

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-5-22



Ссылки для цитирования:

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 имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 5-22. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-5-22

Cite this article as:

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, V. 117, pp. 5-22, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-5-22

Благодарность:

Исследования проведены по теме госзадания FGUR-2022-0015 “Инструментарий структурно-функционального анализа ландшафтов и регулирования функций почв для целей территориального планирования” – 50% и по теме госзадания: “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” – 50% ЦИТИС: 121040800146-3.

Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment No. FGUR-2022-0015 “Tools for structural and functional analysis of landscapes and regulation of soil functions for the purposes of territorial planning” – 50% and State assignment: “Physical bases of ecological functions of soils: monitoring, forecasting and management technologies” – 50% CITIS: 121040800146-3.

Использование модели SWAT для характеристики водного режима почв агроландшафта¹

¹ Опубликовано по материалам ЧЕТВЕРТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ ОТКРЫТОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “ПОЧВЕННЫЕ И ЗЕМЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ: СОСТОЯНИЕ, ОЦЕНКА, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ” (к 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева).

© 2023 г. Е. В. Шеин^{1,2,3*}, А. Г. Болотов^{1**},
А. В. Дембовецкий^{2***}, Д. Ю. Усенко²,
Н. А. Хархардинов^{4****}, Ю. И. Вернюк¹

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,

**<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,

***<https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>.

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

⁴Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал Почвенного института им. В.В. Докучаева, 170530,

Россия, Тверская обл., п. Эммаусс, 27,
****<https://orcid.org/0000-0002-4084-4991>.

Поступила в редакцию 03.04.2023, принята к публикации 10.10.2023

Резюме: Классификация водных режимов почв имеет базовую научную основу в виде взаимообусловленной связи движения воды и формирования почвенного профиля, т. е. является почвенно-генетической. Именно такого рода классификация представляет научно-методическую платформу для изучения как водных режимов почв в ландшафте, так и распределения почв в почвенном покрове ландшафта. Численные методы представления гидрологических режимов почв в агроландшафте основываются на физически обоснованных математических моделях движения влаги в почве и пространственной ГИС-информации, совместно позволяющими рассчитывать, анализировать и предсказывать водный режим почвы, сток в масштабе водосбора, перенос вещества в профиле почвы, процессы выщелачивания, и что важно с практической точки зрения – содержание доступных почвенных влагозапасов в структуре агроландшафта. Представлена пространственно-динамическая модель SWAT (Soil-Water-Atmosphere-Tool) для описания водных режимов почв в агроландшафте конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область), как пример ландшафтных численных гидрологических моделей. Приведены примеры соответствия модельных и экспериментальных данных динамики влажности почвы в нескольких точках агроландшафта для 3-х глубин, отражающих поверхностные, глубинные (на уровне грунтовых

вод) и срединные слои профиля почв: 10–20, 50–60 и 90–100 см, полученные расчетным методом с помощью рассмотренной ландшафтно-динамической модели и классическим методом бурения с термостатно-весовым определением влажности почвы. Показано, что адаптированная для конкретных условий ландшафтная модель с использованием цифровой модели рельефа с разрешением 1×1 м на пиксель для расчета водного режима почв в различных точках агроландшафта удовлетворительно описывает пространственно-динамические профильные данные по влажности почвы.

Ключевые слова: водный режим почвы, движение влаги в почве, пространственное гидрологическое моделирование, адаптивно-ландшафтное земледелие, SWAT.

Using the SWAT model to characterise the water regime of soils in agrolandscapes¹

© 2023 E. V. Shein^{1,2,3*}, A. G. Bolotov^{1**}, A. V. Dembovetskiy^{2***},
D. Yu. Usenko², N. A. Kharkhardinov^{4****}, Yu. I. Vernyuk¹

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,
**<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>.

²Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
***<https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>.

³Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center,
3 Tsentralnaya Str., Novy village 601261, Russian Federation.

⁴All-Russian Research Institute of reclaimed Lands –
branch of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
27, Emmaus 170530, Tver Region, Russian Federation,
****<https://orcid.org/0000-0002-4084-4991>.

