

УДК 631.4

ГИДРОЛОГИЯ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ: КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОЧВЕННЫХ ЗАПАСОВ ВЛАГИ

© 2021 г. Е. В. Шеин^{a, b, c, *}, А. Г. Болотов^c, А. В. Дембовецкий^a^a МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 12, Москва, 119991 Россия^b Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия^c Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, ул. Центральная, 3, п. Новый, Суздальский р-н, Владимирская обл., 601261 Россия

*e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Поступила в редакцию 02.02.2021 г.

После доработки 16.02.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Гидрология почв имеет глубокие российские корни, связанные, прежде всего, с теорией и практикой использования гидрологических констант. Эти критериальные величины использовались в основном для оценки гидрологических почвенных условий в стационарных наблюдениях, а попытки обустроить гидрологические наблюдения в ландшафте упирались в огромную, часто неисполнимую трудоемкость работ, расчетов, ненадежный количественный прогноз. В настоящее время появились новые возможности экспериментальных исследований, цифрового анализа и прогноза гидрологических показателей почв в ландшафте. Разработан новый количественный подход использования цифровых технологий для наблюдения за запасами влаги и температурой в почвах агроландшафта, динамики и вероятностных расчетов обеспеченности этих величин. На основе почвенной карты предложено создать информационно-измерительную систему с изученными тепло- и гидрофизическими характеристиками почв, с помощью математических моделей рассчитать динамику влаги и температуры для заданных периодов времени и условий различной обеспеченности теплом и осадками, что позволяет количественно оценить обеспеченность запасов влаги в почвах агроландшафта. Эта система наблюдений, оценки и прогноза включает применение современных технологий определения влажности и температуры почвы, адаптацию прогностических физически обоснованных моделей расчета динамики запасов влаги в зависимости от обеспеченности осадков и условий на нижней границе почвенных профилей. Рассматривается проведение гидрологического анализа почв на примере агроландшафта Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева в с. Ельдигоно Пушкинского района Московской области РФ.

Ключевые слова: водный режим почв, тепловой режим почв, прогноз, прогнозирование, гидрофизика, физически обоснованные модели, гидротермические характеристики, дерново-подзолистые почвы, Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)

DOI: 10.31857/S0032180X21090070

ВВЕДЕНИЕ

Российское научное почвоведение и гидрология почв родились практически одновременно благодаря трудам В.В. Докучаева по борьбе с катастрофическими засухами в России в конце XIX в. Докучаев предложил классический способ покорения засушливости путем задержания и сохранения влаги прежде всего на водораздельных территориях, создания прудов и разного рода водохранилищ в зоне водосборов. К счастью, в известной Докучаевской степной экспедиции в те времена вместе с ним работали Г.Н. Высоцкий, Г.Ф. Морозов, Г.И. Танфильев, П.В. Отоцкий и другие ученые, благодаря трудам которых было сформули-

ровано основное классическое положение гидрологии почв — необходимость изучать поведение почвенной влаги, физически представляя передвижение влаги, ее накопление и расходование в связи с элементами ландшафта, почвами, растительностью. Это положение остается фундаментальной основой почвенной гидрологии при изучении и обустройстве гидрологии современных агроландшафтов [4, 6]. Труды отечественных и зарубежных гидрологов были обоснованы гидрологические критерии, являющиеся основой для количественной оценки состояния почвенной влаги, ее движения и доступности для растений, так называемые почвенно-гидрологические кон-

станты в виде наименьшей или предельно полевой влагоемкости (НВ или ППВ), влажности разрыва капиллярной связи (ВРК), влажности устойчивого завядания растений (ВУЗ, ВЗ). Эти константы, методы их определения до настоящего времени используются гидрологами почв для оценки влагообеспеченности почв, движения и статике влаги в почвах, а также при мелиоративном природообустройстве агроландшафтов.

Следует отметить, что при гидрологических исследованиях в ландшафтах гидрологи столкнулись с целым рядом проблем, решение которых в настоящее время позволит почвенной гидрологии и теплофизике выйти на новый уровень изучения, анализа и прогнозирования тепловых и водных явлений в почвах агроландшафтов [2, 13]. Эти проблемы связаны с (1) разнообразием почв в агроландшафте, их гранулометрического состава и соответственно гидрологических и тепловых свойств, (2) изменчивостью уровня и состава почвенных и грунтовых вод, (3) наличием дренажных позиций в ландшафте, (4) необходимостью проведения наблюдений в стационарных точках достаточное длительное время, захватывающее периоды с засушливыми и влажными годами, а также (5) необходимостью проведения пространственных работ по слежению за влажностью в ландшафте, то есть изыскательских (буровых) работ по изучению пространственного распределения влаги в агроландшафтах в одних и тех же точках, что даже теоретически невозможно делать буровым методом. Зарубежная гидрология нашла временный теоретико-экспериментальный выход из создавшегося положения за счет введения понятия о почве как о гетерогенной полидисперсной природной среде, имеющей верхнюю и нижнюю гидрологические границы, между которыми в почве движение воды происходит закономерно в соответствии с законом Дарси и уравнением Ричардса [5, 7–9], что позволило развивать математические описательные модели. Этот подход в последнее время был дополнен статистическими характеристиками распределения влаги в почвенном покрове в новом направлении – гидропедологии [16, 19–21, 27]. В полной мере этот модельный подход, конечно же, не в состоянии количественно описывать гидрологическое состояние почв в агроландшафтах вследствие его детерминированности, необходимости обоснования и учета педотрансферных функций, которые далеко не всегда имеют физическое обоснование, а содержат лишь статистическое ядро, в той или иной мере позволяющее отражать гидрологические и фундаментальные физические свойства почвы. Это вызывает необходимость четко адаптировать модели для конкретных условий [3, 25, 30].

