate, analyze and predict the water regimes of soils in the agricultural landscape. A spatial-dynamic SWAT (Soil-Water-Atmosphere-Tool) model is presented to describe the water regimes of soils in the agro-landscape of the finite moraine ridge of the Upper Volga postglacial region (East European Plain, Tver region), as an example of landscape numerical hydrological models. Experimental data on long-term observations of soil moisture correspond to the water calculated by the SWAT model at different times at a certain depth of the soil profile.

Keywords: water regimes of soils, movement of moisture in the soil, modeling, spatial hydrodynamic modeling, adaptive landscape agriculture, SWAT.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивно развивающаяся концепция землеустройства на

ландшафтно-экологической основе (Кирюшин, 1996; Кирюшин, 2010; Кирюшин, 2024), направленная на формирование устойчивых урожаев при управлении почвенными ресурсами, является важным направлением развития исследований почвенного покрова в агроландшафте. Одним из таких ресурсов почвенного покрова является водный режим не только агропроизводственного участка, но поля в целом, на котором агроэкологическими подходами требуется оценить и количественно прогнозировать водные режимы почв. Для такого рода анализа мозаики водных режимов почвенного покрова, их практической оценки для выращиваемых сельскохозяйственных культур требуется прежде всего агроэкологическая классификация водных режимов почв. При формирующемся агроэкологическом подходе известна подобная классификация. Ее автор, В.И. Кирюшин (Кирюшин, 2011), точно и определенно сформулировал требования к такого рода классификациям и исследованиям: это прежде всего масштаб агроэкологического ландшафта с характерными его подразделениями и особенностями при учете существующих в физике почв и агрофизике подходов к классификациям и оценке водных режимов почв, не теряющих связи с особенностями агроландшафта, его топографией и отвечающих задачам характеристики водного режима входящих в почвенный покров почв.

Прежде всего, это масштабная характеристика, определяющая зональные и агроландшафтные особенности с учетом пространственно неоднородных агроусловий. Данная необходимая черта анализа почвенного покрова, когда важно целенаправленно проанализировать водные ресурсы в ландшафте и представить водный режим почв как одну из характерных ландшафтных особенностей, определяющих в свою очередь влагообеспеченность растений. Распространены различные подходы к классификации водных режимов почв (табл. 1).

Первая и важнейшая задача в этом случае – выделить главенствующий фактор, определяющий водный режим в конкретном ландшафте, и ответить на соответствующий ключевой вопрос агропроизводства: когда, где и почему есть недостаток / избыток / оптимум влаги в корнеобитаемом слое для растений?

Таблица 1. Типы водного режима почв, их характеристики, классификации в целях научного обоснования методов и способов мелиорации

Table 1. Types of soil water regime, their characteristics, classifications for the purpose of scientific substantiation of methods and techniques of land reclamation

Тип водного режима почв	Характеристика	Классификация (Роде, 1985; Зайдельман, 1996)	Другие классификации
Автоморфные почвы	Наличие глубинного оттока влаги с нижней границы. Основное энерго- и массопоступление с верхней границы почвы.	Мерзлотный Промывной Периодически промывной Застойно-промывной Непромывной Выпотной Десуктивно-выпотной	Американская (по Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America, 1926.). Aridic – недостаток доступной воды в вегетационный период; период с доступной для растений водой при температура > 5 градусов более 90 дней. Torric – аналогичен aridic, но учитывает почвенный профиль (тип почвы, горизонты и гидрологические слои). Udic – засушливый. 90 дней после летнего солнцестояния и температура на 50 см менее 5 градусов. Ustic – полуаридный, периоды засухи с температурой < 5 градусов глубже 50 см. Xeric – средиземноморский, теплый, но увлажнение только в зимний период. Aquic – водонасыщенные почвы.

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Тип водного режима почв	Характеристика	Классификация (Роде, 1985; Зайдельман, 1996)	Другие классификации
Гидроморфные	Выделяются вследствие постоянного переувлажнения. В почвах выделяются водонасыщенные слои, анаэробные условия, наличие оглеения, глубина оглеения и почечного гумуса. Глубина залегания глеевого горизонта (пятен оглеения, новообразований) определяет классификационную принадлежность.	(Зайдельман, 1985; Зайдельман, 1996) Неоглеенные (глей глубже 150 см). Глубокооглеенные (глей с глубины 90 см). Слабооглеенные (глей с глубины 75 см). Глееватые (глей с глубины 60 см) – необходим дренаж. Глеевые (глей на 40 см).	(Кирюшин, 2010) Слабополугидроморфные. Полугидроморфные. Слабогидроморфные. Сильнополугидроморфно-литогенные. Гидроморфные. Литогенные.
Полугидроморфные	Почвы, в которых проявляется зональный тип при наличии гидроморфизма (например, черноземы оглеенные).	Анаэробизм вследствие периодического переувлажнения (Кирюшин, 2011).	

