

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 02/504:631.432+631/635+631.6.02+556.18

ВОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТЕПНОГО КРЫМА И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ¹

© 2022 г. Е. М. Гусев^а, *, Л. Я. Джоган^а, О. Н. Насонова^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Проведен анализ состояния водной безопасности Степного Крыма. Показано, что водная безопасность в основном определяется влагообеспеченностью посевов сельскохозяйственных культур, прежде всего зерновых, выращиваемых в данном регионе. Показано, что основная составляющая водных ресурсов в Степном Крыму – ресурсы почвенных вод. Проведен анализ возможных стратегий повышения влагообеспеченности агроценозов и эффективности использования ресурсов почвенных вод Степного Крыма. Показано, что основная стратегия повышения влагообеспеченности агроэкосистем в регионе – стратегия развития “зеленого земледелия”, основанного на рациональном использовании природных ресурсов за счет ориентации при разработке технологий природопользования на природоподобные (“nature-based”) процессы, в частности – на использование “no-till”-технологии минимальной обработки почвы с мульчированием ее поверхности растительными остатками.

Ключевые слова: ресурсы почвенных вод, влагообеспеченность, озимая пшеница, “зеленое земледелие”, “no-till”-технология, мульчирование.

DOI: 10.31857/S0321059622040071

ВВЕДЕНИЕ

Крым в целом и Степной Крым в частности – наиболее вододефицитные регионы Российской Федерации. При этом состояние необходимых для производства сельскохозяйственной продукции энергетических (поступающей солнечной радиации) и почвенных ресурсов Степного Крыма довольно хорошее. Степной Крым был и остается важнейшим производителем сельскохозяйственной продукции, особенно зерновой. Поэтому проблемы водной безопасности Степного Крыма в первую очередь определяются проблемами влагообеспеченности его сельскохозяй-

ственных экосистем. Поддержанию урожайности агроценозов данного региона на достаточном уровне мешает сильная степень аридности его территории, обусловленная ограниченностью водных ресурсов. Вызванный природными условиями дефицит водных ресурсов Степного Крыма усугубляется крайней неэффективностью их использования: неоптимальным режимом использования имеющихся в регионе естественных водных ресурсов (приходящих осадков); безвозвратными потерями воды в сельском хозяйстве, нередко приводящими к деградации почв; отсутствием надежных оценок водопотребления агроценозами; а главное, практически отсутствием понимания неизбежности осуществляемого в мире закономерного и физически обоснованного перехода от стратегии применения традиционных агротехнологий, направленных на получение сиюминутной прибыли, к стратегии, ориентированной на технологии рационального использования природных ресурсов (включая водные). В связи с этим цель данного исследования – оценка масштабов проблем, связанных с влагообеспеченностью агроценозов Степного Крыма, и анализ возможных путей их решения.

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН ((тема № 0126-2021-0001, государственная регистрация № 121040700170-9) “Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма” (раздел статьи “Возможные пути повышения влагообеспеченности агроэкосистем Степного Крыма в целях увеличения степени водной безопасности региона”), тема № FMWZ-2022-0001 “Исследования процессов гидрологического цикла суши и формирования водных ресурсов, геофизических процессов в водных объектах и их бассейнах, формирования экстремальных гидрологических явлений и динамики гидрологических систем с учетом изменяющихся климатических условий и антропогенных факторов” (все разделы статьи, кроме вышеуказанного)).



Рис. 1. Районирование Крыма. Равнинная, или степная, зона (I), горная зона (II), югобережная зона (III), Керченская грядово-холмистая зона (IV) [38].

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ, ПОЧВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТЕПНОГО КРЫМА

С точки зрения геоморфологии и ландшафтного районирования, территория Крымского п-ова делится на несколько зон. На рис. 1 показано, что ~70% территории Крыма занимает именно равнинный (или степной) Крым, расположенный в северной части полуострова. Степной Крым представляет собой плоскую равнину, увязанную с эпигерцинской Скифской платформой, а с поверхности сложенную морскими неогеновыми и континентальными четвертичными отложениями.

Климат Степного Крыма умеренно континентальный с продолжительным и жарким летом и короткой мягкой зимой [20]. Такие климатические условия обусловлены тем, что для проникающих на территорию Степного Крыма воздушных масс практически нет никаких препятствий. В результате на большей части Степного Крыма климат умеренно жаркий засушливый, а в северных районах очень сухой.

Важный положительный фактор Степного Крыма — наличие значительных энергетических ресурсов, обусловленных поступающей солнечной радиацией и создающих необходимое условие для потенциально высокой первичной фотосинтетической продуктивности растительного покрова. В настоящее время среднемноголетнее (усредненное за период 1971–2005 гг.) значение приходящего коротковолнового (солнечного) излучения R_h для Степного Крыма ~137 Вт/м² [23]. Для сравнения, в московском регионе (~56° с.ш.) R_h ~ 96 Вт/м², в районе Воронежской области (~52° с.ш.) R_h ~ 110 Вт/м². А в Краснодарском крае (~45° с.ш.), находящемся примерно на одной ши-

роте с географическим центром Крымского п-ова (также ~45° с.ш.), R_h ~ 132 Вт/м², т. е. значение R_h в районе Степного Крыма близко к значению R_h на Кубани.

Хуже обстоит дело со второй составляющей природных ресурсов, обеспечивающих продуктивность естественных экосистем и агроценозов в степной части Крыма, — водными ресурсами. Степной Крым отличается значительной недостаточностью и неустойчивостью ресурсов естественного увлажнения. Годовые суммы осадков в целом по степному региону 300–400 мм.

В итоге в Степном Крыму коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову (отношение выпадающих за год осадков к годовому потенциальному испарению) [17] $KУ < 0.6$ [1]. Такое значение $KУ$ свойственно территориям умеренно-недостаточного (неустойчивого) увлажнения — сухим степям, сухим саваннам.

Неустойчивость естественного увлажнения Степного Крыма часто приводит к таким отрицательным с точки зрения человека климатическим явлениям, как засухи и суховеи, что сказывается в определенной мере на режиме вегетации естественной растительности и причиняет существенный ущерб агроценозам.

Что касается почвенного покрова, то в Степном Крыму преобладают черноземы южные, а также каштановые почвы, сформировавшиеся на лессовидных породах возвышенной волнистой равнины [14, 25, 26]. Несмотря на происходящие в указанном регионе (впрочем, как и в большинстве других регионов мира) процессы деградации почвенного покрова [13, 15], почвы Степного Крыма по их водно-физическим свойствам и уровню плодородия довольно благоприятны для выращивания сельскохозяйственных культур [16].