Received 03.04.2023, Accepted 10.10.2023

Abstract: The classification of soils water regimes a basic scientific basis in the form of an interdependent relationship between the movement of water

¹ Proceedings of the IV RUSSIAN OPEN CONFERENCE “SOIL AND LAND RESOURCES: SOILS STATUS, ASSESSMENT, UTILISATION” (dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute).

and the formation of a soil profile, i. e. it is soil-genetic classification. 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 physically validated mathematical models of the soil water movement and spatial GIS information, which together allow to calculate, analyze and predict soil water regime, runoff in the scale of watersheds, substance transport in the soil profile, leaching processes, as well as the content of available soil moisture reserves in the agrolandscape structure – which is important for practice. 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. Some examples are given in the article, which demonstrate that modeled data correspond well with experimental data on soil moisture dynamics in several points of agrolandscape for 3 depth levels, reflecting surface, deep (at groundwater level) and middle layers of soil profile, i. e. 10–20, 50–60 and 90–100 cm. On the one hand, the data were obtained by calculations with the help of the considered landscape-dynamic model; and on the other hand, – by classical soil drilling, sampling and gravimetric method for soil moisture content determination. It has been shown that the landscape model, adapted for specific conditions, using a digital elevation model with a resolution of 1×1 m per pixel, to calculate the soil water regime at different points of the agrolandscape satisfactorily describes the spatial-dynamic profile data on soil moisture.

Keywords: water regime of soil, movement of moisture in the soil, spatial hydrological modeling, adaptive landscape agriculture, SWAT.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрология почв в ландшафте берет свое начало из работ Особой экспедиции, возглавляемой В.В. Докучаевым, в которой он основал один из главных законов управления водными ресурсами в почвенном покрове засушливых районов: “Сохранение воды на водоразделах и недопущение ее стока в низины и поймы рек”. Это был первый шаг к управлению гидрологическим режимом почв в ландшафте. Этим законом (в краткой его форме) руководствовались агрономы и гидрологи, чтобы в степных засушливых районах сохранять воду на водоразделах, создавая водоемы.

Действительно, в этот период (конец XIX в.), Россия многократно и многие годы подряд страдала от почвенных засух, которые приводили к неурожаю и голоду. И в 1837 г., и в последующие 1848, 1876–77 гг., 1885–86 гг. были катастрофические засухи, соответственно, – неурожаи, голод... Кто же должен был исправлять ситуацию, победить засухи? Почвоведы, засуха-то была почвенная, из-за недостатка почвенной влаги. Поэтому в 1892 г. была организована “Особая экспедиция по испытанию и учету различных способов и приемов лесного и водного хозяйства в степях России” (так называемая “Докучаевская экспедиция”), проработавшая до 1898 г. В.В. Докучаев организует Особую экспедицию, итог работы которой – разработка водосохранных мер в верховьях крупных и несудоходных рек. В основном в настоящее время осталось мнение, что он вместе с коллегами по Особой экспедиции одним из первых ввел лесополосы. Но не только это. Он впервые доказал, что для успешного управления гидрологическим режимом почвенного покрова ландшафта необходимо сохранять воду на водоразделах, не допуская ее потерь в стекающие реки, ручьи, овраги. Так был обоснован закон ландшафтной гидрологии В.В. Докучаева. Это был первый закон управления водными ресурсами в степном агроландшафте. Правильная организация сельскохозяйственной деятельности в этом случае должна опираться на глубокое знание естественно-исторических условий, сложившихся в ландшафте, на пространственное распределение почв в почвенном покрове, и использовать эти условия для водопользования и борьбы с почвенной засухой. Вместе с ним в работах участвовали Н.М. Сибирцев, П.А. Земятченский, Г.Н. Высоцкий, Г.И. Танфильев, К.Д. Глинка, П.В. Отоцкий, а с 1986 г. и Александр Алексеевич Измайльский – видный гидролог-почвовед. Все вместе они решали проблему сохранения влаги и управления влагой в степных агроландшафтах. Позднее был зачислен на должность научного сотрудника 1-го разряда в Почвенный институт и Алексей Андреевич Роде, где защитил докторскую и основал в 1950-х гг. лабораторию гидрологии почв. Алексей Андреевич и в начале своей карьеры почвоведом живо интересовался гидрологией, понимая, что движение воды в почве является одним из основных факторов формирования и развития почв. Работая в Почвенном

институте, Алексей Андреевич предложил генетическую классификацию водных режимов почв, в которой четко обосновал взаимосвязь водного режима почв и их генетической принадлежности. Следует подчеркнуть именно прочную, неразрывную взаимосвязь формирования почв и почвенного покрова с гидрологией ландшафта. Лишь взглянув на эту классификацию, становится совершенно ясно, что предложенные Роде и Высоцким водные режимы уже представляются реальными воплощениями почвенных профилей, развитыми в определенных климатических условиях ([Роде, 1960, 1969](#); [Природообустройство полесья, 2019](#) и др.). Классификация А.А. Роде, законы передвижения влаги в почвах позволили научно обоснованно найти соответствие между генезисом почвы и ее водным режимом. И, напротив, по водному режиму научно обоснованно судить о развитии профиля почвы, ее эволюции. Эти положения развиты в дискуссиях и спорах с известными учеными, его соратниками, – с Качинским, американцем Ричардсом и др. Именно в Почвенном институте была выстроена гидрологическая система почвенных констант – водовместимость, наименьшая влагоемкость, влажность разрыва капиллярной связи, влажность устойчивого завядания, максимальная гироскопическая и др.