Конечно, основой такого выделения водных режимов является типизация агроландшафтов по их сложности, руководствуясь принципом “чем сложнее ландшафт, тем сильнее проявляется взаимосвязь его элементов через разного рода потоки, в том числе и водные, поверхностные и внутрипочвенные”. Безусловно, прежде всего указывается почвенно-климатическая зона расположения ландшафта, которую обычно выделяют по коэффициенту увлажнения (КУ). Так, например, выделяют избыточно влажную зону ($KУ > 1.33$), влажную ($1.33-1.0$), полувлажную ($1.0-0.77$), полусухую ($0.77-0.55$), засухливую ($0.55-0.44$), очень засухливую ($0.44-0.33$), полусухую ($0.33-0.22$), сухую ($0.22-0.12$), очень сухую ($KУ < 0.12$) (Кирюшин, 2010; Шестаков, 2003; Зайдельман, 1985; Зайдельман, 1996).

Далее уже следуют агроэкологические группы земель, которые выделяются по ведущим факторам, обеспечивающим влагообеспеченность агроландшафта, – эрозия, переувлажнение, засоление почв и др. (Simsek et al., 2019). Так как в основном классификации агроландшафтов проводятся по сложности ландшафта, руководствуясь вышеуказанным принципом: “чем сложнее ландшафт, тем сильнее проявляется взаимосвязь его элементов через водные и другие потоки” (Кирюшин, 2010); его особенности и были положены в основу разделения почв по агроэкологическому принципу. Соответственно, В.И. Кирюшиным выделены: (1) плакорные земли; (2) эрозионные земли; (3) переувлажненные земли, которые разделяются в зависимости от гидрологического режима; (4) солонцовые и солонцово-солончаковые, земли овражно-балочного комплекса, литогенные, среди которых слабо-, средне-, сильно- и очень сильно эрозионные земли и (5) переувлажненные земли, которые разделяются в зависимости от гидрологического режима, степени экологического переувлажнения и, соответственно, характера их использования. По реакции растений и наличию мелиоративных мероприятий (дренаж, агротехнические и пр.) среди переувлажненных выделяют слабопереувлажненные, средне- и сильнопереувлажненные почвы. Отметим, что предложенная В.И. Кирюшиным классификация водных режимов агроландшафтов является во многом топографической с учетом рельефа в виде основного фактора, влияющего на водный режим поч-

венного покрова. Не отрицая важного, формирующего составляющего водного режима – топографического фактора (Shein et al., 2021), при рассмотрении водных режимов почвенного покрова хотелось бы отразить и почвенные условия, прежде всего мощность почвенного профиля, его строение, глубину залегания подстилающей породы, уровень грунтовых вод, гранулометрический состав профиля, так как именно эти почвенные факторы во многом определяют распределение осадков, особенно в условиях близкого залегания подстилающих пород (морены, боковые и донные морены и пр.) (Belik et al., 2019; Belik et al., 2020; Yu et al., 2021). В связи с этим в данном исследовании основное внимание было сосредоточено на характеристике почвенно-физических свойств: залегания морены, надморенного суглинка, особенностях гранулометрического состава почвенных слоев в почвенном покрове Опытного поля института ВНИИМЗ (Тверская обл.). Цель исследования: разработать подходы к оценке водного режима различных участков почвенного покрова сельскохозяйственного поля. Задачи: (1) обоснование применения ландшафтной математической модели для выделения почв с различными водными режимами, (2) выделение ареалов по различной интенсивности взаимоперетока влаги и (3) обоснование основных почвенных факторов, определяющих водный режим почв и влагообеспеченность сельскохозяйственных растений в данном агроландшафте, являющихся основой для обоснования мелиоративно-агротехнических мероприятий.

При сравнении представленных в таблице 1 различных классификаций типов водного режима, становится ясно, что обоснование водных режимов в агроландшафте нуждается, прежде всего, в точных и долговременных наблюдениях за влажностью почвы и в получении ответов на вопросы: когда, в какой толще почвенная влажность приближается к полной влагоемкости (ПВ), к влажности менее влажности завядания (ВЗ) и диапазону доступной влаги. Величина ПВ указывает на наличие гидроморфизма и возможности образования глеевого горизонта, глубина залегания которого служит классификационным признаком (табл.1). Более того, в ряде научных подходов подчеркивается роль почвы, водопроницаемости ее слоев, глубины и расположения подстилающего