Возникают трудности сопряжения грунтовых и почвенных вод, в особенности в случае гидроморфных почв, а также пространственной вари-

абельности гидрофизических свойств почв и условий на границах. Эти причины привели к необходимости переустройства теоретических, экспериментальных и расчетных работ по почвенной гидрологии и теплофизике. Появилось понятие “unsaturated zone”, “critical zone”, связанные больше с экологическими проблемами движения загрязняющих веществ из ненасыщенной зоны в грунтовые воды. Но при этом все менее учитывался природно-исторический аспект и генетические особенности формирования и развития ландшафтов, привлекались упрощенные модели с линейными связями и делались другие допущения для возможности реальных и прогнозных расчетов [22, 24].

Практическое комплексное решение перечисленных выше пяти проблем позволит создать предпосылки для нового шага в гидрологических исследованиях почв: развития почвенно-агроландшафтной гидрологии (в данной работе не будем рассматривать теплофизическое направление, но принципы рассмотрения для гидрологии и теплофизики почв агроландшафтов идентичны). В настоящее время мы можем располагать всеми составляющими почвенно-агроландшафтных гидрологических исследований: научной теорией агроландшафтного районирования с использованием почвенно-ландшафтной и агрохимической карт, современными гидрологическими параметрами по оценке запасов влаги в различных слоях агропочв, цифровыми приборами для получения динамической информации о влажности и температуре почвы, динамическими физически обоснованными моделями движения влаги в агроландшафте, статистическими моделями для анализа и прогноза гидрологических характеристик в пространстве и во времени [16, 17, 28].

Цель статьи – разработка почвенно-гидрологического комплекса агроландшафтных исследований, в полной мере удовлетворяющих требованиям современной количественной гидрологии. Задачи работы отражают пять составляющих почвенно-ландшафтной гидрологии: 1) учет почвенно-растительного и литологического разнообразия, 2) учет разнообразия гидрологических условий, в том числе уровня грунтовых вод (УГВ), 3) учет дренажных позиций в ландшафте, 4) исследования длительных периодов времени, захватывающих годы (периоды) с недостаточной и высокой обеспеченностью осадков и 5) необходимость проведения пространственных работ по определению влажности в конкретных стационарных точках агроландшафта.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Поставленные задачи должны решаться поэтапно. В качестве простого и понятного примера рассмотрим все отмеченные этапы на конкретном

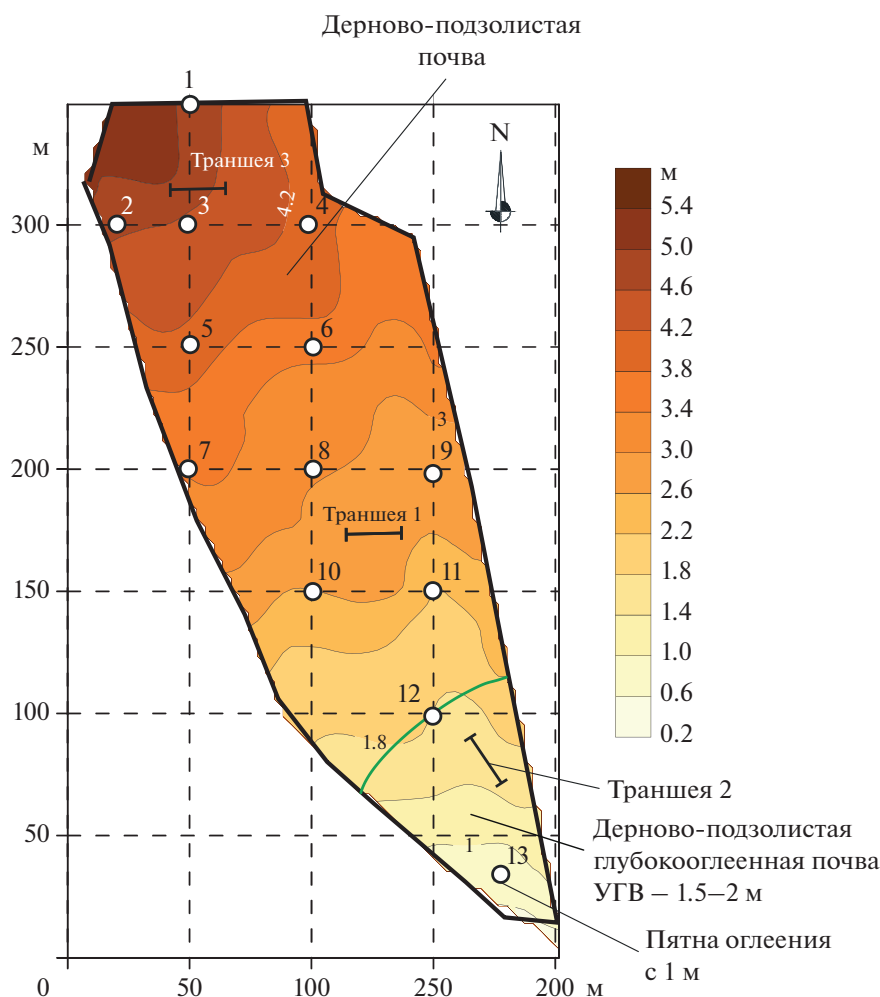


Рис. 1. Карта-схема положения точек расчетов (1–13) и траншей 1–3 на опытном поле Зеленоградского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева (с. Ельдигино) на фоне рельефа в виде горизонталей относительной высоты. Зеленая линия на схеме отделяет в средний по обеспеченности осадков год дерново-подзолистые почвы от дерново-подзолистых глубокооглеенных с уровнем грунтовых вод около 2 м.

