

**ВОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ АГРОЭКОСИСТЕМ
В СТЕПНЫХ И ЛЕСОСТЕПНЫХ РАЙОНАХ РОССИИ.
1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ПЕРИОД, СТАНДАРТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
БОГАРНОГО ПАХОТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

© 2025 г. Е.М. Гусев, О.Н. Насонова

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.01.2025. После доработки 01.03.2025. Принята к публикации 01.07.2025.

Предложен ряд физически обоснованных и взаимодополняющих характеристик агроценозов, позволяющих провести количественную оценку их состояния с точки зрения обеспеченности водными ресурсами и включающих в себя показатель водной безопасности агроэкосистемы, риск дефицита ее влагообеспеченности, риск недобора урожая, обусловленного отклонением динамики водного режима от оптимальной, а также эффективность потребления экосистемой ресурсов естественного увлажнения. Разработана методика оценки указанных характеристик на основе использования модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP, стандартной метеорологической информации и данных о гидрофизических параметрах почвы. Проведена апробация этой методики на примере посевов озимой пшеницы в богарных условиях в районах 9 агрометеорологических станций, расположенных в степных и лесостепных регионах в пределах зернового пояса Европейской территории России, Западной и Восточной Сибири. Приведены результаты оценки вышеуказанных характеристик для исторического периода, демонстрирующие разную степень напряженности ситуации с водной безопасностью посевов в указанных регионах и имеющийся потенциал для повышения их водообеспеченности.

Ключевые слова: составляющие водного баланса, водная безопасность, риск дефицита влагообеспеченности, риск недобора урожая, озимая пшеница.

DOI: 10.24412/1993-3916-2025-3-27-41

EDN: FPISNI

В условиях все более активного использования человечеством природных ресурсов (в значительной мере ограниченных), а также возможных изменений климата планеты важной задачей является совершенствование и модернизация методов растениеводства, в т.ч. на обширной территории земледельческой зоны России. Необходимость решения этой задачи особенно значима для зерновых регионов страны, поскольку зерновые культуры занимают более половины ее посевных площадей.

На территории зерновых регионов, возможно, потребуются плавный переход к стратегии «зеленого земледелия», в основе которой лежит поворот от экстенсивной эксплуатации доступных природных ресурсов в агроэкосистемах к рационализации их использования. Фундаментом указанной рационализации служат природоподобные (англ. «nature-based») технологии. В земледелии изменение стратегии природопользования связано с переходом от стандартных методов отвальной системы обработки почвы на нетрадиционные (*адаптивные, почвозащитные, природоохранные, минимальные, зеленые, прямого посева, no-till*) технологии возделывания сельскохозяйственных культур (Дридигер и др., 2020; Nature-Based ..., 2018; Sustainable management ..., 2010).

Кроме того, в XXI веке может возникнуть необходимость адаптации приемов земледелия в зерновых регионах РФ к изменению климата в связи с возможным ухудшением погодно-климатических условий для выращивания зерновых (Третий оценочный ..., 2022). Главная причина этого – прогнозируемое усиление аридизации климата в этих регионах, приводящее к увеличению дефицита влагообеспеченности агроэкосистем из-за ожидаемой тенденции уменьшения осадков на фоне роста температуры воздуха.

Отмеченные регионы расположены в основном в степной и лесостепной зонах России. По соотношению выпадающих осадков и потенциального испарения значительные части этих территорий и в настоящий период можно отнести к засушливым, т.е. находящимся в определенной мере в зоне рискованного земледелия, а при изменении климата степень аридности может увеличиться.

Рассмотренное обстоятельство требует анализа проблемы водообеспеченности зерновых агроэкосистем в указанных регионах с позиций их водной безопасности. Концепция *водной безопасности*, как и сам термин (не только в отношении человеческих сообществ, но и всех наземных экосистем) появились в XXI веке. При этом понятие водной безопасности не сводится к отсутствию дефицита воды, а относится и к таким ситуациям, когда вода есть, но ее недостаточно (Grey, Sadoff, 2007; Sadoff et al., 2020).

Разнообразие биосферных экосистем и многообразие отраслей хозяйственной деятельности человека привело к появлению различных определений понятия *водная безопасность* (UN-Water ..., 2013; Water security ..., 2012), что не позволяет универсализировать методы ее оценки (Caretta et al., 2022). В данной работе мы понимаем под водной безопасностью экосистем суши степень доступности воды в достаточном количестве для нормального существования и развития этих систем (Global water ..., 2018; World water ..., 2018). А более конкретным объектом исследования, как это следует из вышеизложенного, послужили зерновые богарные агроэкосистемы степных и лесостепных территорий России. При анализе и возможном решении проблемы их водообеспеченности возникает необходимость решения ряда задач. Первая из них связана с выбором возможного варианта количественной оценки водной безопасности указанных агроценозов. Это дает возможность рассчитать степень водной безопасности зерновых агроэкосистем в современный (базовый) период при традиционных агротехнологиях пахотного земледелия, что является второй задачей исследования.

Третья задача связана с оценкой эффективности повышения водной безопасности посевов зерновых в выбранных районах РФ за счет рационализации использования имеющихся в этих регионах ресурсов естественного увлажнения (приходящих осадков) на основе методов зеленого земледелия. Хотя водная безопасность агроэкосистем может быть повышена посредством ирригации, здесь возможности этого направления не рассматриваются, поскольку данный путь, являясь экстенсивным в отношении использования водных ресурсов, требует значительных затрат и приводит в конечном итоге к целому ряду экологических проблем, которые через определенный период времени также потребуют расходов на их преодоление.

И наконец, прогнозируемые перспективы климатических изменений ставят на повестку дня задачу оценки изменения степени водной безопасности зерновых агроэкосистем в районах степных и лесостепных территорий РФ, а возможно и рассмотрение адаптационных к изменению климата мер по повышению указанной безопасности.

Настоящая статья – первая в планируемой серии публикаций, связанных с различными аспектами проблемы водной безопасности зерновых агроэкосистем России. В ней в силу ограниченности объема будут рассмотрены подходы к решению только двух первых задач.

Вариант количественной оценки водной безопасности агроэкосистемы

Предлагаемая в работе версия количественной оценки степени водной безопасности агроэкосистемы, определяемая возможностью более или менее оптимального функционирования ее растительной культуры, основана на положениях неравновесной термодинамики, в частности, на теории существования и развития диссипативных структур.

Диссипативные структуры (к которым относятся все живые организмы, включая и наземные зеленые растения) – это динамические структуры, возникающие и существующие (в отличие от кристаллических) вдали от термодинамического равновесия (Пригожин, 1960). Они существуют благодаря непрерывному потоку приходящей свободной энергии, обеспечивающей сохранение упорядоченности структуры. Но по причине отсутствия термодинамического равновесия приходящая энергия преобразуется (диссипирует) в более низкачественную тепловую энергию, повышающую энтропию (неупорядоченность) структуры, создавая угрозу самому ее существованию. Поэтому для сохранения ее целостности необходимо наличие экспорта тепловой энергии. Для наземных растений

главным экспортером энтропии, образующейся в их фотосинтезирующих элементах при диссипации энергии солнечного излучения в тепло, является поток водяного пара из устьиц листьев, уносящий низкокачественную тепловую энергию в атмосферу.

В процессе морфологической эволюции биосферных структур (Гусев, 1990, 2012; Gusev, Novak, 2007) транспирация стала тем единственным механизмом, который уносит громадное количество тепла от фотосинтезирующих элементов растений, предотвращая заметное повышение их температуры, что в отсутствие транспирации привело бы к температурам, выходящим за пределы не только депрессии фотосинтеза, но и существования ферментов и структурных образований плазмы клеток.

Таким образом, для наземных зеленых растений их водная безопасность напрямую связана с одной из составляющих гидрологического цикла суши – транспирацией, что дает основание связать количественную оценку степени водной безопасности экосистем, в том числе и агроэкосистем, именно с этой характеристикой водного режима растительного покрова.