горизонта, формирующего нижнюю границу почвы и ряд других гидрофизических внутрипочвенных свойств и характеристик. Именно эти внутрипочвенные свойства, как правило, незаметные при рельефном исследовании, и определяют водорегулирующую роль почвы в пространстве агроландшафта (Зайдельман, 1985; Зайдельман, 1996). При мелиоративном обустройстве следует знать происхождение вод, вызывающих гидроморфизм, среди которых в самом общем виде выделяют атмосферные, грунтовые, грунтово-напорные, склоновые и намывные (пойменные). Следует отметить, что используемые ныне подходы, разработанные Ф.Р. Зайдельманом и В.И. Кирюшиным, для выделения гидроморфных почв, подлежащих технической мелиорации (дренажу) и особым агротехническим приемам в виде вспашки и систем севооборотов (посев разных по влагопотреблению растений и пр.), действительно и наиболее востребованы в настоящее время. В частности, гидроморфные почвы, относящиеся к неоглееным, глубокооглееным (глей с глубины 90 см и ниже) и слабооглееным (глей с глубины 75 см), при учете происхождения и глубины грунтовых вод (Зайдельман, 1996; Bouma et al., 1980; Bouma, 2006), вызывающих гидроморфизм, принципиально не нуждаются в технических мелиоративных мероприятиях, а вполне могут обходиться агротехническими и вегетационными (состав растений и пр.). В этом отношении особо важными становятся научное обоснование текущего водного режима почв, возможности цифрового регионального их выделения и научно обоснованного управления.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследования гидрологического режима было выбрано опытное поле на территории ВНИИМЗ в г. Эммауссе. Объект находится в Калининском муниципальном округе в 4 км на юго-запад от г. Твери. С северной и северо-западной стороны опытное поле ограничивается Ленинградским шоссе (часть Федеральной трассы “Россия”), с юго-восточной стороны участок огражден поселениями “Губино” и “Прибытково”. Исследуемый участок находится в зоне умеренно-континентального климата со значениями гидротермического коэффициента в пределах от 1.4 до 1.8 (Мирзоев, Мирзоев, 1994). На территории опытного поля заложен гон-

чарный дренаж закрытого типа. Глубина закладки дрен составляет около 1 м. Междреннее расстояние составляет в среднем 30 м (Иванов и др., 2021). В данной статье, как характерный пример почв Нечерноземной зоны, в качестве объекта исследования рассматривается агродерново-подзолистая глееватая супесчаная почва на двучлене. Некоторые свойства этой почвы представлены в таблице 2, а также приведены в публикациях (Иванов и др., 1999; Иванов и др., 2021; Шеин и др., 2021). Отметим, что при морфологическом описании указанных почв были выделены следующие почвенные горизонты:

Р (0–21 см) – пахотный, гомогенный, опесчаненный суглинок, уплотнения плужной подошвы не наблюдается, хотя в нижней части слегка уплотнен.

ВТ (21–46 см) – светлый, опесчаненный, светлее предыдущего, палевый, отмытый.

ВТg (46–90 см) – признаки (пятна) красновато-бурые, пылеватый, в нижней части – моренные включения, камни, редкие светлые пятна оглеения; микроновообразования; железисто-марганцевые включения.

С (глубже 90 см) – тяжелосуглинистая, красновато-бурая морена со следами (светлыми и грязно-голубыми пятнами) оглеения, моренные включения, камни.

Экспериментальные исследования проводились в естественных условиях и на образцах различных горизонтов указанной выше почвы. Использовались традиционные методы морфологического описания и методы полевой физики почв (Шваров и др., 2012), а также лабораторные приборные методы дифрактометрии, седиментации (Дембовецкий и др., 2024). Для более подробного исследования водного режима в почвенном покрове участка были проведены исследования гранулометрического состава и отдельных элементов гидрологии (в частности, глубины грунтовых вод, их динамики в течение вегетационного сезона). В рамках данной статьи будут рассмотрены некоторые из точек наблюдения под соответствующими номерами (рис. 1). Выбор данных точек обусловлен их положением в ландшафте и наличием экспериментальных данных по измерениям уровня грунтовых вод.

Таблица 2. Некоторые физические и химические свойства агродерново-подзолистой глееватой легкосуглинистой (суглинок опесчаненный) почвы

Table 2. Some physical and chemical properties of agro-soddy-podzolic gleyic light loamy (sandy loam) soil

Горизонт, глубина, м	Глубина, см	Влажность гигроск., %	Влажность наименьшей влагоемк. (НВ), %	Плотность почвы, г/см ³	Плотность твердой фазы, г/см ³	Содержание углерода, %	*Содержание глины (<2 мкм), %	*Содержание песка (50–200 мкм), %
P	0–21	1.36	18.1	1.12	2.59	2.53	6.5	48.5
BT (21–46 см)	30–40	0.92	17.8	1.23	2.63	0.85	4.5	67.3
BT _g (46–90 см)	70–80	0.96	24.3	1.42	2.69	0.52	5.5	56.4

Примечание. * – приведены фракции гранулометрического состава, используемые в WRB.

Note. * – particle size fractions used in WRB.

Для пространственного определения гидрологического режима использовалась модель SWAT на базе программы QGIS (версия 3.28) (Шеин, и др., 2023). Для моделирования были использованы несколько блоков данных: цифровая модель рельефа, почвенная карта, карта землепользования с сопутствующими таблицами значений, а также данные об осадках.