ландшафте опытного поля Зеленоградского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева, расположенного в окрестностях с. Ельдигино Пушкинского района Московской области РФ. Схематическое изображение опытного поля показано на рис. 1. Карта рельефа была построена по данным нивелирной съемки, сделанной в 2012 г., и все приведенные в статье карты рельефа и топоизоплет обеспеченности запасов влаги выполнены в программе Surfer с использованием метода интерполяции данных – Kriging.

Почвенный покров опытного поля представлен тяжелосуглинистыми агродерново-подзолистыми почвами разной степени оглеения на покровных суглинках, подстилаемых на глубине 2–3 м некарбонатной мореной (по классификации WRB 2014 г. (версия 2015 г.) – Albic Glossic Retisols (Lomic, Aric, Cutanic)).

В 1968–1969 гг. на поле провели глубокую плантажную вспашку для уменьшения поверхностного застоя влаги. Следы глубокой вспашки сохранились до настоящего времени. Морфологические исследования показали, что в пределах поля встречаются почвы разной глубины оподзоливания (от 30 до 40–50 см), однако благодаря плантажной вспашке большая часть подзолистой толщи вовлечена в современные и бывшие пахотные горизонты. Опытное поле имеет уклон около 0.017° , в верхней части поля грунтовые воды расположены на глубине около 10 м, в нижней части поднимаются до 1.5 м и выше во влажные годы. Соответственно на большей территории участка распространены агродерново-подзолистые почвы, а в средней и нижней частях при повышении уровня грунтовых вод – агродерново-подзолистые глубокооглеенные [10, 11]. Ниже представлено краткое морфологическое описание профи-

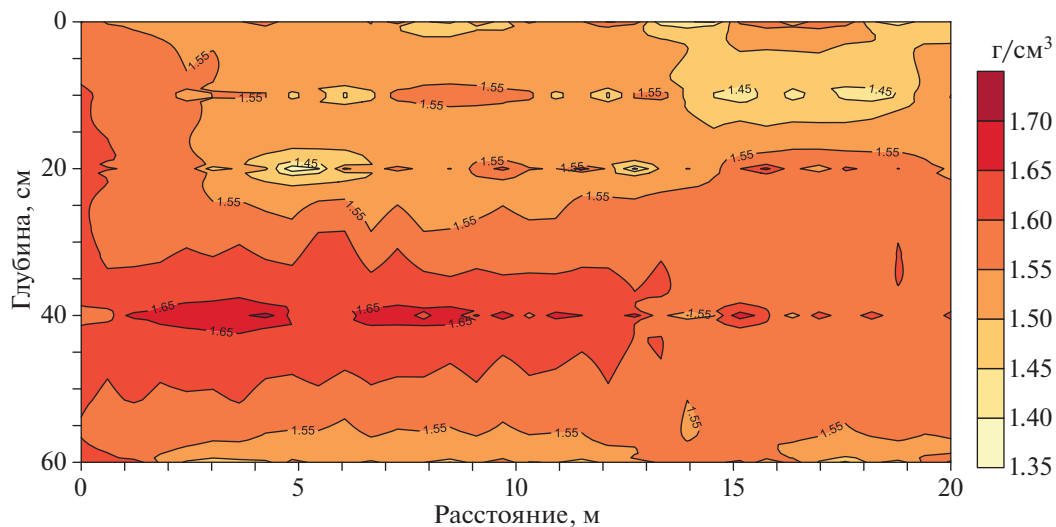


Рис. 2. Топоизоплеты плотности агродерново-подзолистой почвы в профиле 20-метровой траншеи 1.

для почвы опытного поля в его центральной части (траншея 1). Индексация горизонтов выполнена по классификации почв России 2004 г. [8]. Профиль представляет следующую последовательность горизонтов: P1 (0–10 см), P2 10–20(25) см, P3 20(25)–30(40) см, EL 30–35(40) см, BEL 30(40)–40(50) см, BT1 40(50)–60(65) см, BT2 60–90 см, BT3 90–130 см, горизонты BC, C 130–200 см.

Отметим, что почвенные физические свойства этих почв подробно изучались в трех траншеях: 1 в 2011–2012 гг., 2 в 2013–2014 гг. и 3 в 2013–2016 гг. Точки опробования свойств по траншее сделаны на глубинах 0, 10, 20, 40 и 60 см с шагом 25 см по горизонтали. В частности, на рис. 2 приведены данные опробования плотности почвы по траншейным исследованиям, которые показывают, что плотность почв имеет широкое варьирование на протяжении всех 20 м. При этом сама величина плотности почв для верхнего слоя (0–20 см) составляет около 1.4 г/см³, что весьма важно для последующих расчетов и классификации запасов влаги в этих почвах.