Работая с 1931 г. в Почвенном институте, А.А. Роде удалось создать единую взаимосвязанную классификацию водных режимов и характерных почвенных процессов. Если сравнить отечественную классификацию водных режимов с американской (которая в большинстве случаев сейчас используется), видно, что классификация Роде и Высоцкого – это классификация почвоведческая. В основе ее лежат почвенные процессы передвижения влаги, формирование почвенного профиля и особенности его функционирования; а американская – фермерская, учитывает прогрев, периоды недостатка влаги, т. е. направленная на сельхозпроизводство. Итак, благодаря А.А. Роде, его работам в Почвенном институте, были заложены основы генетической классификации водных режимов, выявляющие явную связь между гидрологией и формированием почв. Так А.А. Роде создал новое направление в почвоведении – гидрологию почв, в которой четко прослеживается основная идея подхода – взаимосвязь водного режима с распределением почв в пространстве.

Это направление, основанное в Почвенном институте, далее было успешно развито профессором Ф.Р. Зайдельманом, который был сторонником учения Роде о почвенной влаге. Ф.Р. Зайдельман один из первых использовал ландшафтный почвенно-гидрологический подход, изучая водный режим по катенам разной степени гидроморфизма. Его рассмотрение почвенно-гидрологических условий всегда было связано с ландшафтом, он использовал метод ландшафтных катен для рассмотрения особенностей почв и их водного режима. Это был чрезвычайно успешный период развития гидрологии почв, когда изменения почв рассматривались во взаимосвязи с изменениями водного режима, и, наоборот, изменения водного режима – с изменением свойств почв. В этот период Ф.Р. Зайдельман одним из первых применил этот подход к анализу особенностей гидрологии почв почвенной ландшафтной катены. Это было не только новым словом в почвоведении, но и в мелиорации почв, – появился метод оценки необходимости той или иной мелиорации, типа и способа мелиорации. Ф.Р. Зайдельман дополнял и развивал идеи А.А. Роде, привлекая ландшафтный подход к исследованиям водного режима почвенного покрова, используя метод почвенных катен ([Зайдельман, 1985, 2009](#)).

Но время шло ... В конце XX – начале XXI вв. для почвенной гидрологии потребовалось количественное выражение водного режима в агроландшафте в связи с развитием адаптивно-ландшафтного направления, проектирования агропроизводственного потенциала земель и гидрологии почвенного покрова. Это привело к использованию методов математического моделирования на ГИС-платформах для описания водного режима агроландшафта. Данные методы, несмотря на их новизну, широкое использование математического моделирования и ГИС подходов, в своей основе имеют все те же положения учения А.А. Роде о почвенной влаге и почвенно-гидрологических константах.

К настоящему моменту возникла необходимость проектирования сельскохозяйственных ландшафтов. Проектирование опирается на ГИС-системы, которые представляли собой электронные карты местности, рельефа, метеоусловий и пр. ([Кирюшин, 1996, 2022](#)). Однако числовые модели поверхности почвенного покрова необходимы не только для новых проектных направлений в агро-

номии, но и для расчета 3D потоков влаги в агроландшафте. Следует отметить, что при всей прогрессивности и точности ГИС-технологий они не в состоянии самостоятельно отразить внутрипочвенное передвижение влаги. Этот перенос определяется гидрофизическими свойствами почвенного профиля, прежде всего водоудерживанием, водовместимостью, влагопроводностью и пр. К настоящему времени разработаны имитационные физически обоснованные математические модели движения влаги в почве, которые и совместили с ГИС-системами. Этот факт привел к образованию и использованию 3D-моделей движения влаги в агроландшафте и возможности управления гидрологическими процессами в агроландшафте. Именно поэтому такие модели (ГИС + внутрипочвенный перенос) получили распространение.