Оптимальные условия физиологического режима растительного покрова складываются в том случае, когда поступление воды к корням растений, а затем через устьичный аппарат листьев в атмосферу, не лимитируется. Степень водной безопасности в этих условиях наибольшая, а контролируемая растением транспирация максимальна при существующих в данном месте метеорологических условиях, и ее обычно называют потенциальной.

В случае же, когда по каким-либо причинам (например, при недостаточно высокой влажности почвы) поступление воды к корням и далее к листьям начинает ограничиваться, растение испытывает «водный стресс». При этом снижается и интенсивность транспирации, значение которой начинает отличаться от потенциального. Все это дает основание в качестве меры водной безопасности экосистемы, в т.ч. агроэкосистемы, использовать такой индикатор, как влагообеспеченность ее растительного покрова Π_w , определяемую следующим образом (Будаговский, 1989; Гусев, 2012):

$$\Pi_w = ET/ET_p \quad (1),$$

где ET и ET_p – реальная и потенциальная транспирация растительного покрова за вегетационный период года, соответственно.

Критерий Π_w представляет собой оценку состояния растительного покрова при реализации метеорологических условий в конкретном году. Показатель же водной безопасности (обозначим его β_w) должен отражать собой статистически взвешенную оценку влагообеспеченности при различных возможных реализациях комплекса метеорологических условий, что позволяет предложить следующую формулировку β_w :

$$\beta_w = \int_0^1 \Pi_w \rho(\Pi_w) d\Pi_w \quad (2),$$

где $\rho(\Pi_w)$ – плотность вероятности, соответствующая реализации ситуации с конкретным значением Π_w .

Как видно из (2), критерий водной безопасности агроэкосистемы β_w лежит в интервале между 0 и 1. Его значение тем выше, чем ближе значение реальной транспирации к потенциальному, при котором растительный покров находится в оптимальных для конкретного района условиях влагообеспеченности для осуществления продукционного процесса.

При этом следующий показатель $R_w = 1 - \beta_w$ (3) можно определить как риск дефицита влагообеспеченности агроэкосистемы, когда риск рассматривается как математическое ожидание численной оценки степени уязвимости системы (Хохлов, 2001; в данном случае в отношении дефицита влагообеспеченности растительного покрова).

Представляет интерес также оценка нижеследующего индикатора:

$$\Pi_e = ET/EC \quad (4),$$

где EC – годовое суммарное испарение растительного покрова экосистемы.

Критерий Π_e (Будаговский, 1989; Гусев, 2012) называется эффективностью использования экосистемой ресурсов почвенных вод и показывает, какая доля суммарного испарения является продуктивной, т.е. насколько эффективно экосистема использует для своего существования и развития восходящий поток гидрологического цикла суши EC . В естественных многоярусных поликультурных сообществах значение Π_e , как правило, близко к 1 (Ананьева, Самарина, 1986; Лархер, 1978). Данный показатель дает возможность оценить, насколько велики резервы экосистемы,

чтобы повысить водную безопасность растительного покрова β_w и сократить риски дефицита влагообеспеченности за счет перераспределения составляющих суммарного испарения.

Водная безопасность агроэкосистем тесно связана с продовольственной безопасностью человеческой популяции, поскольку от водного режима посевов в значительной мере зависит урожайность сельскохозяйственных культур Y . Урожайность агроценоза определяется совокупностью многих факторов: почвенных, метеорологических, агротехнических и т.д. Поскольку в данной работе акцент делается на оценке значимости водного фактора, введем понятие потенциальной урожайности Y_p , под которой будем понимать урожайность, достигаемую конкретной агроэкосистемой, в частности посевами зерновых, в условиях достаточной влагообеспеченности (при равных прочих факторах). Подобная ситуация реализуется, в частности, в условиях орошения. Очевидно, что в этом случае $ET = ET_p$, следовательно, $Y \equiv Y_p$.

Разность $\Delta Y = Y_p - Y$ можно рассматривать как недобор урожая, вызванный неоптимальностью водного режима посева, а риск недобора урожая, обусловленный недостаточной водной безопасностью агроэкосистемы, можно выразить следующим образом:

$$R_Y = \int_{\Omega_Y} \Delta Y \rho(\Delta Y) d(\Delta Y) \quad (5),$$

где $\rho(\Delta Y)$ – плотность вероятности, соответствующая реализации ситуации с конкретным значением ΔY , Ω_Y – область возможных значений ΔY .

Методика оценки степени водной безопасности и риска дефицита влагообеспеченности зерновых агроэкосистем

Поскольку оценка введенных критериев β_w , R_w и Γ_e основана на информации о величинах реальной и потенциальной транспирации, а также суммарного испарения конкретной агроэкосистемы за определенный ряд лет (что позволяет получить статистически взвешенную оценку этих характеристик), необходима методика, дающая возможность провести многолетние расчеты составляющих водного баланса (в том числе составляющих суммарного испарения) для указанной экосистемы. В качестве основного методического инструментария для выполнения расчетов в данной работе использована разработанная авторами статьи модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP (англ. «Soil Water – Atmosphere – Plants»).

Модель SWAP, подробное описание которой можно найти в работе Е.М. Гусева и О.М. Насоновой (2010), позволяет воспроизводить следующие процессы, протекающие в экосистемах суши: перехват жидких и твердых атмосферных осадков растительным покровом, их последующее испарение и таяние (в случае твердых осадков); формирование снежного покрова в холодный период года; промерзание и оттаивание почвы; впитывание воды как в талую, так и мерзлую почву; формирование поверхностного и подземного стоков; транспирацию, физическое испарение воды почвой, водообмен с грунтовыми водами, изменение почвенных влагозапасов; формирование радиационного и теплового балансов и термического режима системы «почва – растительный покров – приземный слой атмосферы».

Работоспособность SWAP неоднократно проверялась для разных типов подстилающей поверхности суши (включающих и степные агроэкосистемы), на различных объектах РФ и других регионов земного шара как при разработке и тестировании модели, так и при участии ее авторов в многочисленных международных проектах (Гусев и др., 2004, 2024; Boone et al., 2004; Liang et al., 1998; Lohmann et al., 1998; Schlosser et al., 2000; Wood et al., 1998). Данное обстоятельство позволяет использовать модель и при осуществлении расчетов, необходимых для решения поставленных в работе задач, в частности, для оценки степени водной безопасности зерновых экосистем в современный период при традиционных агротехнологиях отвальной обработки почвы в различных степных и лесостепных районах РФ.

Для оценки недобора урожая агроэкосистемы, обусловленного различными причинами, часто применяются динамические модели продукционного процесса и водно-теплового режима агроценоза, довольно детально описывающие происходящие в нем процессы (Сиротенко, Павлова, 2012; Павлова, Варчева, 2017). Однако эти модели требуют немало дополнительной информации. Поэтому при оценке Y в настоящей работе мы воспользовались приближенной эмпирической связью урожайности и рассчитанной за вегетационный период транспирации, которую по данным о ET и Y , приведенным в работах С.М. Пакшиной с соавторами (2015) и И.С. Шатилова (1978), в первом

приближении можно принять прямо пропорциональной:

$$Y \approx k \cdot ET \quad (6),$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый конкретной экосистемой.

Соответственно, потенциальная урожайность посева Y_p оценивалась в первом приближении, как $Y_p \approx k \cdot ET_p$ (7).

Коэффициент k зависит от множества факторов (плодородия почвы, агротехники, режима внесения удобрений, сорта культуры и т.д.). Поэтому в данной работе для зерновой агроэкосистемы в конкретном ее месторасположении значение k определялось эмпирически (конечно, довольно приближенно) по рассчитанным среднесезонным значениям годовой транспирации и имеющимся в справочниках и литературных источниках данным об урожаях зерновых культур в районе расположения рассматриваемой экосистемы (Федеральная служба ..., 2025; Министерство сельского хозяйства ..., 2020; Балашов и др., 2011; Чернявская, Панина, 2015; Урожайность ..., 2019; Бойко, Василько, 2020; Козлов и др., 2022).

Полученные для каждой станции многолетние ряды значений Y и Y_p позволили оценить для этих станций в соответствии с (5) риск недобора урожая озимой пшеницы R_Y в современный период при использовании стандартных технологий пахотного земледелия.