На указанном опытном участке проводились почвенно-гидрологические исследования, которые подтвердили существование определенных гидрологических выделов на данной площади в различные годы по обеспеченности осадков.

В стационарных режимных наблюдениях, в частности, при проведении почвенно-мелиоративных (“заливочных”) экспериментов использованы следующие методы. Послойное измерение давления влаги произведено цифровым тензиометром (Blumat Digital Proplus, Австрия) состоящим из керамической свечи, измерительного блока с дисплеем и батареей питания [14]. Прибор имеет одну кнопку управления, позволяющую включать его и производить выбор единиц изме-

рения. Выключается прибор автоматически. Данный тензиометр является полностью автономным прибором, который можно использовать в полевых условиях. Диапазон измерения давления 10–750 мбар, или приблизительно от 0.01 до 0.75 атм., или от 10 до 770 см водного столба, то есть можно считать, что тензиометр в данной конструкции дает показания в см водного столба. Длина рабочей части, погружаемой в почву равна 18 см. Для исследования распределения давления влаги по профилю почвы тензиометр был модифицирован в прибор с удлиненной рабочей частью, в которую вставлен вакуумный пластмассовый шланг. Измерение влажности почвы было проведено датчиками Decagon Teros12, позволяющими измерять значения диэлектрической проницаемости, которые по калибровочной зависимости, приведенной в [29] переводятся в значения влажности, выводимые на экран регистратора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе почвенно-гидрологических агроландшафтных исследований в соответствии с системой оценки и типологии земель и схемам их ландшафтно-экологической классификации, изложенными в методическом руководстве [8], необходимо использование почвенной карты с точными выделами категорий земель на исследуемом агроландшафте [1].

На рис. 1 приведена схема точек наблюдения (13 точек) для почвенно-гидрологических исследований, позволяющая достаточно подробно производить почвенно-гидрологические выделы в указанном ландшафте в разные по влагообеспеченности годы. Дренажная позиция в ландшафте находилась за пределами участка в 50 м от точки 13,

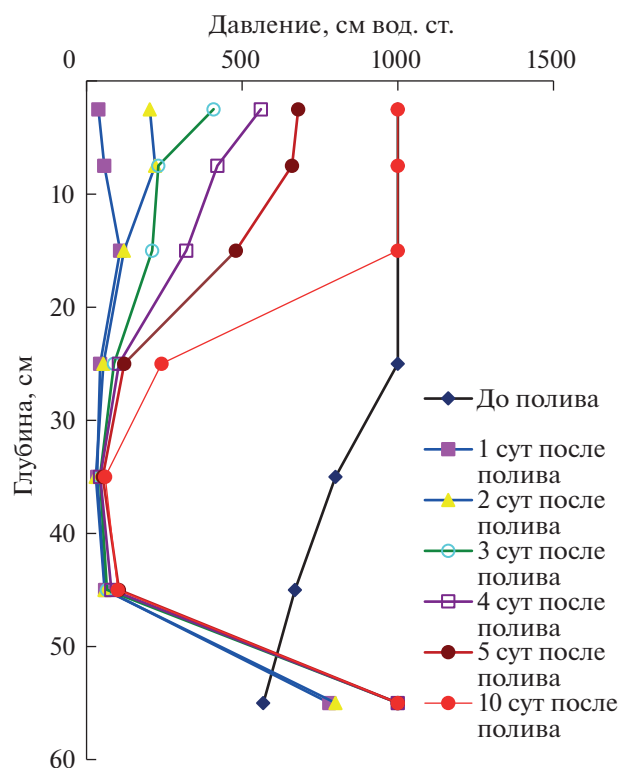


Рис. 3. Профильное распределение давления влаги (по тензиометрам) в пахотной агродерново-подзолистой почве (полевой эксперимент по заливке монолитов).

где территорию дренировал овраг, во влажные годы имеющий временный водоток. Таким образом, весьма кратко охарактеризовали задачи 1–3 данной работы, как составляющие этапы почвенно-ландшафтных гидрологических изысканий.

Следующая задача работы — проведение исследований в длительные периоды, охватывающих годы с недостаточной и высокой обеспеченностью осадков. Эта весьма важная задача направлена на оценку вероятности появления неблагоприятных условий, то есть на оценку возникновения риска катастрофических почвенно-гидрологических ситуаций. В то же время она самая сложная в техническом отношении, так как включает использование цифровых технологий и прогнозных математических моделей.

Вполне понятно, что исследовать стационарно водный режим, определять запасы влаги в требуемой толще почв по всем режимным точкам наблюдений (на рис. 1 в 13-ти точках), да еще и в годы разной влагообеспеченности (а при необходимости и постановке соответствующих задач, и теплообеспеченности), весьма сложно, трудоемко и, в конце концов, недопустимо для быстроразвивающегося агроландшафтного земледелия. Поэтому был предложен следующий подход, вклю-

чающий проведение почвенно-мелиоративных (“заливочных”) экспериментов на основных стационарных точках (в данном случае около траншей 1–3). На указанных стационарных точках в специальных монолитных образцах диаметром 60 и глубиной до 1 м, оборудованных приборами для непрерывных наблюдений за влажностью, давлением почвенной влаги, температурой почвы послойно создавались условия от полного насыщения за счет искусственного полива до последующего иссушения в течение 5–10 сут. На рис. 3 приведены данные по послойному давлению влаги, полученному тензиометрами.