Одной из таких моделей стала физически обоснованная модель SWAT (Soil-Water-Atmosphere-Tool) ([Neitsch et al., 2011](#)). Эта модель объединяет в себе данные о почвенном покрове территории, ее рельефе, климате и землепользовании. В ней послойно вводятся (как минимум для двух слоев – почва /soil/ и подпочва /subsoil/) основные гидрофизические свойства и функции почв: 1) гранулометрический состав почв в почвенном покрове агроландшафта; 2) плотность почвы; 3) содержание питательных элементов: N, P, K; и 4) содержание органического вещества. Все указанные свойства необходимы для автоматического выбора педотрансферных функций, которые пересчитывают из этих базовых свойств почв гидрофизические функции (функцию водоудерживания, влагопроводности, фильтрацию и пр.) ([Frederiksen et al., 2021](#); [Dutta, Sen, 2018](#); [Zare et al., 2022](#)).

Цель данного исследования – проведение верификации и адаптации модели SWAT на примере опытного поля Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель (ВНИИМЗ – филиал ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”) близ города Эммаусса в Тверской области.

В данной статье приводятся некоторые результаты моделирования режима влажности отдельных точек почвенного покрова за период, совпадающий с вегетационным периодом многих культур (с 30 апреля по 24 сентября). В данном случае для характеристики модели и ее использования при ландшафтном проектирова-

нии мы приводим лишь отдельные точки рельефа, на которых проводились регулярные измерения влажности буровым методом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для проведения опытного моделирования и выполнения этой работы выбрана территория опытного поля ВНИИМЗ в г. Эммауссе. Эта территория расположена в 4 км юго-восточнее г. Тверь в Калининском районе Тверской области. Территория исследуемого участка ограничена Федеральной трассой “Россия” (М10) на севере и располагается между деревнями Прибыtkово и Губино. На юге территория ограничена руслом реки Белеутовки (приток Волги).

Опытный участок расположен на осушаемых землях. Глубина закладки гончарного дренажа в среднем составляет 1 м. Междреннее расстояние составляет 20 м – в транзитно-аккумулятивных микроландшафтах, 30 м – в транзитных вариантах и 40 м – в элювиальных вариантах ([Иванов и др., 2021](#)).

Основная методическая работа заключалась в настройке и верификации модели на основании экспериментальных данных по влажности почвы (бурение и термостатно-весовой метод), ранее полученного материала и отчетов ВНИИМЗ. Работа с моделью SWAT подразумевает тщательную подготовку данных. Препроцессор модели состоит из нескольких смысловых блоков, каждый из которых требует своего набора данных.

1. Блок рельефа местности требует загрузки цифровой модели рельефа.

2. Блок данных о почвенном покрове требует загрузки почвенной карты, а также сводных таблиц почвенных свойств.

3. Блок данных о типе землепользования требует загрузки данных о типах землепользования, а также сводных таблиц типов землепользования.

4. Блок климатических данных требует загрузки климатических данных и настройки генератора погоды при необходимости.

Модель SWAT не ограничивает формат используемых данных о рельефе местности. Чаще всего используются находящиеся в свободном доступе цифровые модели рельефа SRTM (CGIAR-

CSI, 2018) или ASTER ([Abrams et al., 2020](#)), но можно использовать и сторонние цифровые модели рельефа местности, например, оцифрованные топографические карты или данные аэрофотосъемки.

В рамках данного исследования было принято решение использовать данные съемки с беспилотного летательного аппарата, которую в 2021 г. проводили сотрудники отдела генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв. В результате преобразований получена цифровая модель рельефа с разрешением 1×1 м на пиксель.

Почвенный покров территории представлен дерново-подзолистыми глееватыми и глубокооглееными почвами на двучленах. Степень оглеенности почв варьирует по ландшафту ([Иванов и др., 2021](#)). Почвенный покров территории разделяется на десять элементарных почвенных структур, что затем используется в почвенном блоке.

В модель передаются данные о гранулометрическом составе, коэффициенте фильтрации, диапазоне доступной влаги, плотности, содержании углерода, альбедо, коэффициенте USLE каждого почвенного слоя. Коэффициент фильтрации и диапазон доступной влаги рассчитаны с использованием модели RETC ([Radcliffe, Šimůnek, 2010](#); [Šimůnek et al., 2008](#)). Коэффициент USLE определяется в соответствии с методикой ([Arnold et al., 2012](#)). Содержание углерода и альбедо взяты по умолчанию. Помимо почвенной карты, создается сводная таблица всех почвенных свойств на территории.