Географическое расположение объектов исследования и их информационное обеспечение

В России половину площади, отведенной под зерновые культуры, занимают посевы пшеницы. Поэтому основное внимание в работе уделено именно этой культуре, тем более что результаты исследования, касающиеся ее водного режима, без большой потери точности могут быть распространены на многие другие зерновые. Культура пшеницы (озимой и яровой) в России, как и в других странах мира, получила наибольшее распространение в степных и лесостепных районах. На Европейской территории РФ преобладают посевы озимой пшеницы как более урожайной, в то время как в южных районах Сибири и Дальнего Востока в связи более суровыми условиями перезимовки озимой культуры, посевы которой тоже встречаются, предпочтение все же отдается яровой. В данной работе акцент исследования сделан на агроэкосистемах озимой пшеницы.

Многолетние расчеты составляющих водного баланса посевов озимой пшеницы были проведены для 9 агрометеорологических станций, расположенных на степных и лесостепных территориях юга РФ (рис. 1). Как правило, объекты находятся в степной или лесостепной зонах, но не обязательно. В частности, агрометеорологическая ст. Архангельская расположена в зоне высотной поясности, но при этом в Баргузинской котловине, часть которой занята злаковой степью.

Диапазон климатических условий в местах расположения выбранных станций довольно широк, их климатические характеристики (среднегодовая температура воздуха, атмосферные осадки, солнечная радиация и т.д.) отличаются, что дает возможность провести сравнительный анализ их влияния на водную безопасность экосистем озимой пшеницы, риск дефицита их влагообеспеченности, а также коэффициент полезного использования естественных водных ресурсов указанными экосистемами.

Выбор приведенных агрометеорологических станций связан с тем, что для них в открытом доступе имеются данные измерений влажности почвы под посевами пшеницы, на которых можно проиллюстрировать работоспособность модели SWAP путем сопоставления смоделированных значений влагозапасов почвы с измеренными. Указанные данные взяты из Международной сети по влажности почвы (англ. «The International Soil Moisture Network» или ISMN), представляющей собой проект, поддерживаемый многочисленными международными организациями (Dorigo et al., 2021). Он направлен на создание и ведение глобальной базы данных по влажности почв и служит значимым ресурсом для проверки и совершенствования глобальных спутниковых продуктов, а также для улучшения гидрологических, климатических моделей, моделей земной системы и др.

Необходимое при проведении расчетов информационное обеспечение модели SWAP включает в себя три блока: 1) входные метеорологические характеристики (количество осадков, скорость ветра, температура и влажность воздуха, приходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, атмосферное давление); 2) гидрофизические параметры почвы; 3) характеристики растительного покрова (Гусев, Насонова, 2010).

В качестве входной метеорологической информации для каждой агрометеорологической станции

использовались суточные значения вышеуказанных метеорологических характеристик (за исключением радиации), измеренных на ближайшей к ней метеорологической станции за 1977-2023 гг. и представленных в базе данных ВНИИГМИ-МЦД (Всероссийский ..., 2025).

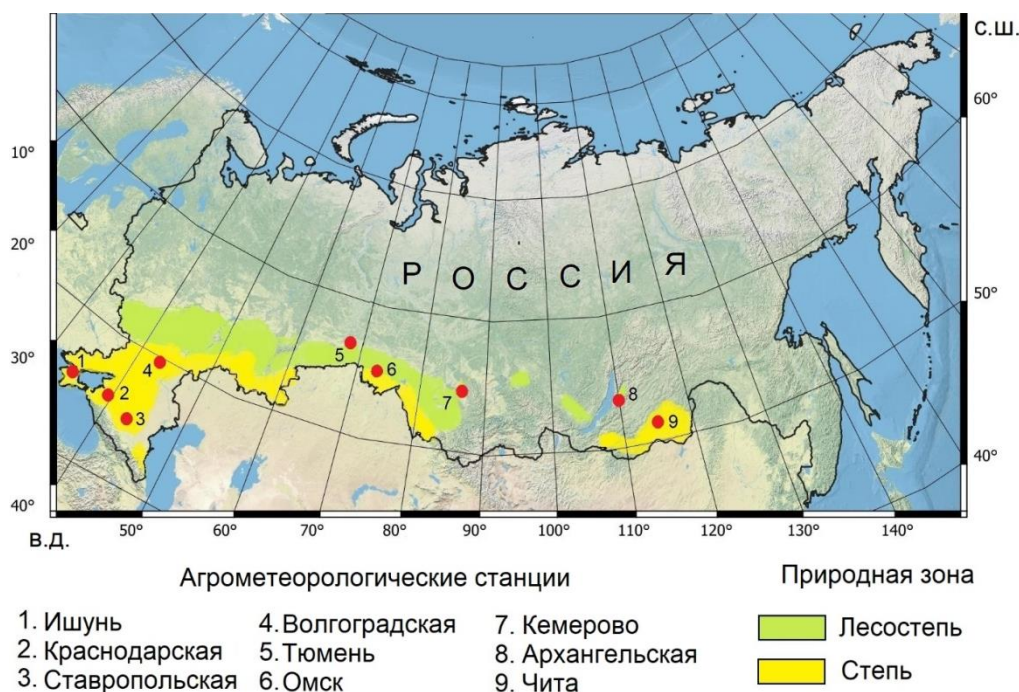


Рис. 1. Агрометеорологические станции, материалы наблюдений которых использованы в работе.

Значения приходящей длинноволновой и коротковолновой радиации рассчитывались для того же временного периода с использованием данных стандартных метеорологических наблюдений по методике, изложенной в работе Е.М. Гусева с соавторами (2006). Расчеты коротковолновой (солнечной) радиации при безоблачном небе проводились с использованием информации о географической широте места, солнечном склонении и среднемноголетних месячных значениях коэффициента прозрачности атмосферы. Для расчета значений приходящей длинноволновой радиации при ясном небе использовались данные наблюдений за атмосферным давлением, температурой и влажностью воздуха на 2 м. Далее полученные значения коротковолновой и длинноволновой радиации корректировались с учетом данных наблюдений за общей облачностью.

Оценка гидрофизических параметров почвы частично осуществлялась с использованием экосистемной глобальной базы данных ECOCLIMAP, разработанной Национальным Центром Метеорологических Исследований CNRM/GAME (Метео-Франс, Тулуза, Франция; Masson, 2003), частично на основе информации о параметрах почвы, представленной в базе данных ISMN. Из ECOCLIMAP были взяты данные о механическом составе почвы (CLAY и SAND), которые использовались для расчета коэффициента фильтрации почвы, наименьшей влагоемкости, потенциала почвенной влаги при насыщении и В-параметра, идентифицирующих почву на основе связи ее капиллярно-сорбционного потенциала с влажностью в рамках модели Клэппа–Хорнбергера (Clapp, Hornberger, 1978) на основе уравнений, приведенных в работах R.B. Clapp и G.M. Hornberger (1978), В.Ж. Cosby с соавторами (1984). Такие важные почвенно-гидрологические константы как полная влагоемкость и влажность завядания взяты для каждой агрометеорологической станции из базы данных ISMN.

Что касается параметров растительного покрова, то для задания значений альбеда использовалась база данных ECOCLIMAP. Оценка остальных параметров (глубина корнеобитаемой зоны и относительная площадь листьев *LAI*) привязывалась к экосистеме озимой пшеницы. Так, глубина ее корнеобитаемой зоны принималась равной 1 м. Использование такой глубины традиционно (Будаговский, 1989; Вериге, Разумова, 1973; Гусев и др., 2024; Джоган, 1990; Gusev et al., 2018) и удобно при проведении сравнения рассчитанной динамики влагозапасов почвы с данными наблюдений.