Синхронные наблюдения за давлением влаги и влажностью почвы при контроле метеорологических условий в приземном слое воздуха, определяющих эвапотранспирацию, дают возможность адаптировать физически обоснованную модель движения влаги в почве [12, 15, 26]. Иначе говоря, настроить модель так, чтобы она давала наименьшую погрешность в величинах влажности и давления влаги в проведенном стационарном эксперименте. Эта настройка модели с соответствующей погрешностью определения влажности и давления влаги дает основание для ее использования на данном агроландшафте для аналогичных почвенно-ландшафтных условий. Поэтому модель HYDRUS, настроенную по почвенно-мелиоративным экспериментам в районе траншей 1 и 3, использовали для прогнозных расчетов динамики влажности почв в точках 1–10, а указанный заливочный эксперимент на траншее 3 — для точек 11–13.

Отметим, что принципиальных различий в гидрофизических свойствах почв стационарных точек около траншей 3 и 2 не обнаружилось. Существенные различия касались только задания условий на нижней границе почвенного профиля (на траншеях 1 и 3 — свободный сток, а на траншее 2 — уровень грунтовых вод). После того как модель была настроена на конкретных почвенно-ландшафтных условиях, мы попытались рассчитать долговременный прогноз гидрологического поведения ландшафта в соответствующих точках 1–13 для лет различной обеспеченности осадков и соответственно лет с разными запасами влаги. В этом случае использовалось гидрологическое понятие “обеспеченность” как характеристика запасов влаги в годы различной обеспеченности осадков. В гидрологии и мелиорации почв (расчетах осадков, температур, дренажного стока, весенних и осенних паводков и др.) применяют вероятностный подход, основанный на определении обеспеченности той или иной характеристики. Под обеспеченностью понимают вероятность появления (%) величины равной или больше данной в многолетнем ряду, то есть значение обеспеченности — это вероятность того, что рассматриваемое значение гидрологической величины может быть

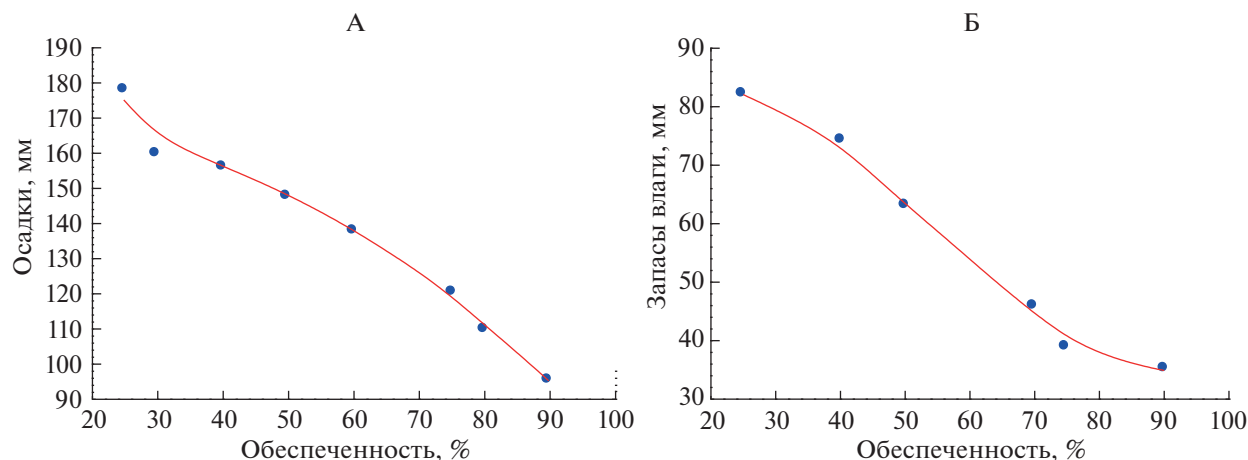


Рис. 4. Обеспеченность осадков по г. Пушкино (из интернета) (А) и запасов влаги в слое 0–20 см для агродерново-подзолистого почвы (Б) (Ельдигово) для периода май–сентябрь.

превышено. Например, обеспеченность осадков в 90% означает, что в 90% случаев эта величина осадков может быть превышена [6]. Отметим, что в Пушкинском районе Московской области количество осадков вегетационный период (май–сентябрь) изменялось от 180 до 95 мм, что соответствовало обеспеченности осадков от 25 до 90%. В то же время обеспеченность запасов влаги в 20-сантиметровой толще почвы по данным наших пятилетних наблюдений и специальных опытов изменялись от 82 до 35 мм, что соответствовало диапазону обеспеченности запасов влаги в слое 0–20 см от 25 до 90%. Эти кривые обеспеченности осадков и запасов влаги в 20-сантиметровой толще почвы за вегетационный периоды (май–сентябрь) приведены на рис. 4, А, Б.