Гранулометрический состав опытного поля был уже подробно исследован и описан в 2021 г. ([Шеин и др., 2022](#)). Тогда были отобраны образцы по трансекте в восьми точках послойно по профилю до 100 см и шагом 10 см по глубине. По международной классификации выбранные точки в основном попадают в класс опесчаненного суглинка. В профиле дерново-подзолистых глееватых почв исследованного опытного поля ВНИИМЗ отчетливо выделяются фракции глины (<2 мкм), пыли (2–50 мкм) и физического песка (>50 мкм) по дифференциальным кривым распределения частиц ([Шеин и др., 2022](#)). В основном происходит изменение содержания пыли и, соответственно, песка с глубиной, при

незначительных колебаниях содержания глинистой фракции, поэтому на графике (рис. 1) достаточно привести только содержание фракции пыли (2–50 мкм). Как видно из рисунка, в слое 40–50 см для точек 4 и 7 происходит заметное уменьшение пылеватых частиц и, соответственно, увеличение фракции песка, что может отражаться на резкой смене гидрофизических свойств почвы и в целом на гидрологии профиля.

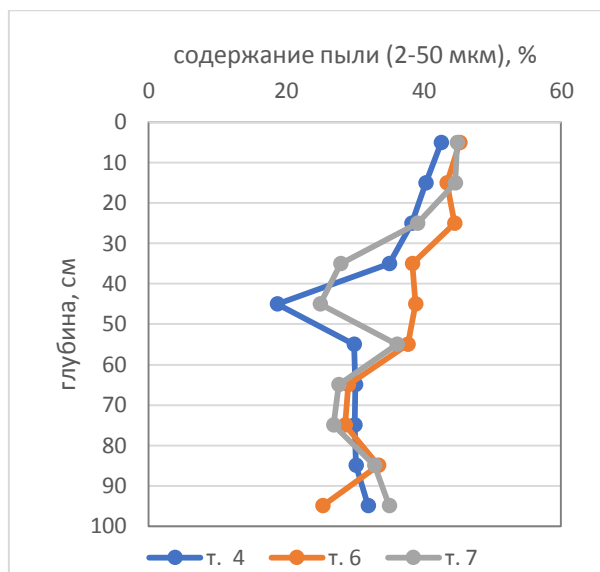


Рис. 1. Изменение пылевой фракции по профилю дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на опытном поле ВНИИМЗ (т. 1 – водораздельный участок, т. 6 и т. 7 – северный пологий склон агроландшафта).

Fig. 1. The change of silt fraction according to the profile of sod-podzolic sandy-loamy soil of the VNIIMZ experimental field (point 1 – watershed, points 6 and 7 – the northern gentle slope of the agrolandscape).

Метеоданные для модели были получены с разных метеостанций (Тверь, Росгидромет) и использовались в климатическом блоке модели SWAT. Уровень грунтовых вод определялся экспериментально в течение исследуемого периода в основных элемен-

тах рельефа (рис. 2). По данным за 2021 г., в начале вегетации растений (апрель–май) средний уровень грунтовых вод (УГВ) по агроландшафту находился на глубине 80–110 см от поверхности почвы, однако существенно различался в точках наблюдения. В конце мая–июне УГВ уже составлял 102 см на северном склоне (т. 6 и т. 7) и 127 см в точке 4 (вершина водораздела). В конце засушливого сезона 2021 г. УГВ стабилизировался, составляя в среднем по ландшафту 195–205 см от поверхности почвы.

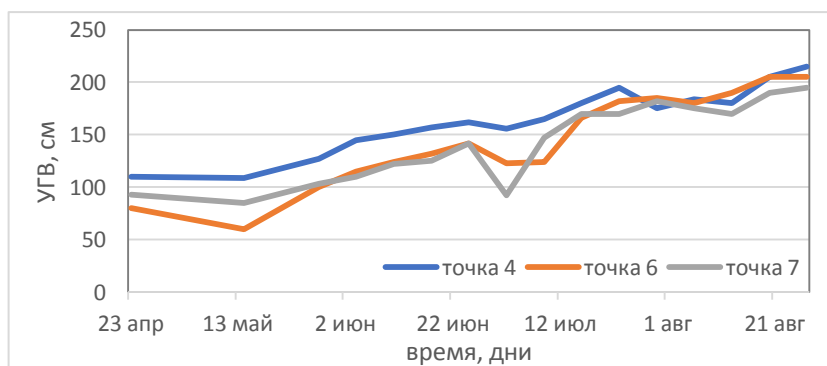


Рис. 2. Изменение уровня грунтовых вод на опытном поле ВНИИМЗ в период с 23 апреля по 27 августа 2021 г.