Для оценки динамики такой важной характеристики, как LAI , в отличие от многих гидрологических моделей и моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой, в которых годовой ход LAI задается и не меняется по годам, в настоящей работе был использован подход, при котором LAI озимой пшеницы «растет» в модельных расчетах от даты всходов до созревания в зависимости от погодных условий. Эта методическая особенность позволяет более дифференцированно учесть влияние водного фактора для различных по метеорологическим условиям лет, позволяя выявить вариабельность водной безопасности агроэкосистемы по годам. С этой целью в SWAP был добавлен блок, позволяющий рассчитывать динамику LAI по алгоритму, описанному в работе Е.М. Гусев и О.Е. Бусаровой (1998).

При этом полагается, что эволюция относительной площади листьев конкретной культуры в течение периода вегетации определяется, во-первых, некоторой заданной («генетической») программой, в которой в качестве предиктора используется нарастающая сумма положительных температур воздуха (Полужков, 1991), а, во-вторых, режимом увлажнения корнеобитаемого слоя почвы. Описанный алгоритм «роста» LAI неоднократно применялся авторами при расчетах водного режима посевов пшеницы (Гусев, Джоган, 2019; Гусев и др., 2024; Gusev et al., 2018).

Подготовленное по описанной методике информационное обеспечение позволило с использованием модели SWAP провести многолетние расчеты составляющих водного баланса и водного режима посевов озимой пшеницы в районах расположения выбранных агрометеорологических станций и оценить для базового периода (1978-2023 гг.) степень водной безопасности экосистем озимой пшеницы, а также риск дефицита их влагообеспеченности и коэффициент полезного использования естественных водных ресурсов в современный период при традиционных агротехнологиях.

Сопоставление рассчитанных и измеренных влагозапасов почвы под посевами озимой пшеницы в районах выбранных агрометеорологических станций

Прежде чем перейти к анализу основных результатов исследования, проиллюстрируем качество воспроизведения моделью SWAP динамики влагозапасов почвы на полях с посевами озимой пшеницы. На рисунке 2 для группы агрометеорологических станций представлена динамика влагозапасов метрового слоя почвы V , измеренных на полях озимой пшеницы и рассчитанных с использованием модели SWAP по описанной выше методике. Значения измеренных влагозапасов взяты из упомянутой ранее базы данных ISMN, за исключением ст. Ишунь, для которой такие данные были получены из Агрометеорологических ежегодников Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Приведенные на рисунке 2 результаты показывают вполне удовлетворительное соответствие измеренных и рассчитанных V , особенно если учесть некоторое различие между местоположением агрометеорологических станций, дающих сведения о влажности почвы, и метеорологических станций, обеспечивших необходимую для расчетов метеорологическую информацию; модельный характер оценки приходящей радиации; не очень высокую точность оценки гидрофизических параметров почвы; относительно невысокое качество выборки измерений влажности почвы. Так, измерения влажности могли проводиться в разные годы на различных полях, а кроме того, возможны пропуски как декадных измерений, так и измерений за отдельные годы.

Тем не менее, точность расчетов влагозапасов метрового слоя почвы (табл. 1) оказалась близкой к точности измерения этой характеристики на сельскохозяйственных полях, составляющей ~ 20-25 мм (Разумова, Мещанинова, 1978), за исключением ст. Архангельская. Но для этой станции длина ряда для оценки точности расчета слишком мала (как и для ст. Чита), чтобы считать этот результат достаточно достоверным.

Ошибка расчета влагозапасов метрового слоя почвы $\sigma_{V,cal}$ при этом оценивалась на основе следующего соотношения:

$$\sigma_V^2 = \sigma_{V,cal}^2 + \sigma_{V,obs}^2 \quad (8),$$

где σ_V – среднеквадратическое отклонение измеренных и рассчитанных значений V ; $\sigma_{V,obs}$ – среднеквадратическая ошибка измерения V , принятая равной 25 мм.

Также неплохо согласуется изменчивость по станциям рассчитанных дат всходов (примерно с начала марта в Крыму и до мая в Забайкалье) и уборки (с июня в Крыму до августа-сентября в Забайкалье) озимой пшеницы с их фактическими значениями (Климова, 2023; Информер, 2022;

АгроНовости, 2024; Измаилова, 2021; Рюмшин, 2021; ASM-AGRO, 2023) для территорий, где расположены выбранные агрометеорологические станции.

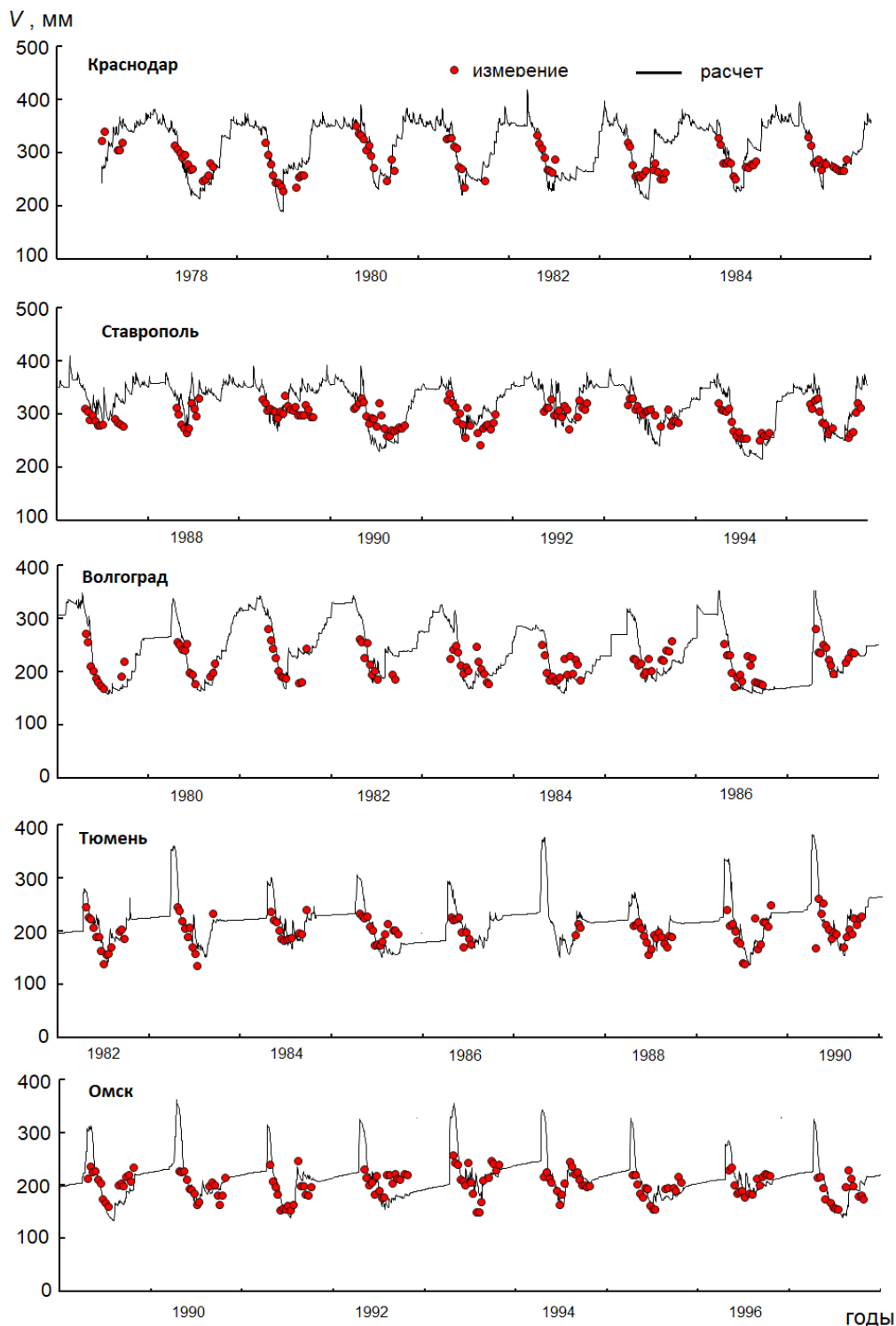


Рис. 2. Динамика измеренных и рассчитанных влагозапасов метрового слоя почвы на полях с посевами озимой пшеницы в местах расположения ряда агрометеорологических станций.