Почему для характеристики гидрологии почв в агроландшафте необходимо использовать именно обеспеченности запасами влагой, а не традиционные величины запасов влаги? Дело в том, что запасы влаги – очень динамичная величина, например, при выпадении осадков запасы влаги резко меняются в агропочвах ландшафта. Поэтому их затруднительно использовать для проектирования, долговременной оценки, нахождения оптимального решения в агропроизводстве. Конечно, как реальная характеристика в реальном производственном времени величины запасов влаги наряду с ПГК должны и, безусловно, будут использоваться при ведении хозяйственных работ в агроландшафтах [4, 6, 7]. Однако для стабильной и долговременной характеристики, оценки, анализа и разработки проектов агросистем наряду с текущими запасами влаги рекомендуем использовать величину обеспеченности запасов влаги, указывая при этом слой почвы и период, для которого рассчитывается обеспеченность. Текущие запасы влаги в различных слоях почвы важны для

оперативного управления, а обеспеченность для долговременной оценки и возможных существенных катастрофических изменений в водном режиме почв. Видимо, обе эти характеристики при их целенаправленном сочетании способны дать долговременную и реальную динамическую оценки, изменение и прогноз водного режима почв агроландшафтов.

О расчетах кривой обеспеченности осадков. Кривая обеспеченности запасов влаги для 0–20 см получена благодаря расчетам по прогнозной математической модели HYDRUS в вегетационные периоды (май–сентябрь) по заданным величинам обеспеченности осадками от 25 до 90% для автоморфных условий, усредненным гидрофизическим свойствам слоя 0–20 см для всех почв. Полученная кривая обеспеченности запасами влаги приведена на рис. 4, Б по точкам 1–13 для 50%-ной обеспеченности. Для каждой точки (1–13) рассчитана обеспеченность запасов влаги с учетом гидрофизических свойств почв и условий на нижней границе. Для большей части поля нижнее граничное условие – свободный отток, для нижней части (точки 11–13) задается УГВ от 1.5 до 4 м. Верхнее граничное условие для всех расчетных точек одинаково. Таким образом, в показательном примере расчета обеспеченности запасов влаги в 20-сантиметровой толще в вегетационный период, изменяющимися по пространству факторами являются гидрофизические свойства почв, УГВ и обеспеченность осадков, которая и входит в виде верхнего граничного условия в расчет. (В данном подходе сначала задаются гидрофизические свойства по всем точкам, затем считается водный режим и оценивается обеспеченность.) В рассматриваемом случае горизонтальное передвижение влаги в ненасыщенной толще почвы считается пренебрежительно малым в сравнении с вертикаль-