Fig. 2. Changes in the groundwater level of the VNIIMZ experimental field in the period from April, 23 to August, 27, 2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительной особенностью модели SWAT является возможность учитывать поверхностный сток и разделение территории на отдельные водосборные бассейны с учетом рельефа и преимущественных потоков, что актуально в решении задач структурно-функционального анализа ландшафтов и регулирования функций почв для целей территориального планирования. На рисунке 3 представлены выделенные потоки, площадь водосбора у каждого из них не менее 100 кв. м. Для территории опытного поля модель построила 1 062 канала с выделением наиболее крупных потоков (синим цветом).



Рис. 3. Карта потоков, рассчитанных по модели SWAT на территории опытного поля, с выделением наиболее крупных потоков (синие линии) и экспериментальных точек опробования.

Fig. 3. A map of flows calculated using the SWAT model on the territory of the experimental field with the allocation of the largest flows (dark blue lines) and experimental sampling points.

На рисунке 4 в качестве примера соответствия модельных и экспериментальных данных приводим динамики влажности в т. 4 для трех глубин, отражающих поверхностные, глубинные (на уровне грунтовых вод) и срединные слои профиля почв: 10–20, 50–60 и 90–100 см, полученные расчетным методом с помощью ландшафтно-динамической модели SWAT и классическим методом бурения с термостатно-весовым определением влажности.

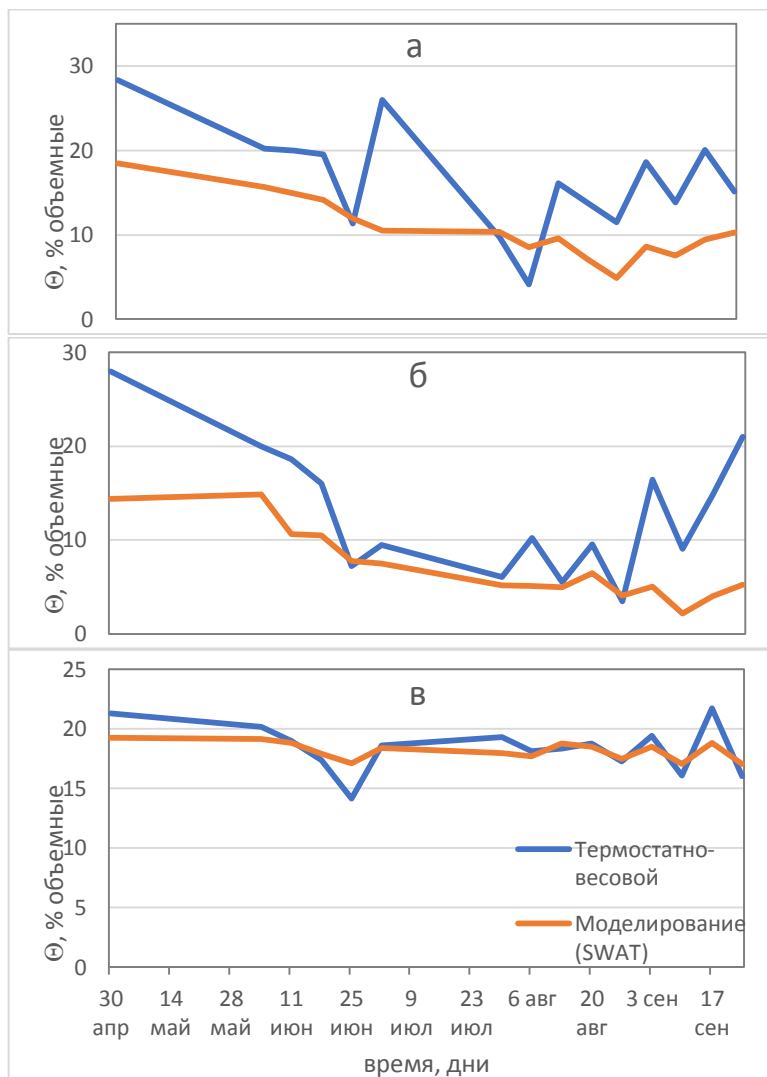


Рис. 4. Динамика влажности почвы экспериментальных и расчетных данных для точки 4: **а)** 10–20 см, **б)** 50–60 см, **в)** 90–100 см.