Полученные результаты расчетов динамики почвенных влагозапасов, примерных дат всходов и уборки посевов озимой пшеницы для выбранных станций, расположенных в различных степных и лесостепных районах РФ, подтвердили работоспособность описанной выше методики исследования

и возможность использования полученных с ее помощью рядов составляющих суммарного испарения для оценки водной безопасности и риска дефицита влагообеспеченности посевов озимой пшеницы, а также коэффициента полезного использования естественных водных ресурсов в современный период при традиционных агротехнологиях в указанных районах.

Таблица 1. Точность расчетов влагозапасов верхнего метрового слоя почвы под посевами озимой пшеницы на основе модели SWAP.

| Агрометеорологическая станция | Длина ряда измеренных влагозапасов | Точность модельных расчетов влагозапасов верхнего метрового слоя почвы, мм |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| Ишунь | 138 | 21 |
| Краснодарская | 283 | 25 |
| Ставропольская | 327 | 21 |
| Волгоградская | 284 | 27 |
| Тюмень | 210 | 27 |
| Омск | 262 | 17 |
| Кемерово | 44 | 18 |
| Чита | 10 | 14 |
| Архангельская | 23 | 53 |

Результаты и обсуждение

В таблице 2 представлены основные результаты проведенных расчетов, включающие в себя в том числе значения составляющих водного баланса (из которых продуктивной для агроэкосистем является только транспирация), показателей водной безопасности, риска дефицита влагообеспеченности, коэффициента полезного использования естественных водных ресурсов, потенциальной урожайности, риска недобора урожая посевов озимой пшеницы в районах выбранных агрометеорологических станций в современный период при традиционных технологиях пахотного земледелия.

При этом, поскольку плотности распределения Γ_w и ΔY , входящие в уравнения (2) и (5), неизвестны, данные выборки годовых значений этих характеристик позволяют получить только приближенные эмпирические оценки β_w и R_y , в качестве которых использовались среднееголетние годовые значения Γ_w и ΔY .

На рисунке 3а для рассмотренных агроэкосистем приведена полученная среднееголетняя зависимость отношения годового суммарного испарения к его потенциальному значению EC/EC_p от так называемого коэффициента увлажнения $k_y = P / EC_p$ (Иванов, 1948) в районе расположения агроэкосистем. Для сравнения здесь же показаны известные классические аппроксимации этой зависимости (Ольдекоп, 1911; Schreiber, 1904), которые демонстрируют хорошее согласие с результатами наших расчетов, тем самым еще раз подтверждая обоснованность разработанной методики. Как видно из рисунка 3а, для всех агроэкосистем $0.3 < k_y < 1.0$. При таких значениях соответствующая территория относится к области недостаточного увлажнения (степь, саванна, лесостепь).

Указанный факт демонстрируют и полученные значения показателя водной безопасности рассматриваемых агроэкосистем β_w , варьирующие от 0.49 для ст. Ишунь до 0.92 для ст. Краснодарская, т.е. для всех агрометеорологических станций $\beta_w < 1$ (табл. 2, рис 3б). Значение β_w соответствует математическому ожиданию (в данном случае среднееголетнему значению) влагообеспеченности посева Γ_w . В отдельные же годы значения Γ_w для некоторых станций могут опускаться ниже 0.3.

Диапазон рассчитанных значений β_w хорошо согласуются с интервалом значений среднееголетней влагообеспеченности посевов пшеницы, полученным для южного склона Русской равнины (Шумова, 2010б; Гусев, 2012): от 0.9 на юге лесной зоны до 0.3 в полупустынных низовьях р. Волги.

На рисунке 3б представлена связь β_w с коэффициентом увлажнения k_y . Она может быть аппроксимирована уравнением:

$$\beta_w = 1 - \exp(-a k_y) \quad (9),$$

где a – эмпирический параметр, оказавшийся равным 2.2. Вид уравнения выбран, исходя из следующих соображений. Во-первых, при $k_y \rightarrow 0$ $\beta_w \rightarrow 0$ (в силу стремления к нулю транспирации при $P \rightarrow 0$); во-вторых, при $k_y \rightarrow \infty$ $\beta_w \rightarrow 1$ (в силу стремления $ET \rightarrow ET_p$ при $P \rightarrow \infty$ по причине того, что бесконечно большие осадки обеспечивают постоянную достаточную влагообеспеченность экосистемы). Рисунок 3б показывает, что, в отличие от $EC/EC_p = f(k_y)$, связь β_w с k_y не очень тесная (коэффициент корреляции между модельными значениями β_w и вычисленными по уравнению (9) ≈ 0.72).

Таблица 2. Рассчитанные для выбранных агрометеорологических станций значения среднесезонных годовых составляющих водного баланса (мм), а также показателей водной безопасности, коэффициента полезного использования естественных водных ресурсов, связанного с недостаточной влагообеспеченностью риска недобора урожая озимой пшеницы (ц/га) в современный период при традиционном пахотном земледелии.

| Агрометеорологическая станция | Ишунь | Краснодарская | Ставропольская | Волгоградская | Тюмень | Омск | Кемерово | Чита | Архангельская |
|-------------------------------|-------|---------------|----------------|---------------|--------|------|----------|------|---------------|
| P | 319 | 720 | 562 | 403 | 467 | 409 | 503 | 356 | 357 |
| $R_{\text{пов}}$ | 7 | 15 | 7 | 17 | 0 | 0 | 6 | 1 | 1 |
| $R_{\text{под}}$ | 5 | 200 | 43 | 50 | 159 | 111 | 171 | 38 | 64 |
| ET | 138 | 200 | 207 | 167 | 150 | 118 | 145 | 139 | 150 |
| ES | 165 | 292 | 275 | 151 | 123 | 151 | 137 | 142 | 97 |
| E_{sn} | -1 | 2 | 20 | 11 | 26 | 19 | 34 | 24 | 36 |
| E_{int} | 5 | 12 | 9 | 6 | 10 | 9 | 10 | 11 | 8 |
| EC | 307 | 506 | 511 | 336 | 309 | 298 | 326 | 316 | 291 |
| ET_p | 281 | 219 | 301 | 248 | 188 | 181 | 180 | 177 | 220 |
| EC_p | 988 | 895 | 1160 | 874 | 538 | 566 | 559 | 700 | 618 |
| β_w | 0.49 | 0.92 | 0.70 | 0.69 | 0.81 | 0.66 | 0.81 | 0.79 | 0.70 |
| R_w | 0.51 | 0.08 | 0.30 | 0.31 | 0.19 | 0.34 | 0.19 | 0.21 | 0.30 |
| $\bar{\Pi}_e$ | 0.45 | 0.40 | 0.40 | 0.50 | 0.49 | 0.40 | 0.45 | 0.44 | 0.51 |
| R_y | 30 | 5 | 16 | 16 | 5 | 15 | 5 | 4 | 8 |

Примечания к таблице 2: P – атмосферные осадки; $R_{\text{пов}}$, $R_{\text{под}}$ – поверхностный и подземный стоки; ET – транспирация; ES – испарение воды почвой; E_{sn} – испарение снега; E_{int} – испарение осадков, перехваченных растительным покровом; EC – суммарное испарение; ET_p – потенциальная транспирация; EC_p – потенциальное суммарное испарение; β_w – водная безопасность; $\bar{\Pi}_e$ – среднесезонный коэффициент полезного использования ресурсов почвенных вод; R_y – риск недобора урожая агроэкосистемы, обусловленный ее недостаточной влагообеспеченностью.

Причина этого обстоятельства заключается в том, что, если при оценке связи $EC/EC_p = f(k_y)$ при расчетах суммарного испарения участвует метеорологическая информация за весь год, то при расчетах значений ET , определяющих β_w , только за вегетационный период, который, завися от климатических температур в районах расположения станций, даже при близких для разных станций значениях k_y , может существенно различаться, делая зависимость $\beta_w = f(k_y)$ менее устойчивой по сравнению с $EC/EC_p = f(k_y)$, для которой корреляция модельных значений EC/EC_p со значениями ≈ 0.98 , рассчитанными по работам Э.М. Ольдекоп (1911) и Р. Schreiber (1904; рис. 3а).