Содержание гумуса в пахотном слое в среднем ~3%, а на целинных землях доходит до 4%.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО СТЕПНОГО КРЫМА

На основе сказанного выше можно сделать вывод о том, что состояние необходимых для производства сельскохозяйственной продукции энергетических (поступающей солнечной радиации) и почвенных ресурсов Степного Крыма довольно хорошее. Проблема заключается только в ограниченности водных ресурсов. Несмотря на это обстоятельство, Крым был и продолжает оставаться производителем сельскохозяйственной продукции.

Сельское хозяйство Крыма – одна из важнейших отраслей его экономики. На нее приходится ~17% валового регионального продукта региона [35]. Сельхозугодья занимают ~69% территории Крыма (большая их часть находится в Степном Крыму, где сельское хозяйство – главная отрасль). В их структуре: пашня ~71, многолетние насаждения ~4, сенокосы и пастбища ~25% [19].

Первое место в структуре посевных площадей занимает пшеница (~40% всех посевных площадей региона), затем ячмень (~28), подсолнечник (~12), зернобобовые культуры (3%) [34]. Таким образом, основа сельского хозяйства Крыма – это прежде всего зерновые. Его степная часть, благодаря климату и качеству почв, особенно благоприятна для выращивания озимой пшеницы.

При этом надо отметить следующее обстоятельство. Являясь одним из основных экспортеров пшеницы в мире, Россия, тем не менее, импортирует пшеницу из Казахстана, производящего пшеницу твердых сортов, произрастанию которых способствуют климатические условия страны. Мука твердой пшеницы ценится в производстве макаронных изделий, а также при выработке манной крупы и муки-крупчатки. Но твердым сортам нужен сухой воздух. Лучшее всего такая пшеница растет в местности с хорошо выраженным континентальным климатом [28]. В Российской Федерации районов, в которых климатические условия способствуют производству твердой пшеницы, не так много. Один из таких районов – Степной Крым.

Таким образом, Степной Крым – важный сельскохозяйственный регион Российской Федерации. Главная же его проблема – слабая обеспеченность водными ресурсами, влекущая за собой проблему его водной безопасности. Рассмотрим проблему водных ресурсов Крыма в целом, подойдя к такому анализу не с общепринятых антропоцентрических водохозяйственных позиций [2, 36, 45], а на основе экологической биосферной концепции, которая дает более широкий взгляд

на указанную проблему и обеспечивает нестандартные пути ее решения, направленные на перспективу устойчивого развития человеческой популяции с учетом рационального использования биосферных ресурсов.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СУШИ В ЦЕЛОМ, РЕСУРСЫ ПОЧВЕННЫХ ВОД И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ

Указанная концепция заключается в следующем. В [5, 6, 53] показано, что в процессе эволюции жизни на Земле произошло сопряжение двух глобальных циркуляционных диссипативных структур, двух гигантских “шестеренок”: физической циркуляции воды в системе почва – растительный покров – атмосфера (СПРА) и циркуляции биоэлементов в экосистемах наземных растений. Без этого сопряжения невозможно приведение в действие онсагеровских круговоротов биоэлементов в системе зеленых растений суши. Поскольку зеленые растения представляют собой начальное звено трофической цепи наземных экосистем, циркуляция воды в СПРА, уносящая производимую растительным покровом в процессе его вегетации энтропию, по существу “раскручивает” круговорот биоэлементов во всей системе биоценозов суши, т. е. жизнь на планете.

Отсюда следует, что диссипативная структура циркуляции воды в СПРА – необходимый экологический ресурс (названный ресурсом почвенных вод), используемый биоценозами суши. Впервые введенной А.И. Будаговским [3] мерой ресурсов почвенных вод, т. е. показателем, характеризующим потенциальную мощность используемой биосферой циркуляции воды в СПРА, может служить величина суммарного испарения с рассматриваемой территории суши за характерный промежуток времени, например за год.

Рассмотренный подход дает возможность ввести такой показатель, как коэффициент полезного использования (коэффициент эффективности) ресурсов почвенных вод растительным покровом η_e [3]. Полезная – продуктивная – часть суммарного испарения – ее составляющая, связанная с потоком воды через устьица растений – транспирация. Поэтому в качестве η_e может выступать отношение транспирации E_T к суммарному испарению E :

$$\eta_e = E_T / E. \quad (2)$$

Кроме того, можно ввести еще один полезный показатель, отражающий степень влагообеспеченности растительного покрова – η_w [3], определяемый как

$$\eta_w = E_T / EP_T, \quad (3)$$

где EP_T – так называемая потенциальная транспирация, т. е. транспирация растительного покрова в условиях достаточного увлажнения, когда значение E_T не лимитируется влажностью почвы, регулирующей степень открытости устьиц листьев, и имеет максимальное при конкретных метеорологических условиях значение (устьица листьев в этом случае максимально открыты).

Структура циркуляции воды в СПРА – составная часть более общей диссипативной системы гидрологического цикла суши. В этой системе можно выделить еще две крупномасштабные структуры: циркуляция воды в системе: атмосфера – поверхность суши – водоток – водоем – атмосфера; циркуляция воды в системе: атмосфера – поверхность суши – грунтовые воды – водоем – атмосфера. Интенсивности циркуляции воды в каждой из указанных структур определяют и меры водных ресурсов этих структур – величины стока соответственно поверхностных и подземных вод. Все три структуры связаны между собой. Руслонная сеть может дренировать грунтовые воды, а может способствовать дополнительному питанию подземных водных горизонтов. Грунтовые воды могут подпитывать корнеобитаемый слой почвы. Соответственно, это влечет за собой и взаимный обмен ресурсов поверхностных, подземных и почвенных вод.

Ресурсы всех составляющих вод суши связаны при данном подходе одной методологической основой – они определяются на основе интенсивности потоков воды в соответствующей диссипативной структуре, поскольку интенсивность непрерывных жизненных процессов на Земле поддерживается только такими ресурсами, которые также имеют непрерывный и возобновляемый характер. В этом смысле всякого рода мгновенные “запасы” ресурсами не являются. Они служат характеристиками состояния элементов, образующих соответствующую диссипативную структуру, позволяя оценивать возможности регулирования временной динамики ее ресурса. Конечно, в более узком смысле “запасы” каких-либо субстанций можно трактовать в качестве “ресурса” для кратковременного, разового его использования, но отнюдь не как ресурса, обеспечивающего непрерывность жизни на Земле.