В данном исследовании в качестве исходной для пространственного разделения применялась классификация видов земель, основанная на агроэкологической оценке земель по В.И. Кирюшину (Кирюшин, 2011), использовались цифровые снимки рельефа поверхности, снимки малых летательных аппаратов и почвен-

ные описания (Лозбенев и др., 2024). Вид земель приурочен к одной почве на уровне разновидности (до грансостава), сходному составу пород (в данном случае – составу пахотного горизонта и глубине залегания морены) и расположен в пределах одного элемента мезоформы рельефа (верховья ложбин, моренный холм и др.). Основным фактором дифференциации почвенных условий в данной карте служит перенос воды по поверхности почвы и мощность песчаной толщи поверх морены. В легенде толщи песка поверх морены разделены на 3 вида: 1) морена залегает ближе 50 см от поверхности, 2) морена находится на глубине 50–100 см и 3) морена находится глубже 1 м от поверхности. Именно глубина залегания морены в данном случае является основным классификационным признаком выделения разных водных режимов почв в агроландшафте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании водного режима с помощью модели SWAT на опытном поле были выделены гидрологические участки (subbasins), каждый из которых состоит из верховья (водораздела), водосборной части, водотока и стока (рис. 1).

Определение границ гидрологических участков обуславливается размерами входящих в их состав ландшафтных единиц (“Landscape Units”, представляют собой однородные по рельефу территории с близкой динамикой влажности) и основано на законе гидрологии, который указывает, что анализ и управление водными ресурсами следует вести в масштабе водосбора, зная условия его формирования, условия накопления и расхода воды на выделенном участке. Всего на опытном поле было выделено 7 гидрологических участков, а водотоки отличаются разной интенсивностью (синие – более интенсивные, называемые потоками, “Streams”; голубые – менее интенсивные, берущие начало у источника влаги, в нашем случае – это атмосферные осадки).

С практической точки зрения объект исследования может быть разделен на участки, однородные по ландшафту и геоморфологии. В данном случае на основе программы SWAT участки опытного поля были разбиты на 7 гидрологических субводосборов на основе рельефа, карты землепользования, карты почв и данных

об осадках (рис. 1). Указанные свойства важны при масштабных построениях поверхностных водотоков и агропланировке. Данный подход должен обязательно учитывать особенности почвенно-физических свойств и режимов для определения способов и методов мелиоративного обустройства, в частности, агротехническими мероприятиями, направленными на улучшение физических свойств почвы, ее пахотного слоя, влагообеспеченности растений.

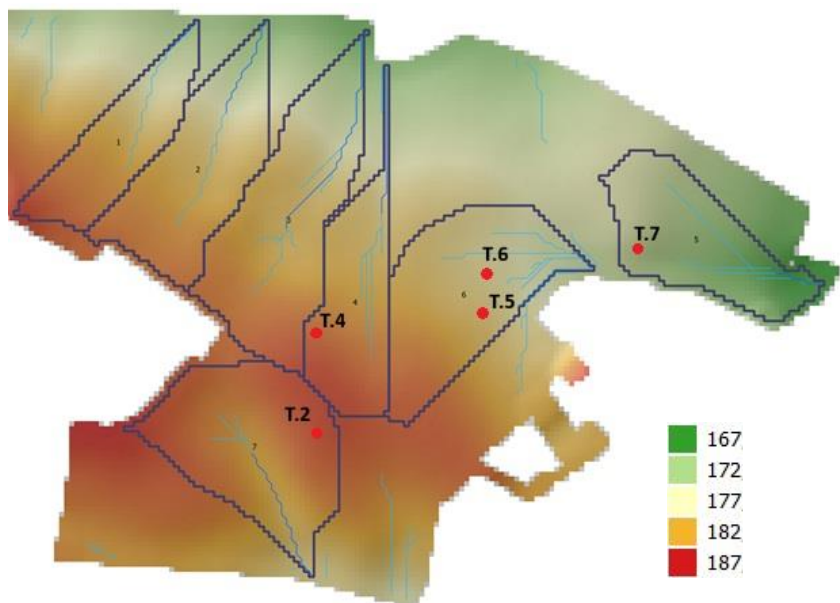


Рис. 1. Карта местности с выделенными по SWAT гидрологическими участками (subbasins) и почвенными водотоками. Номера почвенных разрезов отмечены красным цветом. Справа приведена высотная шкала (высота над уровнем моря в метрах).

Fig. 1. A map of the area with SWAT-delineated hydrological (subbasins) and soil watercourses. Soil section numbers are marked in red. The elevation scale (altitude in meters above sea level) is shown on the right.

Сравним выделенные гидрологические участки с картой агроэкологических видов земель (рис. 2). Данные карт хорошо согласуются. Выделенные водотоки находятся в пределах земель разной степени гидроморфности (от слабополугидроморфно-литогенных до слабогидроморфных по Кирюшину (Кирюшин, 2011)), за исключением гидрологического участка № 5, где интенсивный водоток (отмеченный синим цветом) проходит через литогенные земли, в то время как чуть западнее от него находятся гидроморфные участки.

Указанное расхождение может быть следствием того, что SWAT при выделении водных потоков опирается больше на поверхностный рельеф, а при агроэкологической оценке главным фактором является расположение слабопроницаемого слоя (морены). На всех остальных гидрологических участках ясно видны места сбора атмосферных осадков и их транзит в понижения с нарастанием интенсивности потоков.