Fig. 4. Moisture dynamics of experimental and calculated data in point 4: **а)** 10–20 cm, **б)** 50–60 cm, **в)** 90–100 cm.

Из рисунка 4 видно, что модель адекватно описывает экспериментальные данные, на что указывает хорошая сходимость графиков, сохранение экстремумов, высокий коэффициент корреляции и низкие значения ошибок. Коэффициент корреляции с глубиной возрастает от 0.67 до 0.95, а средняя квадратичная ошибка уменьшаются от 11 до 0.93. Однако модель в целом занижает значения влажности почвы, по сравнению с экспериментальными данными, особенно в верхних горизонтах, а отдельные экстремумы сглаживает.

Уже на данный момент можно отметить, что ландшафтная модель SWAT с использованием качественной ГИС-информации для расчета водного режима почв в различных точках агроландшафта по условиям соответствия Сайерта ([Шеин, Рыжова, 2016](#)) удовлетворительно описывает пространственно-динамические данные по влажности.

ВЫВОДЫ

1. Современная гидрология почв включает ландшафтную оценку гидрологических явлений, происходящих в ландшафте, с учетом условий на верхней и нижней границах почвы и гидрофизических свойств почв. Учитывая невозможность динамического изучения влажности почв в ландшафте в целом, используется агроландшафтный подход, позволяющий системно выделить элементарные ареалы агроландшафта – микроландшафты.

2. Каждый элементарный ареал агроландшафта характеризуется почвенно-физическими свойствами, среди которых важнейшие генетические особенности строения профиля, послойный гранулометрический состав, плотность и содержание органического вещества. Создается ГИС-карта ландшафта с учетом физических характеристик почвенного покрова.

3. Гидрологические особенности движения влаги в исследуемом агроландшафте рассчитываются с помощью специализированных гидрологических ландшафтных моделей, рассчитывающих горизонтальный и вертикальный перенос влаги по поверхности, внутрипочвенный и подпочвенный перенос влаги на основании основных законов передвижения влаги в дисперсных природных системах (уравнения Дарси, Ричардса), в которых гидрофизиче-

ские функции почв представлены в виде педотрансферных функций от указанных базовых свойств почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайдельман Ф.Р.* Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 314 с.
2. *Зайдельман Ф.Р.* Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М.: КДУ, 2009. 720 с.
3. *Иванов Д.А. и др.* Разработать теоретические основы ландшафтно-мелиоративного природообустройства агрогеосистем гумидной зоны на основе результатов мониторинга состояния их природной среды и дистанционного зондирования Земли. Тема 0651-2019-0005 (руководитель темы: Иванов Д.А.). Отчет о научно-исследовательской работе ФГБНУ ВНИИМЗ, 2021.
4. *Кирюшин В.И.* Экологические основы земледелия. М.: Колос, 1996. 366 с.
5. *Кирюшин В.И., Лукин С.В., Дубачинская Н.Н., Минаев Н.В.* Почвенно-экологические проблемы адаптивно-ландшафтного земледелия. “Почвы – стратегический ресурс России” // VIII съезд Общества почвоведов. Ч. 1. Сыктывкар, 2022. С. 41–47.
6. Природообустройство Полесья. Полесья севера и северо-востока Европейской части России. Т. 2. / под общ. ред. *Ю.А. Мажайского, А.Н. Рокочинского, Ф.Р. Зайдельмана* и др. Рязань: Мещерский ф-л ФГБНУ “ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова”, 2019. 340 с.
7. *Роде А.А.* Методы изучения водного режима почв. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
8. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге. Т.2. Л.: Гидрометеиздат, 1969.
9. *Шейн Е.В., Рыжова И.М.* Математическое моделирование в почвоведении. М.: “ИП Маракушев И.П.”, 2016. 318 с.
10. *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 имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 110. С. 5–21. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-5-21](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21).
11. *Abrams M., Crippen R., Fujisada H.* ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD) // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No. 7. P.1156–1168.