Циркуляция воды в указанных структурах в конечном итоге поддерживает непрерывную циркуляцию биоэлементов суши. Поэтому их и можно рассматривать в качестве биосферных ресурсов. В большей степени это относится к почвенным водам, поскольку они приводят в движение самое мощное звено в циркуляции биоэлементов наземных экосистем – звено зеленых растений суши. Поверхностные и подземные воды (воды рек, озер, болот, водохранилищ, артезианские воды и т. д.) в этом смысле имеют меньший коэф-

фициент полезного действия. Однако в силу большой концентрации водных масс эти воды удобны для использования более сложными, с большей пространственной локализацией и более мощным метаболизмом биологическими структурами, такими, например, как животные и человек. Тем не менее подчеркнем, что в настоящее время ~65% так называемых “безвозвратных потерь” стока, т. е. изымаемых человеком ресурсов поверхностных и подземных вод, используются в сельском хозяйстве, прежде всего в орошаемом земледелии [18].

Это означает, что человеческой популяции на определенном этапе ее существования оказалось более удобным поддерживать свой гомеостазис, потребляя ресурсы поверхностных и отчасти подземных вод с переводом их в ресурсы почвенных вод. Однако удобство или в каком-то смысле “выгодность” определенного пути использования ресурсов с точки зрения части системы (человеческая популяция представляет собой часть биосферы в целом) вовсе не означает “выгодность” этого пути с позиций всей системы. В данном случае искусственное изменение эволюционно сложившихся структур общей циркуляции вод суши скорее всего невыгодно биосфере в целом с точки зрения минимизации общего производства энтропии в ней [22], поскольку увеличение и постоянное поддержание упорядоченности создаваемых новых структур (в частности, структур мелиоративных систем), влекущее за собой локальное уменьшение энтропии в месте расположения этих структур, “обусловлено тем, что где-то в другом месте порождается еще большая неупорядоченность” [46]. Последнее обстоятельство – простое следствие второго начала термодинамики.

На основе изложенной концепции водных ресурсов перейдем к рассмотрению водных ресурсов Крыма.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КРЫМА

В Крыму очень напряженный водный баланс. Ресурсы естественного увлажнения, т. е. приходная статья водного баланса, – среднесуточные за период 1881–2018 гг. осадки – составляют ~520 мм/год (или с учетом площади полуострова ~14 км³/год) [21]. Среднесуточный речной сток Крыма составляет ~1 км³/год [29]. Эта величина примерно поровну разделена между поверхностным стоком и дренирующимися подземными водами [29]. Таким образом, сумма ресурсов поверхностных и подземных вод Крыма составляет ~7% ресурсов естественного увлажнения (осадков). Такой низкой относительной величины ресурсов поверхностных и подземных вод нет ни в одном другом регионе страны. Зато ресурсы почвенных вод составляют 93% ресурсов

Таблица 1. Сравнительная балансовая оценка составляющих водных ресурсов всей суши, Российской Федерации и Республики Крым, мм/год (% от осадков)

Составляющие водных ресурсов (составляющие водного баланса)	Вся суша	Российская Федерация	Республика Крым
Ресурсы естественного увлажнения (осадки)	834 (100)	548 (100)	516 (100)
Ресурсы поверхностных вод (поверхностный сток)	204 (24)	190 (35)	19 (4)
Ресурсы подземных вод (подземный сток)	90 (11)	47 (8)	18 (3)
Сумма ресурсов поверхностных и подземных вод (речной сток)	294 (35)	237 (43)	37 (7)
Ресурсы почвенных вод (суммарное испарение)	540 (65)	311 (57)	479 (93)

естественного увлажнения. Для сравнения приведены различные составляющие водных ресурсов суши в целом, Российской Федерации и Республики Крым (табл. 1) по данным из [21, 29].

Как видно из табл. 1, в силу климатических условий относительные величины ресурсов поверхностных и подземных вод в Российской Федерации, как и следовало ожидать, больше, чем для суши в целом, а ресурсы почвенных вод гораздо меньше. В то же время для Крыма ситуация значительно отличается от ситуаций как для суши в целом, так и для России. Как отмечено выше, крайне скудны ресурсы поверхностных и подземных вод и значительна относительная величина ресурсов почвенных вод (что, правда, не означает хорошую водообеспеченность растительного покрова, поскольку она определяется соотношением водных и тепловых ресурсов территории, а в Крыму это соотношение далеко от оптимального).

Поскольку в Крыму ресурсы поверхностных и подземных вод крайне малы, решение проблемы водной безопасности, по крайней мере в области сельского хозяйства Крыма, связанной и с его продовольственной безопасностью, следует искать на пути рационального использования и оптимального управления ресурсами именно почвенных вод. В Степном Крыму ситуация с водными ресурсами не лучше, чем по Крыму в целом, поскольку, как указано выше, среднесуточные суммы осадков в Степном Крыму равны 300–400 мм/год, что с учетом его площади составляет 5.7–7.7 км³/год.

Таким образом, наиболее распространенный в сельском хозяйстве путь решения проблемы повышения водообеспеченности агроценозов, основанный на переводе части ресурсов поверхностных и подземных вод (речного стока) в ресурсы почвенных вод на основе применения орошения, в Степном Крыму невозможен. В этом регионе этих ресурсов просто нет. Подчеркнем еще раз, что имеющиеся в Крыму, как и во многих других регионах страны, не вовлеченные в го-

довой климатический круговорот запасы артезианских вод, согласно рассмотренной выше концепции ресурсов почвенных вод, ресурсами не являются.

Следует отметить, что какое-то время такой путь все же существовал и был связан с переброской ресурсов поверхностных и подземных вод (днепровской воды) из другого региона (Украины) с последующим их переводом посредством ирригации агроценозов Степного Крыма в ресурсы почвенных вод. Указанная переброска водных ресурсов соседнего региона осуществлялась на основе Северо-Крымского канала (СКК) (рис. 2). СКК – оросительно-обводнительный канал, построенный в 1961–1971 гг. общими усилиями СССР для обеспечения водой маловодных и засушливых территорий Херсонской и Крымской областей Украинской ССР с забором воды из специально построенного в нижнем течении Днепра Каховского водохранилища, заполненного в 1955–1958 гг. [33].

Ежегодно в Крым по СКК поступало в среднем 1.5–1.7 км³/год днепровской воды (напомним для сравнения, что ресурсы естественного увлажнения Степного Крыма составляют 5.7–7.7 км³/год). При этом 70–80% переброски водных ресурсов использовалось для нужд сельского хозяйства (орошения). С 2014 г. поступление днепровской воды в СКК перекрыто, приток воды на территорию Крымского п-ова практически прекратился. В результате орошаемые сельскохозяйственные площади Степного Крыма, а именно ирригация составляла основной способ обеспечения его водной безопасности, сократились на 94–95%. Таким образом, вариант обеспечения водной безопасности Степного Крыма (связанный с необходимой степенью водообеспеченности его агроценозов), в основу которого положен вариант переброски водных ресурсов соседнего региона, в настоящее время отсутствует. В 2022 г. появилась вероятность возобновления работы СКК. Тем не менее



Рис. 2. Картограмма СКК и орошаемых земель до 2014 г. [42].