Рассмотрим также зоны формирования локального стока на основе топографических факторов. На рисунке 3 представлен пример моделирования по данным цифровой модели рельефа локальных микроводосборов на опытном поле. Топографический индекс влажности (TWI) служит индикатором перераспределения выпавших на поверхность почвы атмосферных осадков (или весеннего снеготаяния), которые формируют поверхностный и внутрипочвенный сток:

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\tan \beta} \right),$$

где α – удельная водосборная площадь, β – угол наклона.

Отметим, что карты на рисунках 1 и 3 согласуются во многом, потому что опираются на цифровую модель рельефа. В местах аккумуляции влаги расположены гидроморфные разновидности земель (рис. 2). Заметим также, что карта гидрологических участков SWAT более широко показывает участки с возможным переувлажнением и переходные зоны от возвышенностей к низинам, что позволяет увидеть более полную картину складывающегося водного режима.

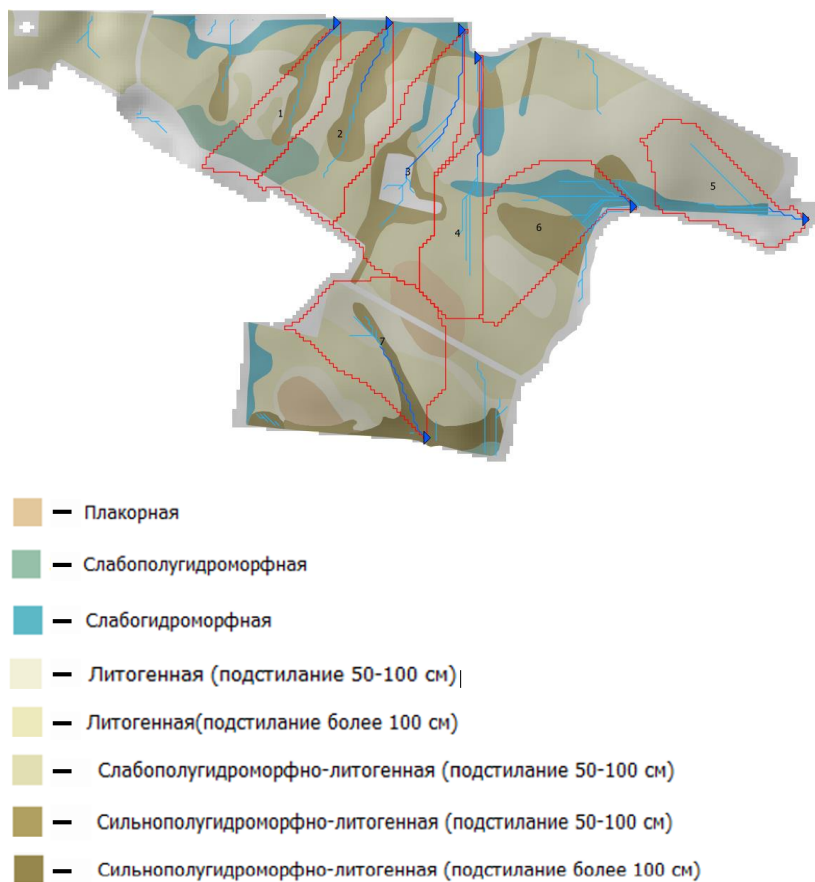


Рис. 2. Совмещенные карты гидрологических участков SWAT и агроэкологических видов земель (Лозбенев и др., 2024). Красным контуром выделены участки (subbasins), голубые и синие линии – водотоки разной степени интенсивности.

Fig. 2. Combined maps of SWAT hydrological areas and agroecological land types (Lozbenev et al., 2024). Subbasins are outlined in red, while light blue and blue lines represent streams of varying intensity.

Добавление почвенной гидрологической функции принципиально изменяет ситуацию в группировке. Учет сложной структуры почвенного покрова позволяет выйти за рамки положений группировки земель на основе топографических факторов.

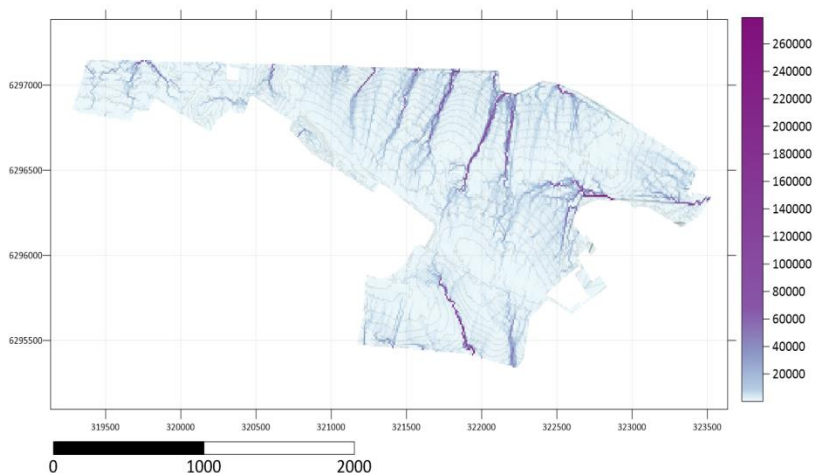


Рис. 3. Карта локальных микроводосборов и водотоков Опытного поля ВНИИМЗ на основе TWI.