Недостаточная водная безопасность рассмотренных агроэкосистем приводит к появлению ненулевых значений рисков дефицита влагообеспеченности посевов R_w и недобора урожая R_y (табл. 2). Так, значения R_w варьируют от 0.08 для ст. Краснодарской до 0.51 для ст. Ишунь, значения

R_y от 4 ц/га для ст. Чита до 30 ц/га для ст. Ишунь. Следует отметить, что в отдельные годы для некоторых станций Южного Федерального округа РФ (где велики значения потенциальной урожайности Y_p) недобор урожая, обусловленный низкой влагообеспеченностью посевов, может достигать 30-40 ц/га, что еще раз подтверждает принадлежность рассмотренных в работе районов к зоне рискованного земледелия.

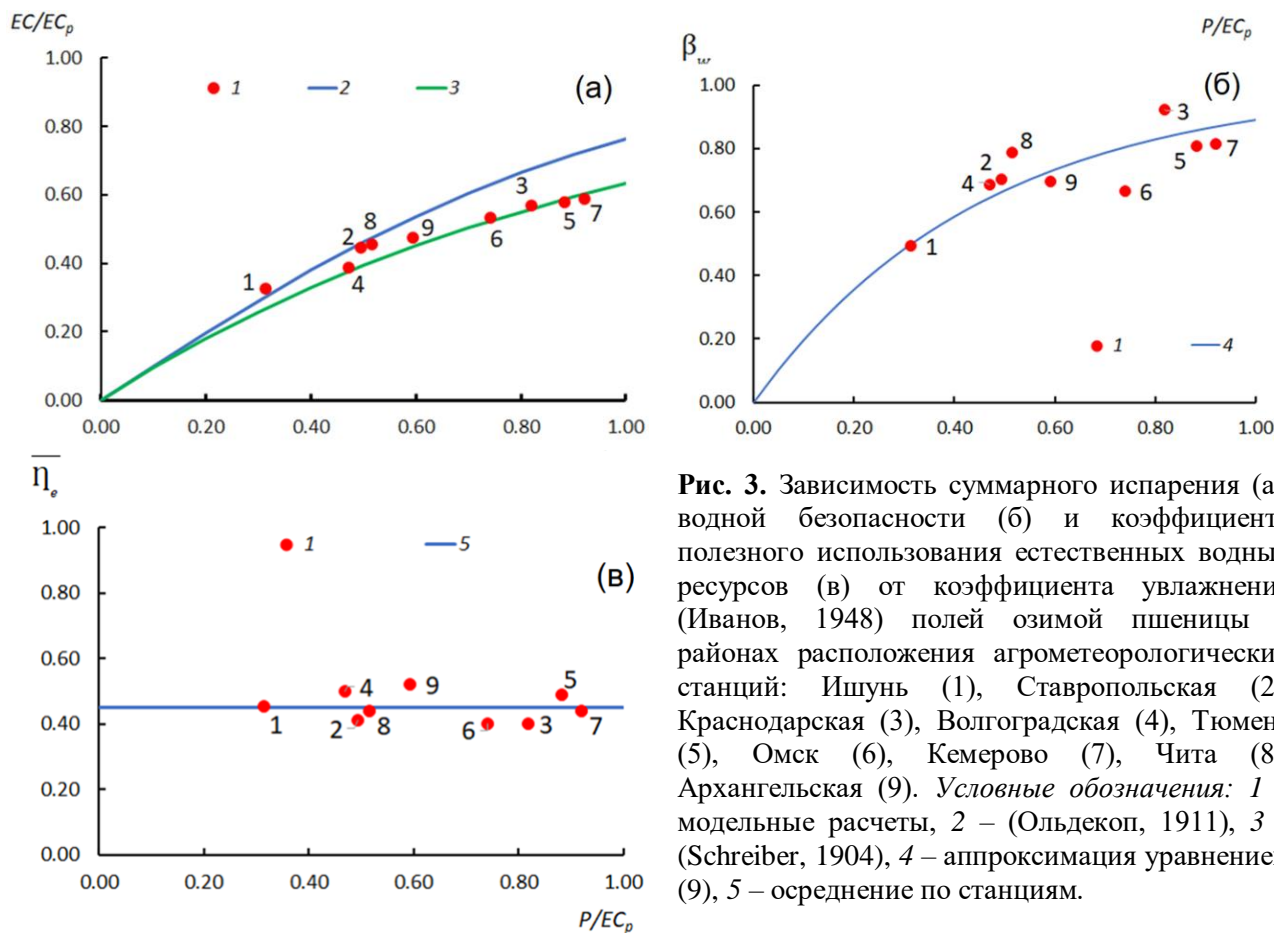


Рис. 3. Зависимость суммарного испарения (а), водной безопасности (б) и коэффициента полезного использования естественных водных ресурсов (в) от коэффициента увлажнения (Иванов, 1948) полей озимой пшеницы в районах расположения агрометеорологических станций: Ишунь (1), Ставропольская (2), Краснодарская (3), Волгоградская (4), Тюмень (5), Омск (6), Кемерово (7), Чита (8), Архангельская (9). Условные обозначения: 1 – модельные расчеты, 2 – (Ольдекоп, 1911), 3 – (Schreiber, 1904), 4 – аппроксимация уравнением (9), 5 – среднение по станциям.

Полученные результаты показывают, что все исследованные районы в той или иной мере действительно испытывают недостаток увлажнения, в связи с чем требуется повышение водной безопасности их агроэкосистем, которое, как отмечалось во Введении, может осуществляться либо за счет привлечения дополнительных водных ресурсов (на основе применения орошения), либо путем рационализации использования имеющихся естественных ресурсов.

Последний вариант основан на изменении соотношения между составляющими суммарного испарения за счет снижения непродуктивного испарения воды почвой и повышения доли транспирации. Подобное регулирование потоков суммарного испарения можно осуществить, например, с помощью такого приема как поверхностное покрытие почвы мульчей для её защиты и улучшения свойств. Роль мульчи могут выполнять самые разнообразные (как природные органические, так и искусственные неорганические), измельчённые до определённых размеров материалы. Но повышение транспирации требует наличия резервов в суммарном испарении, т.е. необходимо оценить, насколько велика доля непродуктивного испарения в EC , которое можно перевести в продуктивное испарение ET . Это можно сделать на основе анализа коэффициента полезного использования агроэкосистемой естественных водных ресурсов η_e , приведенного в таблице 2.

Указанный коэффициент изменяется по агрометеорологическим станциям от 0.40 до 0.51 (табл. 2), не имея при этом значимой зависимости от коэффициента увлажнения агроэкосистемы k_y (рис. 3в). Полученные оценки η_e согласуются с результатами, проведенными и в других

исследованиях, связанных с анализом влагообеспеченности зерновых культур в РФ (Никитишен, Личко, 2010; Шатилов и др. 2004; Шумова, 2010а; Гусев, 2012).

Показатель $1 - \Gamma_e$ определяет долю непродуктивного испарения. Как следует из полученных в настоящем исследовании результатов, а также из указанных литературных источников, эта доля составляет более половины годового суммарного испарения. Основная часть непродуктивного испарения складывается из испарения воды почвой весной перед наступлением активной вегетации посевов, а также в конце лета и осенью после уборки урожая, когда значительная часть поверхности полей представляет собой почти оголенную почву. Но даже в краткосрочный период активной вегетации, когда значения LAI посева зерновых максимальны (~ 3.5-4.5) и, соответственно, максимальна сомкнутость растительного покрова, $1 - \Gamma_e$ не опускается ниже 0.2-0.3 (Доброхотов, 2022).

Таким образом, можно прийти к выводу, что для посевов зерновых в районах выбранных агрометеорологических станций имеются принципиальные возможности повышения показателя их водной безопасности за счет перевода части характерного для агроэкосистем значительного резерва непродуктивного испарения в продуктивное (транспирацию).