даже этот факт не снимает с повестки дня проблему повышения водообеспеченности агроценозов Степного Крыма, что обуславливает необходимость поиска других путей решения указанной проблемы, альтернативных использованию ирригации.

Прежде чем рассматривать эти пути, необходимо количественно оценить показатели водообеспеченности агроценозов Степного Крыма, чтобы понять специфику требующей решения проблемы. Такая оценка проведена в данной работе на примере основной, как отмечено выше, зерновой культуры Степного Крыма – озимой пшеницы.

ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ОСНОВНОЙ ЗЕРНОВОЙ КУЛЬТУРЫ СТЕПНОГО КРЫМА – ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Объект исследования – посевы озимой пшеницы на четырех агрометеорологических станциях (Ишунь, Черноморское, Клепинино, Нижнегорск) в степной части Крымского п-ова (рис. 3). Физико-географические условия и характеристики почв в районах расположения станций описаны в [10]. Водообеспеченность и другие характеристики агроценозов оценивались для посевов, для возделывания которых применялась традиционная агротехнология, включающая в себя вспашку почвы с оборотом пласта, многократные проходы сельскохозяйственной техники по полю, применение минеральных (химических) удобрений

и ядохимикатов для защиты растений, уход за посевами [40].

В качестве основного инструмента оценки показателей водообеспеченности и урожайности посевов пшеницы использовалась разработанная авторами статьи физико-математическая модель формирования водного режима агроценозов MULCH [5, 10]. В [10] приведены результаты проверки работоспособности модели MULCH для условий Степного Крыма. Важные особенности модели – возможность отдельной оценки продуктивного испарения (транспирации) и его непродуктивной составляющей (остальной части суммарного испарения), а также возможность расчета динамики роста агроценоза в зависимости от его водно-теплового режима. В качестве входной информации использовались суточные значения метеорологических характеристик и характеристики почвенного покрова в районах расположения четырех указанных агрометеорологических станций за период 1970–1979 гг. Динамика относительной площади листьев пшеницы LAI и урожайность посевов Y рассчитывались с помощью модельного блока формирования LAI в модели MULCH, описанного в [5, 7, 8]. При этом единственным калибруемым параметром модели был корректирующий множитель для урожайности, оптимизируемый на основе известных данных по измеренным значениям Y . Для определения этого множителя использовались значения урожайности озимой пшеницы, приведенные в



Рис. 3. Расположение четырех агрометеорологических станций степного Крыма (серые кружки), данные наблюдений которых использованы в работе [10]. Черными кружками показаны столицы субъектов РФ в Крыму.

[43]. Полученные результаты частично представлены в [10].

В настоящей работе с целью получения обобщенных значений характеристик влагообеспеченности (коэффициента влагообеспеченности, коэффициента эффективности использования ресурсов почвенных вод, дефицита испарения, оросительной нормы и т.д.) и урожайности пшеницы по Степному Крыму в целом их рассчитанные значения для отдельных станций были усреднены по всему расчетному периоду и по всем станциям. Расчеты выполнены на примере озимой пшеницы для двух вариантов ее водного режима – богарного и в условиях орошения. По всей видимости, результаты расчетов без существенной погрешности будут справедливы и для посевов других зерновых культур, включенных в соответствующие севообороты на пахотных площадях Степного Крыма.

Представляет интерес сравнение объема затрачиваемой на орошение до 2014 г. воды, рассчитанного с использованием полученного на основе MULCH среднесуточного значения оросительной нормы для озимой пшеницы (~190 мм), с общим объемом орошения, полученным на основе анализа водного баланса суммарных водных ресурсов, входящих до 2014 г. в Крым с днепровской водой по СКК (рис. 2). Данные по различным составляющим водного баланса в разных литературных источниках несколько различаются, но в первом приближении такой анализ провести возможно.

Так, в 2013 г. – последнем году функционирования СКК – в Крым было поставлено ~1.6 км³ воды (включая и небольшую долю местных ис-

точников) [33, 41]. Из них общие транспортные потери в системе каналов на испарение и фильтрацию в подземные водоносные горизонты за год составили ~0.7 км³. Из оставшейся днепровской воды на орошение было подано ~0.68 км³ [12]. Большая часть ее пошла на обеспечение выращивания риса (~0.47 км³). В результате оставшаяся часть воды, израсходованная в 2013 г. на орошение других сельскохозяйственных культур, составила ~0.21 км³.

Если принять вышеприведенную рассчитанную на основе MULCH среднесуточную оросительную норму посевов пшеницы в Степном Крыму ~190 мм за оросительную норму посевов всех культур, то с учетом площади орошаемых сельскохозяйственных угодий, составляющей в 2013 г. ~125 тыс. га (за вычетом площадей, занятых под посевы риса), общий объем воды, израсходованной в 2013 г. на орошение других зерновых и кормовых культур (исключая рис), окажется равным ~0.23 км³.

Таким образом, видно, что проведенные на основе модели MULCH оценки оросительных норм озимой пшеницы в Степном Крыму (значения которых без значительной потери точности можно распространить и на другие зерновые культуры, исключая рис) можно признать достоверными. Данное обстоятельство, а также проведенные ранее многочисленные проверки качества модели MULCH и ее отдельных блоков [5, 10] подтверждают работоспособность модели MULCH при оценке влагообеспеченности зерновых в Степном Крыму.