Fig. 3. Map of local micro-catchments and watercourses of the VNIIMZ Experimental Field based on TWI.

Отметим различия в гидрологическом режиме выделенных участков путем сравнения уровня грунтовых вод, во многом определяющих влажность почв в точках 4 и 7, находящихся на различных гидрологических участках при разной динамике уровня грунтовых вод в холодный период года (рис. 4).

Обе точки наблюдений (т. 4 и т. 7), на водоразделе и в низинной части, имеют ярко выраженный сезонный ход уровня грунтовых вод, близкую динамику их уровня. Зимой для обеих точек характерны высокие значения влажности, и если в точке 4 можно говорить о превалирующей роли атмосферного питания грунтовых вод в это время, то в понижении влага может накопи-

ваться благодаря интенсивному внутрипочвенному и поверхностному стоку. Согласно карте SWAT (рис. 1) наибольшая часть данного стока исходит из гидрологического субводосбора № 6 (который можно назвать “транзитным”, куда в свою очередь попадает часть атмосферных осадков с вершины гидрологического субводосбора № 4 (“аккумулирующий”). Гидрологический субводосбор № 5 имеет наибольшую площадь в низине и выполняет функцию накопления влаги и ее сброса с территории опытного поля.

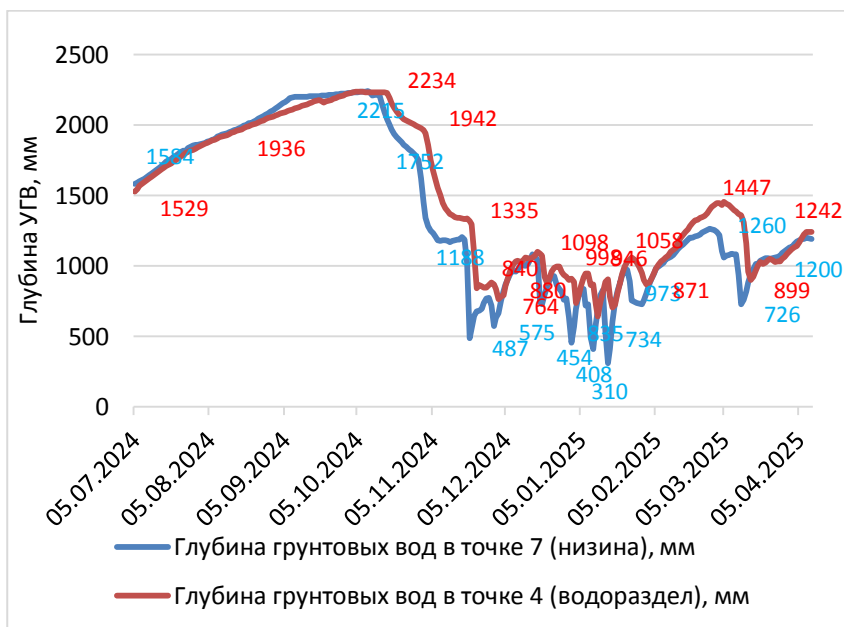


Рис. 4. Динамика УГВ на водоразделе (т. 4) и в низине (т. 7).

Fig. 4. Dynamics of groundwater level at the watershed (point 4) and in the lowland (point 7).

Также следует отметить, что на плакоре в грунтовом питании особую роль играет капиллярно-подвешенная влага в пахотном горизонте, что важно с точки зрения влагообеспеченности

посевов. В данном случае оподзоленный облегченный горизонт является слоем гидрологического разрыва вертикальных потоков капиллярной влаги. Познание причин и путей миграции влаги в пределах агроландшафта важно в задачах управления в земледелии. Например, применение агромелиоративных приемов разрушения плужной подошвы в транзитной зоне позволит уменьшить внутрипочвенный сток с плакорной части, и тем самым увеличить влагообеспеченность с/х культур за счет капиллярно-подвешенной влаги в пахотном горизонте. На данном примере показано, что группировку земель на основе топографических факторов можно использовать как предварительную, с обязательным дополнением почвенной гидрологической функцией. Показано, что на плакоре период увлажнения пахотного горизонта длиннее, чем в транзитной зоне. Кроме того, в точках 4 и 7 существенную роль играют формирующиеся преимущественные потоки. Эти сквозные линии тока обусловлены строением почвенного профиля, почвенной структурой, наличием макропор и трещин, имеющих большое гидрологическое значение и не проявляющихся при обследовании почвенного покрова с поверхности, при оценке особенностей только рельефа местности.

ВЫВОДЫ

1. Для полного анализа распределения водных режимов в масштабе агроландшафта необходимо рассматривать формирующие водный режим почвенно-физические факторы: глубину почвенного слоя и уровень грунтовых вод, положение наименее водопроницаемого слоя (или подстилающей породы). Именно от этих почвенных факторов будет зависеть водный режим отдельных почв в почвенном покрове.