Выводы

1. Рассмотрение с биотермодинамических позиций роли транспирации в растительном покрове суши позволило предложить варианты количественной оценки таких категорий как показатель водной безопасности агроэкосистемы, риск дефицита ее влагообеспеченности, риск недобора урожая, обусловленного отклонением динамики водного режима агроценоза от оптимальной. Предложенные варианты оценки таких характеристик основаны на данных о реальных и потенциальных значениях годовой транспирации агроэкосистемы.

2. Разработана методика оценки указанных характеристик агроценозов на основе использования модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP, стандартной метеорологической информации и данных о гидрофизических параметрах почвы.

3. Для ряда агрометеорологических станций, расположенных на степных и лесостепных территориях зернового пояса России, для исторического периода с 1977 по 2023 гг. с суточным шагом проведены многолетние расчеты составляющих водного баланса (включающих в себя и составляющие суммарного испарения) посевов озимой пшеницы в богарных условиях при использовании традиционных технологий пахотного земледелия.

4. Полученные ряды указанных характеристик водного режима сельскохозяйственных полей позволили для посевов озимой пшеницы в районах выбранных агрометеорологических станций рассчитать показатель водной безопасности агроценозов, риск дефицита их влагообеспеченности, коэффициент полезного использования агроценозом естественных водных ресурсов, риск недобора урожая, обусловленного недостаточностью влагообеспеченности посевов.

5. Указанные характеристики отражают современное состояние зерновых агроэкосистем в основных зернопроизводящих регионах страны, демонстрируя напряженность ситуации с их водной безопасностью, требующей принятия мер по повышению безопасности.

Настоящая публикация – первый этап исследований авторов, связанных с разными аспектами проблемы водной безопасности зерновых агроэкосистем РФ. Следующие публикации будут посвящены возможностям повышения водной безопасности указанных агроценозов на основе стратегии «зеленого земледелия», оценке повышения рисков дефицита их влагообеспеченности, обусловленных возможным изменением климата, а также результатам подобных исследований для других зерновых экосистем, в частности, для яровой пшеницы, которая в сибирских регионах предпочтительнее озимой.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 госзадания Института водных проблем РАН «Исследования процессов формирования качества поверхностных и подземных вод, природных и антропогенных механизмов изменения экологического состояния водных объектов, разработка методов и технологий управления водными ресурсами и качеством вод».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

АгроНовости. 2024. В Омской области и Алтайском крае аграрии приступили к уборке озимых культур
АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2025, том 31, № 3 (104)

- [Электронный ресурс <https://agro-bursa.ru/gazeta/obzor-rynka-zerna/2024/08/05/obzor-rynka-zerna-pshenicy-muki.html> (дата обращения 05.02.2025)].
- Ананьева Л.М., Самарина Н.Н.* 1986. Структура радиационно-теплового баланса естественных и природно-антропогенных геосистем лесостепи // Геосистемный мониторинг. М.: Институт географии АН СССР. С. 35-45.
- Балашов В.В., Лёвкин В.Н., Агафонов А.К.* 2011. Урожайность сортов озимой пшеницы на светло-каштановых почвах Волгоградской области // Научно-агрономический журнал. № 2 (89). С. 11-14.
- Бойко Е.С., Василько В.П.* 2020. Урожайность озимой пшеницы в центральной зоне Краснодарского края в зависимости от цикличности погодных условий // Научный журнал КубГАУ. № 163. С. 1-13.
- Будаговский А.И.* 1989. Основы методики расчета оросительных норм и режимов орошения // Водные ресурсы. № 1. С. 38-48.
- Вериго С.А., Разумова Л.А.* 1973. Почвенная влага. Л.: Гидрометеиздат. 328 с.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. 2025 [Электронный ресурс <http://mete.ru> (дата обращения 07.02.2025)].
- Гусев Е.М.* 1990. Экологическая роль почвенных вод и их ресурсы // Водные ресурсы. № 5. С. 110-121.
- Гусев Е.М.* 2012. Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчеты. Saarbrücken: PalmariumAcad. Publ. 116 с.
- Гусев Е.М., Бусарова О.Е.* 1998. Моделирование динамики относительной площади листьев злаковых культур // Метеорология и гидрология. № 1. С. 100-107.
- Гусев Е.М., Джозган Л.Я.* 2019. Мульчирование как важный элемент стратегии использования ресурсов естественного увлажнения в агроэкосистемах степного Крыма // Почвоведение. № 3. С. 348-354.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н.* 2010. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука. 328 с.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джозган Л.Я.* 2006. Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Водные ресурсы. Т. 33. № 2. С. 133-145.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э.* 2024. Сценарное прогнозирование изменения влагообеспеченности экосистем Степного Крыма в XXI веке // Аридные экосистемы. Т. 30. № 1 (98). С. 3-21. [*Gusev E.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E.* 2024. Scenario Projecting of Changes in Water Availability for Ecosystems in the Steppe Crimea in the 21st Century // Arid Ecosystems. Vol. 14. No. 1. P. 1-16.]
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Моханти Б.П.* 2004. Оценка радиационного, теплового и водного обмена степных экосистем с атмосферой на основе модели SWAP // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 40. № 3. С. 330-346.
- Джозган Л.Я.* 1990. Испарение с орошаемых полей Средней Азии. М.: Наука. 86 с.
- Доброхотов А.В.* 2022. Пространственное распределение составляющих энергетического баланса растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли и стандартных метеорологических измерений. Автореф. ... канд. биол. наук. СПб.: Агрофизический научно-исследовательский институт. 21 с.
- Дридигер В.К., Белобров В.П., Антонов С.А., Юдин С.А., Гаджиумаров Р.Г., Лиходиевская С.А., Ермолаев Н.Р.* 2020. Защита почв от водной эрозии и дефляции в технологии NO-TILL // Земледелие. № 6. С. 11-17.
- Иванов Н.Н.* 1948. Ландшафтно-климатические зоны земного шара. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 224 с.
- Измаилова Д.С.* 2021. Совершенствование агротехнических приемов весенне-летнего периода формирования урожайности и качества зерна озимой твердой пшеницы в Крыму. Дис. ... канд. с/х наук. Симферополь. 181 с.
- Информер. 2022. В Крыму продолжается уборка зерновых [Электронный ресурс <https://ruinformer.com/page/v-krymu-prodolzhaetsja-uborka-zernovyh?ysclid=15iftg1ln5141395190> (дата обращения 20.01.2025)].
- Климова Е.Н.* 2023. Агрометеорологические условия начала вегетационного периода 2023 года в Забайкалье [Электронный ресурс <https://zabgidromet.ru/news/agrometeorologicheskie-usloviya-nachala-vegetacionnogo-perioda-2023-goda-v-zabajkale/> (дата обращения 18.01.2025)].
- Козлов В.Е., Пономаренко В.И., Мусинов К.К., Сурначёв А.С.* 2022. Семилетняя динамика количественных признаков сортов озимой мягкой пшеницы в условиях богары лесостепи Западной Сибири // Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. Т. 8. № 4. С. 332-343.
- Лархер В.* 1978. Экология растений. М.: Мир. 384 с.
- Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. 2020. В Бурятии урожайность зерновых возросла на 15% [Электронный ресурс <https://mcx.gov.ru/press-service/regions/v-buryatii-urozhaynost-zernovykh-vozroslo-na-15/?ysclid=m5wh8cxf1531179707> (дата обращения 06.02.2025)].
- Никитишин В.И., Личко В.И.* 2010. О взаимосвязи потребления растениями влаги и элементов минерального питания // Проблемы агрохимии и экологии. № 4. С. 3-8.
- Ольдекоп Э.М.* 1911. Об испарении с поверхности речных бассейнов. Метеорологическая обсерватория Императорского Юрьевского университета. Т. IV. 209 с.
- Павлова В.Н., Варчева С.Е.* 2017. Оценка климатических рисков при производстве зерновых культур в