Таблица 2. Среднегодовое характеристики показателя водообеспеченности η_w , коэффициента полезного использования ресурсов почвенных вод η_e и урожайности посевов озимой пшеницы Y в Степном Крыму при различных вариантах водного режима агроценоза и используемой агротехнологии

Вариант водного режима агроценоза и используемой агротехнологии	η_w	η_e	Y , ц/га
Традиционная агротехнология на богаре	0.63	0.48	28
Традиционная агротехнология с орошением	1.0	0.54	41
Технология “no-till” с мульчированием почвы на богаре	0.72	0.70	33

Рассмотрим полученные результаты. В первых двух строках табл. 2 приведены рассчитанные среднегодовое характеристики водообеспеченности и урожайности посевов богарной и орошаемой озимой пшеницы в Степном Крыму за безморозный период года при традиционной агротехнологии ее возделывания. Они показывают, что при использовании орошения, естественно, увеличивается показатель водообеспеченности посевов η_w с 0.63 до 1.0 за счет того, что значительно возрастают ресурсы почвенных вод. До 2014 г. это увеличение было обусловлено переводом ресурсов поверхностных и подземных вод соседнего региона (за счет прихода днепровской воды) в ресурсы почвенных вод Степного Крыма. Заметим, что при этом относительно мало меняется коэффициент полезного использования (эффективности) ресурсов почвенных вод η_e (он повышается в среднем с 0.48 до 0.54), т. е. значительная доля (порядка половины) ресурсов почвенных вод в Степном Крыму при применяемой традиционной технологии земледелия продолжает использоваться непродуктивно (испаряется оголенной почвой) и в случае орошения.

В настоящее время практически все сельскохозяйственные поля, расположенные в Степном Крыму, являются богарными (вообще говоря, и при наличии СКК большая часть (>80%) посевных площадей Крыма также ежегодно не орошались). Но в этих условиях, как показывают полученные результаты, наблюдается очень низкая эффективность использования ресурсов почвенных вод (основной составляющей водных ресурсов Степного Крыма) при применяемых технологиях земледелия (практически половина вертикальной расходной составляющей гидрологического цикла – суммарного испарения – расходуется непродуктивно). В то же время видно, что имеется резерв повышения водообеспеченности посевов за счет повышения η_e .

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ СТЕПНОГО КРЫМА

Полученные результаты оценки водообеспеченности агроэкосистем Степного Крыма показывают, что в целях повышения водной безопасности этого региона необходима разработка мероприятий по увеличению водообеспеченности его сельскохозяйственных посевов [27]. Эта задача тесно связана с утвержденной в 2019 г. Долгосрочной стратегией развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 г., цель которой – формирование высокоэффективной, научно и инновационно ориентированной и инвестиционно привлекательной сбалансированной системы производства, переработки, хранения и реализации основных зерновых и зернобобовых культур. Зерновое производство – основа агропромышленного комплекса Российской Федерации и одна из крупнейших отраслей экономики. Состояние зернового производства и положение на рынке зерна принимаются в качестве основного показателя продовольственной безопасности.

Решение задачи увеличения водообеспеченности сельскохозяйственных посевов в Степном Крыму возможно на основе двух разных стратегий. Первая (экстенсивная) стратегия связана с повышением водообеспеченности агроценозов путем увеличения ресурсов почвенных вод за счет привлечения дополнительных водных ресурсов, например переброски ресурсов поверхностных и подземных вод (речного стока) из других регионов с последующим их переводом путем орошения в дополнительные ресурсы почвенных вод. Такой вариант уже применялся на основе работы СКК и закончился в 2014 г.

Что касается местных ресурсов поверхностных и подземных вод (местного речного стока), то в Степном Крыму их просто нет, а переброска таких ресурсов из других областей Крыма также не решает задачу (этих вод в лучшем случае хватит на коммунальное и питьевое водоснабжение Крыма).

Предлагаются проекты переброски воды из соседних регионов (рек Дона или Кубани) [24, 30], которые, по мнению авторов настоящей работы,

не выдерживают никакой критики ни с экономической, ни с экологической точек зрения.

Еще один из вариантов пополнения ресурсов почвенных вод – бурение скважин для добычи воды из артезианских запасов подземных вод [24]. Причем, именно “запасов”, а не “ресурсов”, поскольку эти воды не включены в активный годовой климатический круговорот воды на суше (гидрологический цикл). А согласно концепции, изложенной выше, все живые структуры на Земле – “проточные” диссипативные системы, в которых происходит возобновляемый круговорот биоэлементов [44, 57]. Ресурсами, используемыми такими системами и обеспечивающими непрерывность жизни, служат также возобновляемые потоки различных субстанций, в том числе и потоки воды. В этом смысле запасы подземных водосодержащих горизонтов ресурсами не являются. Использование запасов глубинных подземных вод (включая и совершенно неизученный, но уже обсуждаемый на правительственном уровне вариант использования запасов пресных вод под мелким Азовским морем [11]) – это временная аварийная мера, направленная на избежание негативной ситуации в ближайшее время. Но строить стратегию решения поставленной задачи на их эксплуатации невозможно – в перспективе это приведет к более катастрофическим последствиям, чем сложившаяся в настоящее время ситуация.

И, наконец, еще один вариант получения дополнительных источников пресной воды – это опреснение морской. Но этот источник не может пополнить ресурсы почвенных вод Степного Крыма. Обычно опреснение осуществляется двумя основными способами: термическим, когда при высокой температуре вода испаряется, а полученный пар затем конденсируется, или физическим (обратный осмос), когда вода под большим давлением проходит сквозь синтетические полупроницаемые мембраны и при этом очищается от молекул соли. Громадные энергоемкость и, соответственно, эксплуатационная стоимость обеих технологий (яркий пример типичных техносферных, “серых” технологий) делает их крайне антиэкологичными. В конечном итоге за все платит биосфера [49]. А в этом случае цена за повышение влагообеспеченности посевов Степного Крыма слишком высока.

Кроме того, ирригация, для проведения которой и планируется привлечение дополнительных источников воды (в том числе и СКК), наряду со значительными экономическими затратами наносит серьезный экологический ущерб окружающей среде, приводя в первую очередь к деградации почвенного покрова [13].

Вторая стратегия повышения водообеспеченности сельскохозяйственных посевов Степного Крыма не требует привлечения дополнительных водных ресурсов. Ее основа – повышение эффективности использования имеющихся ресурсов почвенных вод за счет инновационных подходов в агротехнологиях, применяющихся при производстве сельскохозяйственной продукции на полях Степного Крыма [27]; тем более что значительный резерв неиспользуемых продуктивно ресурсов почвенных вод, как было отмечено, в Степном Крыму имеется. Нетрадиционные подходы, увеличивающие (наряду с получением ряда других положительных эффектов) эффективность использования воды агроценозами (в направлении ее значений, приближающихся к значениям эффективности естественных ценозов), должны основываться на приемах инновационного направления в сельском хозяйстве – так называемого “зеленого земледелия”. Конечно, при этом также должны быть исключены посевы влаголюбивых культур, в частности таких, как рис.

В основе стратегии “зеленого земледелия” лежит рационализация использования в сельском хозяйстве доступных природных ресурсов. Фундаментом указанной рационализации служат природоподобные (“nature-based”) технологии использования человеком таких ресурсов. В земледелии это связано с переходом на нетрадиционные (природоподобные, адаптивные, почвозащитные, природоохранные, минимальные, нулевые, зеленые (“green”), “no-till”) технологии обработки почвы [31, 58, 60].