2 Почвенно-физическая агроландшафтная характеристика должна включать не только количественные описания поверхности почвенного покрова и свойства почвы, но и внутрипочвенный рельеф. Для случая опытного поля ВНИИМЗ показано, что необходимо учитывать глубину залегания морены, смены гранулометрического состава, плотности в почвенном профиле. При этом общее правило остается: “чем сложнее ландшафт, тем сильнее проявляется связь его элементов”. Это правило справедливо и для

внутрипочвенного рельефа, т. е. глубины залегания морены, почвенных слоев с разным гранулометрическим составом.

3. Для количественной оценки водных режимов почв в почвенном покрове агроландшафта необходимо использовать физически обоснованные математические пространственные модели (типа SWAT) с экспериментально полученными данными по почвенно-ландшафтному и агроклиматическому обеспечению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дембовецкий А.В., Тюгай З.Н., Шеин Е.В.* Гранулометрический состав почв: история, развитие методов, современное состояние и перспективы // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024. Т. 79. № 4. С. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-00-00>.
2. *Иванов Д.А., Корнеева Е.М., Салихов Р.А., Петрова Л.И., Пугачева Л.В., Рублюк М.В.* Создание ландшафтного полигона нового поколения // Земледелие. 1999. № 6. С. 15–16.
3. *Зайдельман Ф.Р.* Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Генетические, агрономические и мелиоративные аспекты. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 328 с.
4. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. М.: Изд-во МГУ, 1996. 382 с.
5. *Кирюшин В.И.* Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 687 с.
6. *Кирюшин В.И.* Классификация почв и агроэкологическая типология земель. СПб.: Лань, 2011. 288 с.
7. *Кирюшин В.И.* Концепция землеустройства на ландшафтно-экологической основе // Почвы – опора России: тезисы докл. IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Москва, Казань, 2024. С. 885–887.
8. *Кирюшин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: КолосС, 2011. 443 с.
9. *Кирюшин В.И.* Экологические основы земледелия. М.: Колос, 1996. 366 с.
10. *Лозбенев Н.И., Козлов Д.Н., Филь П.П., Хитров Н.Б., Шилов П.М.* Оценка влияния вида угодья и почвообразующих пород на содержание и запасы органического углерода в мелиорированных дерново-подзолистых почвах, Тверская область // Почвоведение. 2024. № 12. С. 1705–1735.

11. *Мирзоев Е.С., Мирзоев А.Е.* Конаковский район: краеведческий справочник. Тверь, 1995. 331 с.
12. *Роде А.А.* Почвенная влага. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 445 с.
13. Теории и методы физики почв / под ред. *Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского*. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
14. *Шваров А.П., Смагин А.В., Дембовецкий А.В., Умарова А.Б., Поздняков А.И., Фаустова Е.В.* Полевые методы определения физических свойств и режимов торфяных и минеральных почв: учебное пособие к полевой практике для студентов, обучающихся по направлению подготовки 021900 Почвоведение / под ред. *Е.В. Шеина*. М.: Гриф и К, 2012. 140 с.
15. *Шейн Е.В., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В., Усенко Д.Ю., Хархардинов Н.А., Вернюк Ю.И.* Использование модели SWAT для характеристики водного режима почв агроландшафта // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>.
16. *Шейн Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В.* Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 110. С. 5–21. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>.
17. *Шестаков В.М., Поздняков С.П.* Геогидрология. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 176 с.
18. *Belik A.A., Bolotov A.G., Shein E.V.* Application of neural network pedotransfer functions to calculate soil water retention curve // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012008>.
19. *Belik A.A., Kokoreva A.A., Bolotov A.G.* Characterizing macropore structure of agrosoddy-podzolic soil using computed tomography // Open Agriculture. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 888–897.
20. *Bouma J.* Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research // Geoderma. 2006. Vol. 131. P. 275–280.
21. *Bouma J., Dekker L.W., Haans J.C.F.M.* Measurement of depth to water table in a heavy clay soil // Soil Science. 1980. Vol. 130. P. 264–270.
22. *Dutta S., Sen D.* Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield // Sustainable Water Resources Management. 2018. Vol. 4. No. 3.
23. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America. Madison, 1926. 154 p.

24. Shein Y.V., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V. Soil hydrology of agricultural landscapes: quantitative description, research methods, and availability of soil water // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 9. P. 1367–1374.
25. Simsek U., Shein E.V., Mikailsoy F., Bolotov A.G., Erdel E. Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey Calcic Pantofluvic Fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey) // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. P. 296–299. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319030104>.
26. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C.-H.M. Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2021. Vol. 35. No. 3. P. 737–757.