- Приволжском федеральном округе // *Агрофизика*. № 2. С. 1-8.
- Пакишина С.М., Ториков В.Е., Малявко Г.П., Мельникова О.В. 2015. Особенности функциональной зависимости урожайности зерновых культур от транспирации // *Вестник ФГОУ ВПО Брянская ГСХА*. № 5. С. 24-30.
- Полуэктон Р.А. 1991. Динамические модели агроэкосистемы. Л.: Гидрометеиздат. 312 с.
- Пригожин И. 1960. Введение в термодинамику неравновесных процессов. М.: Изд-во иностранной литературы. 127 с.
- Разумова Л.А., Мещанинова Н.Б. 1978. Составление агрометеорологических расчетов и прогнозов оптимальных сроков и норм полива кукурузы. Методические указания. Л.: Гидрометеиздат. 38 с.
- Рюмишин А. 2021. В Республике Крым стартовала уборочная кампания озимых зерновых культур – 2021 [Электронный ресурс <https://crimea-news.com/economy/2021/06/21/806450.html> (дата обращения 19.02.2023)].
- Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. 2012. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*. Вып. 565. С. 132-151.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2022 / Ред. В.М. Катцов. СПб.: Научно-технические технологии. 676 с.
- Урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Крым. Симферополь: Крымстат. 2019. 58 с.
- Федеральная служба государственной статистики. 2025. Информационно-аналитические материалы. Бюллетени о состоянии сельского хозяйства [Электронный ресурс <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения 18.02.2025)].
- Хохлов Н.В. 2001. Управление риском. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 239 с.
- Чернявская А.В., Панина Д.Д. 2015. Анализ урожайности зерновых культур в Ставропольском крае // *Экономика и социум*. № 6-3 (19). С. 1326-1329.
- Шатилов И.С. 1978. Водопотребление и транспирация растений в полевых условиях. Математические модели программирования. М.: Колос. С. 62-63.
- Шатилов И.С., Замараев А.Г., Духанин Ю.А., Чаповская Г.В., Савич В.И., Замараев А.А., Шаров А.Ф., Исмагилова Н.Х. 2004. Энергомассообмен в звене полевого севооборота. Ч. 1: Оптимальные параметры системы почва–растение на дерново-подзолистых почвах с целью получения высоких устойчивых урожаев полевых культур. М.: Агроконсалт. 366 с.
- Шумова Н.А. 2010. Закономерности формирования водопотребления и водообеспеченности агроценозов в условиях юга Русской равнины. М.: Наука. 239 с.
- Шумова Н.А. 2010. Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность агроценозов в условиях юга Русской равнины. Автореф. ... док. геогр. наук. Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет. 43 с.
- ASM-AGRO. 2023. Уборка озимых культур: особенности и сроки [Электронный ресурс https://asm-agro.ru/articles/uborka-ozimyh/?utm_source=pinterest&utm_campaign=01_11_2024 (дата обращения 21.02.2025)].
- Boone A., Habets F., Noilhan J., Clark D., Dirmeyer P., Fox S., Gusev Y., Haddeland I., Koster R., Lohmann D., Mahanama S., Mitchell K., Nasonova O., Niu G.-Y., Pitman A., Polcher J., Shmakin A.B., Tanaka K., van den Hurk B., Verant S., Verseghy D., Viterbo P., Yang Z.-L. 2004. The Rhone-aggregation Land Surface Scheme Intercomparison Project: An Overview // *Journal of Climate*. Vol. 17. P. 187-208.
- Caretta M.A., Mukherji A., Arfanuzzaman M., Betts R.A., Gelfan A., Hirabayashi Y., Lissner T.K., Liu J., Gunn E.L., Morgan R., Mwanga S., Supratid S. 2022. Ch. 4: Water // *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / eds. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama. Cambridge, NY: Cambridge University Press. P. 551-712.
- Clapp R.B., Hornberger G.M. 1978. Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties // *Water Resources Research*. Vol. 14. No. 4. P. 601-604.
- Cosby B.J., Hornberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R. 1984. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils // *Water Resources Research*. V. 20. No. 3. P. 682- 690.
- Dorigo W., Himmelbauer I., Aberer D., Schremmer L., Petrakovic I., Zappa L., Preimesberger W., Xaver A., Annor F., Ardö J., Baldocchi D., Bitelli M., Blöschl G., Bogen H., Brocca L., Calvet J.-C., Camarero J. J., Capello G., Choi M., Cosh M.C., van de Giesen N., Hajdu I., Ikonen J., Jensen K. H., Kanniah K.D., de Kat I., Kirchengast G., Kumar Rai P., Kyrouac J., Larson K., Liu S., Loew A., Mghaddam M., Martinez Fernandez J., Mattar Bader C., Morbidelli R., Musial J.P., Osenga E., Palecki M.A., Pellarin T., Petropoulos G.P., Pfeil I., Powers J., Robock A., Rüdiger C., Rummel U., Strobil M., Su Z., Sullivan R., Tagesson T., Varlagin A., Vreugdenhil M., Walker J., Wen J., Wenger F., Wigneron J.P., Wood M., Yang K., Zeng Y., Zhang X., Zreda M., Dietrich S., Gruber A., van Oevelen P., Wagner W., Scipal K., Drusch M., Sabia R. 2021. The International Soil Moisture Network: Serving Earth System Science for over a Decade // *HESS*. Vol. 25. No. 11. P. 5749-5804.

- Global Water Security: Lessons Learnt and Long-Term Implications. 2018. Singapore: World Water Council. 299 p.
- Grey D., Sadoff C.W. 2007. Sink or Swim? Water Security for Growth and Development // Water Policy. Vol. 9. P. 545-571.
- Gusev Y.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N. 2018. Modelling the Impact of Mulching the Soil with Plant Remains on Water Regime Formation, Crop Yield and Energy Costs in Agricultural Ecosystems // Proc. IAHS. Vol. 376. P. 77-82.
- Gusev Ye., Novak V. 2007. Soil Water – Main Water Resources for Terrestrial Ecosystems of the Biosphere // Journal of Hydrology and Hydromechanics. Vol. 55. No. 1. P. 3-15.
- Liang X., Wood E.F., Lettenmaier D.P., Lohmann D., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Desborough C., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Ye.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.-c. 1998. The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas River Basin Experiment. Ch. 2: Spatial and Temporal Analysis of Energy Fluxes // Global and Planetary Change. Vol. 19. No. 1-4. P. 137-159.
- Lohmann D., Lettenmaier D.P., Liang X., Wood E.F., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Desborough C., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Ye.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.-c. 1998. The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas River Basin Experiment. Ch. 3: Spatial and Temporal Analysis of Water Fluxes // Global and Planetary Change. Vol. 19. No. 1-4. P. 161-179.
- Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R.A. 2003. Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // Journal of Climate. Vol. 16. P. 1261-1282.
- Nature-Based Solutions for Water. 2018 // The United Nations World Water Development Rep. Paris: UNESCO. 139 p.
- Sadoff C.W., Grey D., Borgomeo E. 2020. Water Security // Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. NY: Oxford University Press. 19 p.
- Schlosser C.A., Slater A., Robock A., Pitman A.J., Vinnikov Ya., Henderson-Sellers A., Speranskaya N.A., Mitchell K., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P., de Rosnay P., Desborough C.E., Dickinson R.E., Dai Y.-J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Y.M., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E.A., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Shmakin A.B., Smirnova T.G., Verseghy D.L., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.L. 2000. Simulations of a Boreal Grassland Hydrology at Valdai, Russia: PILPS Phase 2(d) // Monthly Weather Review. Vol. 128. No. 2. P. 301-321.
- Schreiber P. 1904. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa // Meteorologische Zeitschrift No. 21 (10). P. 441-452.
- Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. 2010. Paris: OECD Publ. 120 p.
- UN-Water. Water Security & the Global Water Agenda. 2013. A UN-Water Analytical Brief. Tokyo: United Nations University. 39 p.
- Water Security Framework. Water Aid. 2012. London. 60 p.
- World Water Council. Water Security for All – Policy Recommendations. 2018. Singapore: Springer. 279 p.
- Wood E.F., Lettenmaier D.P., Liang X., Lohmann D., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Ye.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.-c. 1998. The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas River Basin Experiment. Ch. 1: Experiment Description and Summary Intercomparisons // Global and Planetary Change. Vol. 19. No. 1-4. P. 115-135.