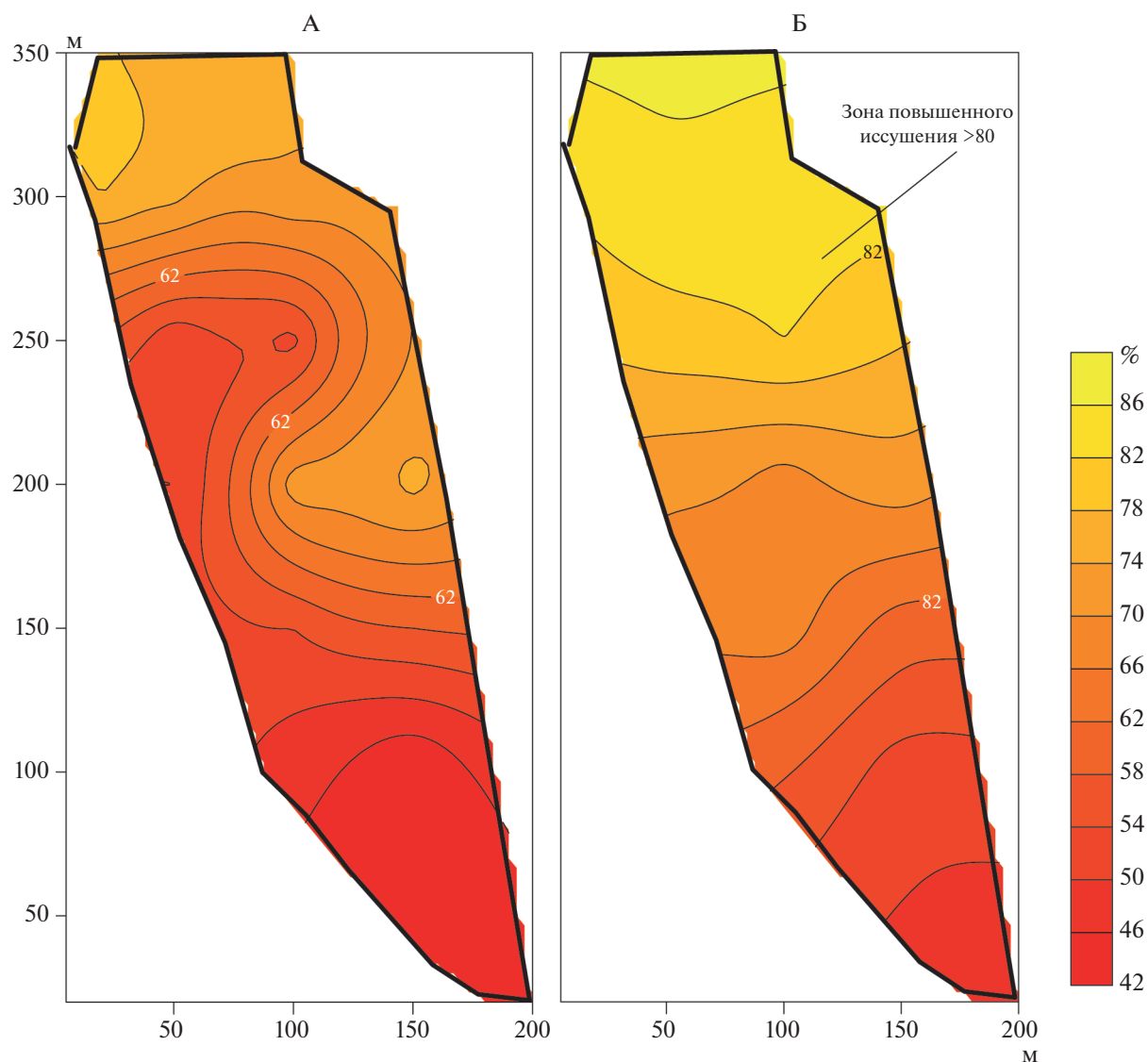


Рис. 5. Обеспеченность запасами влаги в агропочве при 50- (А) и 75%-ной (Б) обеспеченности осадков в вегетационный период (май–сентябрь).

ным и не учитывается при горизонтальном переносе, где основную роль играют грунтовые воды в периоды осеннего накопления и весеннего снеготаяния, которые в данном примере не входили в расчеты.

Как видно из рис. 5, топопоплеты обеспеченности запасов влаги в слое 0–50 см за периоды май–сентябрь несущественно, но закономерно различаются. В медианный год выделяется зона с глубокоогуленными почвами в нижней части поля, характеризующаяся обеспеченностью запасов влаги менее 50% (то есть медианной обеспеченностью). В засушливый год при 75%-ной обеспеченности осадков, эта зона остается на медианном уровне обеспеченности запасов, но существенно возрастает. Более того, в засушливые

годы заметно снижается УГВ, что должно привести к существенному сокращению обеспеченности запасов в толщах 0–50 и 0–100 см, которые часто входят в агрономические оценочные и прогнозные расчеты. Это потребует дополнительных расчетов и работы по их экспериментальному обеспечению (в частности, гидрофизическими функциями для толщи 50–100 см). Таким образом, используя статистическое понятие обеспеченности, можно представить изменения закономерностей обеспеченности запасов влаги в годы разной обеспеченности осадков, как итоговую многолетнюю характеристику гидрологии сельскохозяйственного поля в ландшафте.

Отметим, что приведенные данные по обеспеченности запасов влаги на территории опытного

поля Почвенного института им. В.В. Докучаева являются примером возможности использования в гидрологии почв статистических гидрологических понятий, позволяющих вести непрерывную оценку гидрологического режима почв. Приведенный пример характеризует обеспеченность запасами влаги только в толще 0–50 см и в период май–сентябрь, без учета зимних осадков и с некоторыми расчетными допущениями. Рассмотренный подход и экспериментальные данные по агроландшафту Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева представляет собой лишь центральный цифровой образ, который можно использовать в почвенной гидрологии при ее переходе к количественным ландшафтными современным подходам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью использования почвенно-гидрологического и мелиоративного понятия “обеспеченность”, соответствующих методов и экспериментов, а также математически адаптированных моделей для лет с разной обеспеченностью осадками обоснован подход и представлена экспериментальная картина обеспеченности запасов влаги в исследуемом агроландшафте. Изоплеты обеспеченности запасов влаги являются основным документом создающихся гидрологических (и температурных) условий. Эта карта изоплет обеспеченности запасами влаги является основой для анализа гидрологической ситуации в агроландшафте, выделения критических зон и периодов его гидрологического функционирования. Она может быть использована как основа для нахождения оптимальных решений для планирования и управления водным и тепловым режимами почв.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-05112 мк) – 50% и по теме госзадания: “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” – 50%.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова. М.: Росинформагротех, 2005. 794 с.
2. Болотов А.Г., Шеин Е.В., Макарычев С.В. Водоудерживающая способность почв Алтайского края // Почвоведение. 2019. № 2. С. 212–219.
3. Гусев Е.М., Джоган Л.Я. Мульчирование как важный элемент стратегии использования ресурсов естественного увлажнения в агроэкосистемах степного Крыма // Почвоведение. 2019. № 3. С. 348–354.
4. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Генетические, агрономические и мелиоративные аспекты. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 328 с.
5. Зайдельман Ф.Р. Мелиорация почв. М.: КДУ, 2017. 290 с.
6. Зайдельман Ф.Р., Смирнова Л.Ф., Шваров А.П., Никифорова А.С. Практикум по курсу “Мелиорация почв”. Тула: Гриф и К, 2008. 92 с.
7. Кирюшин В.И. Концепция развития земледелия в Нечерноземье. М.: Квадро, 2020. 276 с.
8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. Мадн А.И., Шеин Е.В. Насыщенная гидравлическая проводимость почв: экспериментальные определения и расчет с помощью педотрансферных функций // Агрофизика. 2018. № 1. С. 37–44. <https://doi.org/10.25695/AGRP.2018.01.05>
10. Муромцев Н.А., Анисимов К.Б. Особенности формирования водного режима дерново-подзолистой почвы на различных элементах почвенной катены // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 78–93.
11. Муромцев Н.А., Семенов Н.А., Анисимов К.Б. Особенности влагопотребления и влагообеспеченности растений различных экологических групп // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 82. С. 71–87.
12. Панина С.С., Шеин Е.В. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3. С. 45–50.
13. Шеин Е.В. Гидрология почв: этапы развития, современные тенденции, ближайшие перспективы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 175–185.
14. Шеин Е.В., Болотов А.Г., Умарова А.Б. и др. Руководство по использованию цифровых датчиков в режимных наблюдениях на полевой практике по физике почв. М.: КДУ, 2019. 52 с.
15. Шеин Е.В., Скворцова Е.Б., Панина С.С., Умарова А.Б., Романенко К.А. Гидродепозитарные и гидропроводящие свойства при моделировании влагопереноса в дерново-подзолистых почвах с помощью физически обоснованных моделей // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 71–82.
16. Lees M.J. Data-based mechanistic modelling and forecasting of hydrological systems // J. Hydroinformatics. 2000. № 2. Р. 15–34. <https://doi.org/10.2166/hydro.2000.0003>
17. Li Y., Zhang Q., Lu J., Yao J., Tan Z. Assessing surface water–groundwater interactions in a complex river-floodplain wetland-isolated lake system // River Res. Appl. 2019. V. 35. 25–36. <https://doi.org/10.1002/rra.3389>
18. Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Burges S.J. A simple hydrologically based model of land surface water