12. Arnold J.G. et al. Chapter 22 SWAT Input Data: SOL // SWAT Input/Output File Documentation, Version 2012. 2012.
13. Dutta S., Sen D. Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield // Sustainable Water Resources Management. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 447–468.
14. Frederiksen R., Molina-Navarro E. The importance of subsurface drainage on model performance and water balance in an agricultural catchment using SWAT and SWAT-MODFLOW // Agricultural Water Management. 2021. Vol. 255. P. 107058. DOI: [10.1016/j.agwat.2021.107058](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107058).
15. Neitsch S.L. et al. SWAT Theoretical Documentation Version 2009 // Texas Water Resources Institute. 2011. 618 p.
16. Radcliffe D.E., Šimůnek J. Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications, 2010. P. 1338–1339.
17. Šimůnek J., Genuchten M. Th., Šejna M. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes // Vadose Zone Journal. 2008. Vol. 7. No. 2. P. 587–600.
18. Zare M., Azam S., Sauchyn D. Evaluation of Soil Water Content Using SWAT for Southern Saskatchewan, Canada // Water (Switzerland). 2022. Vol. 14. No. 2. P. 249–261.

REFERENCES

1. Zaidel'man F.R., *Gidrologicheskii rezhim pochv Nechernozemnoi zony* (Hydrological regime of soils), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 314 p.
2. Zaidel'man F.R., *Genezis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov* (Genesis and ecological bases of soil and landscape reclamation), Moscow: KDU, 2009, 720 p.
3. Ivanov D.A. et al., *Razrabotat' teoreticheskie osnovy landshaftno-meliorativnogo prirodoobustroistva agrogeosistem gumidnoi zony na osnove rezul'tatov monitoringa sostoyaniya ikh prirodnoi sredy i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (To develop theoretical bases of landscape and ameliorative nature management of agro-geosystems of the humid zone on the basis of the results of monitoring of the state of their natural environment and remote sensing of the Earth), Project 0651-2019-0005, Report on research work FGBNU VNIIMZ, 2021.
4. Kiryushin V.I., *Ekologicheskie osnovy zemledeliya* (Ecological bases of farming), Moscow: Kolos, 1996, 366 p.
5. Kiryushin V.I., Lukin S.V., Dubachinskaya N.N., Minaev N.V., *Pochvenno-ekologicheskie problemy adaptivno-landshaftnogo zemledeliya*, In: "Pochvy – strategicheskii resurs Rossii" ("Soils – a strategic resource of

- Russia”), Proc. VIII Congress of the Society of Soil Scientist, Syktyvkar, 2022, Ch. 1, pp. 41–47.
6. Mazhaiskiy Yu.A., Rokochinskiy A.N., Zaidel'man F.R. et al., *Prirodoobustroistvo Poles'ya* (Nature management of the Polesie), In: Poles'ya severa i severo-vostoka Evropeiskoi chasti Rossii (Polesie of the North and North-East of the European part of Russia), Vol. 2, Ryazan': Meshcherskii f-l FGBNU “VNIIGiM imeni A.N. Kostyakova”, 2019, 340 p.
7. Rode A.A., *Metody izucheniya vodnogo rezhima pochv* (Methods of studying the water regime of soils), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1960.
8. Rode A.A., *Osnovy ucheniya o pochvennoi vlage* (Fundamentals of the doctrine of soil moisture), Vol. 2, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969.
9. Shein E.V., Ryzhova I.M., *Matematicheskoe modelirovanie v pochvovedenii* (Mathematical Modelling in Soil Science), Moscow: “IP Marakushev I.P.”, 2016, 318 p.
10. 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: [10.19047/0136-1694-2022-110-5-21](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21).
11. Abrams M., Crippen R., Fujisada H., ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD), *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 7, pp. 1156–1168.
12. Arnold J.G. et al., *Chapter 22 SWAT Input Data: SOL*. SWAT Input/Output File Documentation, Version 2012, 2012, pp. 89–124.
13. Dutta S., Sen D., Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield, *Sustainable Water Resources Management*, 2018, Vol. 4, No. 3, pp. 447–468.
14. Frederiksen R., Molina-Navarro E., The importance of subsurface drainage on model performance and water balance in an agricultural catchment using SWAT and SWAT-MODFLOW, *Agricultural Water Management*, 2021, Vol. 255, pp. 107058, DOI: [10.1016/j.agwat.2021.107058](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107058).
15. Neitsch S.L. et al., *SWAT Theoretical Documentation Version 2009*, Texas Water Resources Institute, 2011, 618 p.
16. Radcliffe D.E., Šimůnek J., *Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications*, 2010, pp. 1338–1339.
17. Šimůnek J., Genuchten M. Th., Šejna M., Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes, *Vadose Zone Journal*, 2008, Vol. 7, No. 2, pp. 587–600.
18. Zare M., Azam S., Sauchyn D., Evaluation of Soil Water Content Using SWAT for Southern Saskatchewan, Canada, *Water* (Switzerland), 2022, Vol. 14, No. 2, pp. 249–261.