Система “no-till” обработки почвы (рис. 4) в настоящее время становится современной системой земледелия, при которой почва практически не обрабатывается (иногда используется небольшое, поверхностное рыхление), а ее поверхность покрывается измельченными остатками растений – мульчей, т. е. на почве создается “одеяло” из пожнивных растительных остатков. Процесс образования эффективного мульчирующего слоя может длиться несколько лет. После создания “одеяла” из мульчи разрушенный в результате постоянного оборота пласта почвенный биоценоз постепенно восстанавливается, что приводит к сохранению содержания углерода в почве и воспроизводству ее плодородия [48]. Идеальная ситуация для почвы: интенсивный круговорот питательных элементов, значительное содержание углерода, минимизация использования минеральных удобрений и почти полное исключение почвенной эрозии [32, 47, 55, 56] – достигается при использовании технологий “no-till” за ~20 лет. Кроме того, мульчирующий покров способствует



Рис. 4. Обработка почвы с использованием “no-till” технологии [59].

более эффективному использованию ресурсов почвенных вод за счет уменьшения непродуктивного испарения оголенной почвой [51, 52, 59].

При ориентации на стратегию “no-till” при долговременном (>10 лет) использовании мульчирующего покрытия на поверхности почвы увеличивается инфильтрационная способность почвы за счет улучшения структуры почвенных капилляров, повышения активности дождевых червей и уменьшения переуплотнения почвы ниже плужной подошвы.

Важный аспект в растениеводстве – борьба с сорняками, основной элемент которой при традиционной агротехнике – плуг. При “зеленом земледелии” (в отсутствие отвальной вспашки) применяется ряд методов, из которых наиболее эффективные – использование плоскорезных культиваторов, подрезающих корневую систему сорняков, а также применение сидератов (покровных культур), имеющих многоцелевое назначение. Сидераты предотвращают эрозию почвы, увеличивают процент содержания органических веществ в ней, полезны в борьбе с насекомыми-вредителями и болезнями. Глубокая корневая система многих сидератов и быстрый рост делает их эффективными средствами борьбы с сорняками.

Несмотря на широкое распространение в настоящее время в мире (особенно на американском и австралийском континентах) технологий “no-till”, в России подобная практика используется пока фрагментарно в Башкортостане, Зауралье, на Алтае, в Южной Сибири, тем не менее показывая вполне приличные результаты [31]. Отдельные хозяйства Крыма также начинают применять “no-till” [37].

На данный момент эффективность технологий “no-till” оценивается на экспериментальном агрономическом уровне. Дать более или менее

обоснованную оценку этой эффективности при использовании долговременной мульчи в конкретном районе можно только теоретически. Основываясь на использовании модели MULCH, авторы статьи попытались в данной работе дать такую оценку для посевов пшеницы в Степном Крыму. При этом информационное обеспечение было тем же и для тех же агрометеорологических станций, что и при рассмотренных выше расчетах влагообеспеченности посевов пшеницы при традиционной агротехнологии. Дополнительной информацией при проведении расчетов послужили параметры соломенной мульчи (ее водоудерживающая способность и коэффициент конвективной диффузии пара в ней), полученные в [5, 9]. Выходными переменными были те же характеристики водного режима посевов, что и при расчетах, выполненных ранее для традиционной агротехнологии.

Полученные характеристики водного режима посевов пшеницы и их урожайность при применении технологии “no-till” приведены в табл. 2. Видно, что по сравнению с вариантом использования традиционной технологии водообеспеченность посевов при “no-till” возрастает с 0.63 до 0.72 (увеличивается на 14%). Происходит это за счет увеличения доли транспирации в суммарном испарении – увеличивается η_e . В этом случае он заметно выше, чем при использовании традиционной агротехнологии как на богаре, так и на поливных полях. Соответственно, при долговременном мульчировании на ~5 ц/га (~18%) возрастает и среднемноголетняя урожайность пшеницы. При этом учтено влияние мульчи на гумификацию почвы, т. е. на увеличение ее плодородия, что приводит к возрастанию урожайности пшеницы на ~1.2 ц/га [10].

Согласно данным, приведенным в табл. 2, и указанной выше оросительной норме, в Степном Крыму при использовании ирригации, равной

190 мм, можно дать грубую оценку ее эффективности, которая состоит в том, что при использовании орошения для повышения урожайности пшеницы на 1 ц/га требуется ~15 мм слоя оросительной воды. Таким образом, использование “no-till” с мульчированием, повышающее урожайность пшеницы на 5 ц/га, эквивалентно использованию ~75 мм слоя ирригационной воды. Порядок величины такой оценки соответствует имеющимся агрономическим оценкам экономии почвенной воды при выращивании зерновых в странах с широким применением технологии “no-till” (в Казахстане – 50–60, в Аргентине – 100–150 мм/год [4]). В настоящее время в наибольшей мере технология “no-till” используется в Бразилии на 45% посевной площади, в Аргентине – на 60, в Парагвае – на 80, в Австралии – на 70% [39, 54]. Если подобную технологию применить хотя бы на 50% посевных площадей Крыма, составляющих ~700 тыс. га, то полученное при этом увеличение урожайности зерновых Y будет соответствовать такому же увеличению их урожайности в случае подачи на поля оросительной воды объемом 0.27 км³/год. Для сравнения напомним, что общий объем воды, дошедшей по СКК до орошаемых полей всех сельскохозяйственных культур Крыма (за исключением риса) в 2013 г., составил 0.21–0.23 км³/год.

Подводя итоги проделанного в работе анализа, можно сказать, что основной из рассмотренных стратегий повышения водной безопасности Степного Крыма должна стать стратегия повышения эффективности использования имеющихся ресурсов почвенных вод, связанная с повышением влагообеспеченности агроценозов региона на базе применения методов “зеленого земледелия”. Основа “зеленого земледелия” – развитие агротехнологий, ориентированных на применение природоподобных (“nature-based”) процессов. Дополнительные аргументы в пользу данной стратегии – также ее экономическое преимущество (затраты на получение одинакового урожая при использовании “no-till” меньше, чем при использовании традиционной агротехнологии на богаре, и гораздо меньше, чем при использовании ирригационных систем) [4, 52], а также ее большая экологичность (“no-till” способствует сохранению природных ресурсов, включая в том числе и плодородие почвы).