- and energy fluxes for GSMs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99(D7). P. 14415–14428.
19. Lin H., Bouma J., Pachepsky Y., Western A., Thompson J., van Genuchten R., Vogel H.-J., Lilly A. *Hydropedology: synergistic integration of pedology and hydrology* // *Water Resour. Res.* 2006. V. 42. W05301. <https://doi.org/10.1029/2005WR004085>
 20. Lin H.S. *Hydropedology: towards new insights into interactive pedologic and hydrologic processes across scales* // *J. Hydrology*. 2011. V. 406. P. 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.054>
 21. Lin H.S., Bouma J., Wilding L. et al. *Advances in hydropedology* // *Adv. Agron.* 2005. V. 85. P. 1–89.
 22. Lohse K.A., Dietrich W.E. *Contrasting effects of soil development on hydrological properties and flow paths* // *Water Resour. Res.* 2005. V. 41. W12419. <https://doi.org/10.1029/2004WR003403>
 23. McDonnell J.J., Sivapalan M., Vache K. et al. *Moving beyond heterogeneity and process complexity: a new vision for watershed hydrology* // *Water Resour. Res.* 2007. V. 43. W07301.
 24. Rasmussen C., Troch P.A., Chorover J. et al. *An open system framework for integrating critical zone structure and function* // *Biogeochemistry*. 2011. V. 102. P. 15–29. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9476-8>
 25. Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.T. *ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions* // *J. Hydrol.* 2002. V. 251. P. 163–176.
 26. Shein E.V., Dembovetsky A.V., Panina S.S. *Modeling soil water movement under low head ponding and gravity infiltration using data determined with different methods* // *Procedia Environ. Sci.* 2013. V. 19. P. 553–555. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.062>
 27. Stefano M., Bernasconi A., Bauder B. et al. *Chemical and biological gradients along the Damma Glacier soil chronose (Switzerland)* // *Vadose Zone J.* 2011. V. 10. P. 867–883.
 28. Strayer D.L., Beighley R.E., Thompson L.C. et al. *Effects of land cover on stream ecosystems: Roles of empirical models and scaling issues* // *Ecosystems*. 2003. № 6. P. 407–423. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0170-0>
 29. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines* // *Water Resour. Res.* 1980. V. 16. № 3. P. 574–582.
 30. Van Looy K., Bouma J., Herbst M. et al. *Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives* // *Rev. Geophys.* 2017. V. 55. P. 1199–1256. <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>

Soil Hydrology of Agricultural Landscapes: Quantitative Description, Research Methods, Availability of Soil Moisture Reserves

E. V. Shein^{1, 2, 3, *}, A. G. Bolotov³, and A. V. Dembovetskiy¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

³*Upper Volga Federal Agrarian Research Center, Suzdal, Vladimir Oblast, 601260 Russia*

*e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Soil hydrology has deep Russian roots, related primarily to the theory and application of hydrological constants. These criteria values were used mainly to assess the soil hydrological conditions in stationary observations, whereas the attempts to arrange hydrological observations in the landscape rested on the huge, often impracticable complexity of work, calculations, and unreliable quantitative forecast. Currently, there are new opportunities for experimental research, digital analysis and forecasting of hydrological parameters of soils in the landscape. A new quantitative approach to the use of digital technologies for monitoring moisture reserves and temperature in the soils of the agricultural landscape, dynamics and probabilistic calculations of the availability of these values has been developed. It is proposed to create an information and measurement system based on the soil map with the studied thermal and hydrophysical characteristics of soils, to calculate the dynamics of moisture and temperature for given time periods and conditions of different availability of heat and precipitation, and to quantify the availability of moisture reserves in the soils of the agricultural landscape. This system of observations, assessment and forecast includes the use of modern technologies for determining soil moisture and temperature, the adaptation of predictive physically based models for calculating the dynamics of moisture reserves depending on the availability of precipitation and conditions at the lower boundary of soil profiles. The article deals with the hydrological analysis of soils with the example of an agricultural landscape within the Zelenograd experimental polygon of the V. V. Dokuchaev Soil Institute in the village of Eldigino, Pushkinsky raion, Moscow oblast, Russian Federation.

Keywords: water and thermal regimes of soils, forecast, hydrophysics, physically based models, hydrothermal characteristics, soddy-podzolic clay loamy soil, Albic Glossic Retisols (Loamic, Aric, Cutanic)