REFERENCES

1. Dembovetskiy A.V., Tyugay Z.N., Shein E.V., Granulometricheskii sostav pochv: istoriya, razvitiye metodov, sovremennoye sostoyanie i perspektivy (Granulometric composition of soils: history, development of methods, current status, and prospects), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedeniye*, 2024, Vol. 79, No. 4, pp. 7–13, DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-00-00>.
2. Ivanov D.A., Korneeva E.M., Salikhov R.A., Petrova L.I., Pugacheva L.V., Rubluk M.V., Sozdaniye landshaftnogo poligona novogo pokoleniya (Creation of a new-generation landscape polygon), *Zemledeliye*, 1999, No. 6, pp. 15–16.
3. Zaydelman F.R., *Gidrologicheskiy rezhim pochv Nechernozemnoy zony. Geneticheskiye, agronomicheskiye i meliorativnyye aspekty* (Hydrological regime of soils in the Non-Black Earth zone: genetic, agronomic, and ameliorative aspects), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 328 p.
4. Zaydelman F.R., *Melioratsiya pochv* (Soil reclamation), Moscow: Izd-vo MSU, 1996, 382 p.
5. Kiryushin V.I., *Agronomicheskoe pochvovedeniye* (Agronomic Soil Science), Moscow: KolosS, 2010, 687 p.
6. Kiryushin V.I., *Klassifikatsiya pochv i agroekologicheskaya tipologiya zemel* (Soil classification and agro-ecological land typology), St. Petersburg: Lan', 2011, 288 p.
7. Kiryushin V.I., Kontseptsiya zemleupravleniya na landshaftno-ekologicheskoy osnove, In: *Pochvy – opora Rossii: tezisy dokl. IX s'yezda Obshchestva pochvovedov im. V.V. Dokuchayeva*. (The concept of land management based on landscape-ecological principles, In: Soils – the foundation of Russia: abstracts of reports at the IX Congress of the Society of

Soil Scientists named after V.V. Dokuchayev), Moscow, Kazan, 2024, pp. 885–887.

8. Kiryushin V.I., *Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proyektirovaniya agrolandshaftov* (The theory of adaptive landscape agriculture and the design of agro-landscapes), Moscow: KolosS, 2011, 443 p.

9. Kiryushin V.I., *Ekologicheskiye osnovy zemledeliya* (Ecological foundations of agriculture), Moscow: Kolos, 1996, 366 p.

10. Lozbenyov N.I., Kozlov D.N., Fil P.P., Khitrov N.B., Shilov P.M., Otsenka vliyaniya vida ugod'ya i pochvoobrazuyushchikh porod na sodержanie i zapasy organicheskogo ugleroda v meliorirovannykh dervno-podzolistykh pochvakh, Tverskaya oblast' (Assessment of the influence of land type and parent material on the content and reserves of organic carbon in ameliorated sod-podzolic soils in the Tver region), *Pochovedeniye*, 2024, No. 12, pp. 1705–1735.

11. Mirzoev E.S., Mirzoev A.E., *Konakovskiy rayon: kraevedcheskiy spravochnik. Tver'* (Konakovsky District: local history reference book), Tver, 1995, 331 p.

12. Rode A.A., *Pochvnaya vlaga* (Soil moisture), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1952, 445 p.

13. Shein E.V., Karpachevskiy L.O. (Eds), *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: Grif i K, 2007, 616 p.

14. Shvarov A.P., Smagin A.V., Dembovetskiy A.V., Umarova A.B., Pozdnyakov A.I., Faustova E.V., *Polevye metody opredeleniya fizicheskikh svoystv i rezhimov torfyanykh i mineral'nykh pochv*, E.V. Shein (Ed.) (Field methods for determining the physical properties and regimes of peat and mineral soils), Moscow: Grif i K, 2012, 140 p.

15. Shein E.V., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Usenko D.Yu., Kharkhardinov N.A., Vernyuk Yu.I., Using the SWAT model to characterise the water regime of soils in agrolandscapes, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 117, pp. 5–22, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>.

16. Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 5–21, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>.

17. Shestakov V.M., Pozdnyakov S.P., *Geogidrologiya* (Geohydrology), Moscow: IKTs “Akademkniga”, 2003. 176 p.

18. Belik A.A., Bolotov A.G., Shein E.V., Application of neural network pedotransfer functions to calculate soil water retention curve, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 368, 012008, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012008>.

19. Belik A.A., Kokoreva A.A., Bolotov A.G., Characterizing macropore structure of agrosoddy-podzolic soil using computed tomography, *Open Agriculture*, 2020, Vol. 5, No. 1, pp. 888–897.
20. Bouma J., Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research, *Geoderma*, 2006, Vol. 131, pp. 275–280.
21. Bouma J., Dekker L.W., Haans J.C.F.M., Measurement of depth to water table in a heavy clay soil, *Soil Science*, 1980, Vol. 130, pp. 264–270.
22. Dutta S., Sen D., Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield, *Sustainable Water Resources Management*, 2018, Vol. 4, No. 3.
23. *Glossary of Soil Science Terms*. Soil Science Society of America, Madison, 1926, 154 p.
24. Shein Y.V., Bolotov A.G., Dembovetskii A.V., Soil hydrology of agricultural landscapes: quantitative description, research methods, and availability of soil water, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 9, pp. 1367–1374.
25. Simsek U., Shein E.V., Mikailsoy F., Bolotov A.G., Erdel E., Subsoil compaction: the intensity of manifestation in silty clayey Calcic Pantofluvic Fluvisols of the Iğdır region (Eastern Turkey), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 296–299, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319030104>.
26. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C.-H.M., Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, Vol. 35, No. 3, pp. 737–757.