Следует отметить, что переход от “серых” технологических технологий к “зеленым” природоподобным технологиям – закономерное явление в эволюции технологий природопользования. Необходимость смены указанных технологий определяется просто законами физики, а более точно – законами неравновесной термодинамики, определяющими, в частности, и эволюцию человеческой популяции на Земле [4, 50, 51].

Начало реализации стратегии “зеленой экономики” именно в настоящее время обусловлено во многом достижениями в науке, получаемыми на стыке различных научных дисциплин. На предыдущем этапе развития человечества приоритетным направлением в науке был анализ природных процессов, что неизбежно вело к формированию научного мышления, связанного с разделением знаний о Природе на множество часто совсем не связанных друг с другом научных областей. Накопилась база знаний, которые существуют отдельно друг от друга, плохо отражая единство Природы (Природа не знает научных дисциплин). Но сейчас наступил этап синтетического мышления как в науке, так и в практике. Поэтому развитие природоподобных технологий (ориентированных на целостность Природы), в том числе и в области сельского хозяйства, – неизбежность будущего взаимодействия человека с окружающей средой. Очевидно, что прежде всего указанные технологии природопользования будут появляться в регионах, специфика которых связана с определенными вызовами человеческой популяции, в том числе и с вызовами водной безопасности, которые, конечно, присутствуют в Степном Крыму.

ВЫВОДЫ

Показано, что водная безопасность Степного Крыма в основном определяется влагообеспеченностью посевов сельскохозяйственных культур, выращиваемых в данном регионе, прежде всего зерновых, влагообеспеченность которых в настоящее время недостаточна.

На основе физико-экологической концепции ресурсов почвенных вод проведен анализ состояния водных ресурсов Степного Крыма. Показано, что основная составляющая водных ресурсов в Степном Крыму – ресурсы почвенных вод, определяемые величиной суммарного испарения в регионе.

Проведен анализ возможных стратегий повышения влагообеспеченности агроценозов Степного Крыма. Показано, что экстенсивный путь решения данной проблемы, связанный с использованием ирригации, основанной на использовании других водных ресурсов, в Степном Крыму мало перспективен как с экономической, так и с экологической точек зрения.

Показано, что основная стратегия повышения влагообеспеченности агроэкосистем Степного Крыма – стратегия развития в регионе “зеленого земледелия”. Она характеризуется рациональным использованием природных ресурсов за счет ориентации при разработке агротехнических технологий на природоподобные (“nature-based”) процессы, в частности – использованием практики “no-till” минимальной обработки поч-

вы; мульчированием ее поверхности растительными остатками, приводящим к уменьшению эрозии почвы и непродуктивного испарения; минимизацией уплотнения почвы; сокращением использования гербицидов за счет применения покровных культур и т. д. Показано, что аналогичное повышение урожайности зерновых на полях Степного Крыма в отсутствие такой стратегии потребовало бы привлечения в год в среднем 75 мм слоя поливной воды, что крайне нежелательно как по экономическим, так и по экологическим соображениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабков И.И.* Климатическое районирование. Климатические районы Крыма // Климат Крыма. Л.: Гидрометиздат, 1961. <http://www.bibliotekar.ru/7-krym/index.htm> (дата обращения 10.09.2021).
2. Большая российская энциклопедия. Водные ресурсы. <https://bigenc.ru/geography/text/5563684> (дата обращения 17.04.2021)
3. *Будаговский А.И.* Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова // Вод. ресурсы. 1985. № 4. С. 3–13.
4. *Гусев Е.М.* Перспективы использования принципов “зеленой экономики” в сельском хозяйстве // *Международ. науч.-иссл. журн.*. 2020. № 1 (91). Ч. 1. С. 87–99.
5. *Гусев Е.М.* Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчеты. Saarbrücken: Palmarium Acad. Publ., 2012. 116 с.
6. *Гусев Е.М.* Экологическая роль почвенных вод и их ресурсы // Вод. ресурсы. 1990. № 5. С. 110–121.
7. *Гусев Е.М., Бусарова О.Е.* Моделирование динамики относительной площади листьев злаковых культур // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 1. С. 100–107.
8. *Гусев Е.М., Бусарова О.Е.* Энергетическая оценка эффективности агротехнологий // *Почвоведение*. 2001. № 7. С. 832–844.
9. *Гусев Е.М., Бусарова О.Е., Шурхно А.А., Ясинский С.В.* Влияние соломенной мульчи на термический режим почвы после схода снежного покрова // *Почвоведение*. 1992. № 5. С. 49–59.
10. *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.
11. Два миллиарда кубометров пресной воды обнаружили под Азовским морем. <https://vesti-k.ru/news/2021/04/30/dva-milliarda-kubometrov-presnoj-vody-obnaruzhili-pod-azovskim-morem/> (дата обращения 15.04.2021)
12. Доклад Министра жилищно-коммунального хозяйства Республики Крым А. Жданова на расширенном заседании Комитета Совета Федерации по федеративному устройству, региональной политике, местному самоуправлению и делам Севера в рамках Дней Республики Крым в Совете Федерации на тему “Состояние, возможности и перспективы развития водоснабжения Республики Крым”. Симферополь: Мин-во жилищно-коммунального хозяйства РК, 2015. 12 с.
13. *Драган Н.А.* Деградационные процессы в почвах Крыма // *Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Материалы VI Междунар. науч. конф. / Отв. за вып. П.В. Голусов*. 2015. С. 215–220.
14. *Драган Н.А.* Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Доля, 2004. 208 с.
15. *Драган Н.А.* Пути оптимизации агроэкологического состояния почвенных ресурсов Степного Крыма // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2013. Т. 9. № 1. С. 69–87.
16. *Драган Н.А.* Сравнительная оценка качества почвенных ресурсов Крыма // *Уч. зап. КФУ. География. Геология*. 2011. №2–1. С. 260–266.
17. *Иванов Н.Н.* Ландшафтно-климатические зоны земного шара. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 224 с.
18. Использование водных ресурсов (водопотребление и водопользование). https://studref.com/399572/ekonomika/ispolzovanie_vodnyh_resursov_vodopotreblenie_vodopolzovanie (дата обращения 14.04.2021)
19. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года на территории Республики Крым. Посевные площади сельскохозяйственных культур и площади многолетних насаждений и ягодных культур. Кн. 2. Структура посевных площадей. Группировки объектов переписи по размеру посевных площадей. Т. IV. Симферополь: Крымстат, 2018. 336 с.
20. Климат степного Крыма // Большой топонимический словарь Крыма. http://kimmeria.com/crimea_placenames/repository/sun_crimea_16.htm (дата обращения 14.04.2021)
21. Климатические условия в Крыму. <http://hikersbay.com/climate-conditions/ukraine/crimea/klimaticheskie-usloviya-v-krym.html> (дата обращения 14.04.2021)
22. *Моисеев Н.Н.* Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
23. *Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А.* Глобальные оценки изменения составляющих водного баланса суши в связи с возможным изменением климата // Вод. ресурсы. 2021. № 4. 361–377.
24. Новые скважины, опреснение моря и разворот рек: как Крым обеспечат водой. <https://ecologyofrus-sia.ru/stories/krym-voda/> (дата обращения 1.05.2021)
25. Почвы Керченского полуострова от черноземов до солончаков. <https://kerchland.com/pochvy-kerchenskogo-poluostrova-ot-chnozemov-do-solonchakov> (дата обращения 2.07.2021)
26. Почвы Крыма. <https://crimea.ru/pochvy-kryma.htm> (дата обращения 10.05.2021)
27. Проблемы и перспективы инновационного развития сельских территорий Крыма: коллективная монография // НИИСХК. Симферополь: АРИАЛ, 2019. 252 с. DOI

28. Различия и сходства твердой и мягкой пшеницы. <https://ferma.expert/rasteniya/kultury/pshenica/tverdaya-i-myagkaya> (дата обращения 10.07.2021)
29. Республика Крым // Научно-популярная энциклопедия “Вода России”. https://water-rg.ru/Регионы_России/2536/Республика_Крым (дата обращения 10.08.2021)
30. Русейкина Е.С., Кузина О., Магомедов М., Тарасенко В.Э. Устье реки Кубань – Северо-Крымский канал. Вариант переброски пресной воды в Крым // СОК. 2018. № 11. С. 36–39. <https://www.c-o-k.ru/articles/uste-reki-kuban-severokrymskiy-kanal-variant-perebroski-presnoy-vody-v-krum> (дата обращения 10.05.2021)
31. Сафин Х.М. Технология выгодна и требует скорейшего внедрения // Рынок АПК. 10.11.2020. <https://rynok-apk.ru/articles/plants/strip-till-tehnologiya/> (дата обращения 14.04.2021)
32. Сафин Х.М., Шварц Л.С., Фахрисламов Р.С. Технология No-till в системе сберегающего земледелия: теория и практика внедрения. Уфа: Мир печати, 2013. 72 с.
33. Северо-Крымский канал. https://ru.wikipedia.org/wiki/Северо-Крымский_канал (дата обращения 10.05.2021)
34. Сельское хозяйство Крыма. <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-kruma> (дата обращения 11.04.2021)
35. Сельское хозяйство Крыма. Материал из Википедии. https://ru.wikipedia.org/wiki/Сельское_хозяйство_Крыма (дата обращения 10.05.2021)
36. Соколов А.А. Вода: проблемы на рубеже XXI века. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 166 с.
37. Состоялся научно-практический семинар по технологии No-till. Лента новостей Крыма (crimea-news.com). <https://crimea-news.com/society/2021/04/16/782772.html> (дата обращения 10.08.2021)
38. Степной Крым: климат, рельеф, флора и фауна. Границы региона. Интересные места и достопримечательности. <https://fb.ru/article/386415/stepnoy-krum-klimat-relef-flora-i-fauna-granitsyi-regiona-interesnyie-mesta-i-dostoprimechatelnosti> (дата обращения 14.04.2021)
39. Так что же было раньше: обработка или “ноль”? <http://agrotechnology.com/no-till/teoriya/tak-chto-zhe-bylo-ranshe-obrabotka-ili-nol> (дата обращения 14.04.2021)
40. Технология возделывания сельскохозяйственных культур. <https://leksia.com/6xd85b.html> (дата обращения 10.05.2021)
41. Тищенко А.И., Кузьмичев А.А., Пономаренко Т.С. Рациональное использование водных ресурсов Крыма для целей мелиорации // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2018. № 1 (29). С. 188–207.
42. У моря без воды. Что ждет Крым после засушливой зимы // Огонек. 2020. № 22. <https://im.kommerisant.ru/ISSUES.PHOTO/OGONIOK/2020/022/26-28%20krum-1.jpg> (дата обращения 14.08.2021)
43. Урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Крым (пересчитанные данные с учетом итогов ВСХП-2016). Росстат. Симферополь: Управление Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю, 2019. 55 с.
44. Фолсом К. Происхождение жизни. М.: Мир, 1982. 160 с.
45. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.
46. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. М.: Мир, 1987. 224 с.
47. No-till сберегает почву и деньги крестьянина. <https://apc-intech.ru/no-till-sberegaet-pochvu-i-dengi-krestyanin> (дата обращения 10.07.2021)
48. Bayer C., Martin-Neto L., Mielniczuk J., Pavinato A., Dieckow J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till // J Soil and Tillage Res. 2006. V. 86. № 2. P. 237–245.
49. Commoner B. The closing circle: Nature, man, and technology. N. Y.: Knopf, 1971. 326 p.
50. Gusev E.M. Evolution of Agricultural Technologies: from “Gray” to “Green” // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1134/S2079096120010060>
51. Gusev E.M. Inevitability and Prospects of the Use of the “Green Farming” Strategy by Humanity // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. № 3. P. 143–149. <https://doi.org/10.1134/S2079096119030041>
52. Gusev Y.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N. Modelling the impact of mulching the soil with plant remains on water regime formation, crop yield and energy costs in agricultural ecosystems // Proc. IAHS. 2018. V. 376. P. 77–82. <https://doi.org/10.5194/piahs-376-77-2018>
53. Gusev Ye., Novak V. Soil water – main water resources for terrestrial ecosystems of the biosphere // J. Hydrol. Hydromech. 2007. V. 55. № 1. P. 3–15.
54. Hall A., Dorai K. The greening of agriculture. Agricultural innovation and sustainable growth. Brighton, UK: Link Limited, 2010. 60 p.
55. Montgomery D.R. Dirt: Erosion of Civilizations. Berkeley; Los Angeles: Univ. California Press, 2007. 296 p.
56. Montgomery D.R. Is agriculture eroding civilization’s foundation? // GSA Today. 2007. V. 17. № 10. P. 4–9.
57. Morowitz H.J. Energy flow in biology: biological organization as a problem in thermal physics. N.Y.: Acad. Press, 1968. 179 p.
58. Nature-Based Solutions for Water // The United Nations World Water Development Rep. 2018. Paris: UNESCO, 139 p.
59. No-till air drill. <https://www.deere.com/en/seeding-equipment/n550-no-till-air-drill/> (дата обращения 10.09.2021)
60. Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. Paris: OECD publ., 2010. 120 p.