

ПОБОЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ ИЗБЫТОЧНОГО ОРОШЕНИЯ

Никольский Ю.Н. и Айдаров И.П.

Краткое содержание

Избыточное орошение относится в основном к поверхностному самотечному орошению по бороздам, полосам и затоплением. Оно является наиболее распространенным в мире, особенно в регионах без существенного ограничения водного ресурса. Такое орошение характеризуется несовершенством техники и технологии полива и часто сопровождается большими потерями воды на глубокое просачивание воды по профилю почвы на орошаемых полях, а также часто имеет несовершенное состояние сети распределительных каналов, когда у них нет или недостаточно противодиффузионного покрытия для предотвращения потерь воды на фильтрацию (особенно это касается небольших по размеру каналов).

Поэтому такое орошение может приводить к следующим негативным последствиям:

- К чрезмерному забору воды из естественных поверхностных и подземных источников, к большим потерям воды на фильтрацию из оросительных каналов (особенно из небольших) и глубокому просачиванию воды через почвенный профиль на орошаемых участках, а также к поверхностному стоку с них.

- К истощению и загрязнению, прежде всего естественных поверхностных вод (рек, ручьев, озер, эстуариев рек) и ухудшению состояния их водных экосистем, а также, возможно, и к ухудшению здоровья людей из-за загрязнения естественных поверхностных и подземных источников воды остатками пестицидов и удобрений, применяемых на орошаемых сельскохозяйственных землях.

- К повышению уровня грунтовых вод, подтоплению и/или засолению почв, накоплению токсичных веществ в почвах и грунтовых водах. Понижению уровня подземных вод, истощению водоносных горизонтов и даже оседанию поверхности земли, когда подземные воды чрезмерно используются для орошения.

- К постепенной (в течение десятилетий) деградации почв, длительно орошаемых даже пресной водой, к потере их плодородия и снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

- К ухудшению состояния окружающей среды водосборов и ухудшению здоровья и благосостояния населения.

Следовательно, необходимо улучшать технику и технологию орошения, принимая во внимание не только потребность растений в воде, но и необходимость сохранения плодородия почвы и защиты окружающей среды.

Что такое избыточное орошение?

Чтобы прокормить растущее население Земли, необходимо повысить урожайность сельскохозяйственных земель за счет использования высокопродуктивных сортов сельскохозяйственных культур, защиты растений от болезней и вредителей, а также совершенствования технологии орошения там, где это необходимо, принимая во внимание ограниченную возможность увеличения площади орошаемых земель в мире.

Основной целью орошения является компенсация возможного недостатка воды в корнеобитаемом слое почвы, чтобы высокоурожайные культуры могли бы полностью использовать потенциальную возможность своего развития.

Для этого содержание влаги в активном корнеобитаемом слое почве (глубиной приблизительно 0,3-0,5 м) должно поддерживаться в диапазоне от допустимого минимума до определенного максимального уровня. Основное потребление воды идет на испарение с листьев растения, или на так называемую транспирацию, которая необходима для поддержания определенной температуры тела растения, а также дыхания, фотосинтеза и транспорта питательных веществ из почвы. Часть почвенной воды испаряется с поверхности почвы между растениями. Максимальное содержание влаги в почве соответствует так называемой предельной полевой емкости (в западной терминологии – это полевая влагоемкость), которая под воздействием капиллярных сил может сохраняться в почве после каждого полива, хотя небольшая ее часть может затем просачиваться вниз по профилю почвы.

В процессе поливов часть воды также может стекать по поверхности орошаемых участков. Минимальный предел допустимого содержания влаги в почве в зависимости от культуры и текстуры почвы составляет примерно 0,6-0,7 от предельной полевой емкости. Интенсивность эвапотранспирации, то есть транспирации вместе с испарением, уменьшается с уменьшением содержания влаги в почве. Уменьшение эвапотранспирации сопровождается определенным снижением интенсивности роста растения и его продуктивности. Невозможность предотвратить снижение влажности почвы обусловлена несовершенством существующей техники орошения. В настоящее время поверхностное самотечное орошение по бороздам, полосам и затоплением применяется на более чем 85% орошаемых земель мира, остальное орошается с помощью дождевания, капельного орошения и микродождеванием. В развивающихся странах самотечное орошение используется на 85-100% всей орошаемой площади. Эффективность использования воды при орошении, оцениваемая по объему воды, используемой для производства единицы массы сельскохозяйственного продукта в развивающихся странах составляет в среднем 3500 м³/т для зерновых культур, то есть в 3,5 тысячи раз больше, чем масса самого продукта. Между тем, в развитых странах она составляет 380-1000 м³/т (Айдаров, 2012).

Продуктивность сельского хозяйства при традиционном орошении в 20-м веке обычно была ниже потенциальной. Попытка значительно увеличить урожайность была предпринята в 1960-х годах и называлась «Зеленая революция».

Зеленая революция включала три основных компонента:

- Селекция и использование высокопродуктивных сортов сельскохозяйственных культур.
- Применение больших доз минеральных удобрений и искусственно созданных химических средств защиты растений в виде различных пестицидов (гербицидов, фунгицидов, инсектицидов и т.д.).
- Орошение. В некоторых регионах без существенного ограничения имеющихся водных ресурсов стало возможным увеличить подачу поливной воды, поддерживать относительно высокую влажность почвы и интенсивность суммарного испарения, близкую к потенциальной. Такое орошение условно можно назвать избыточным.

Зеленая революция широко применялась в развивающихся странах, и ее положительные последствия неоспоримы. С 1960-х до начала 21-го века мировое производство зерновых увеличилось примерно в три раза. Рост населения и увеличение спроса на продовольствие обусловили необходимость расширения площади орошаемых земель. Из-за ограниченной возможности расширения площади, пригодной для орошения, земли, содержащие водорастворимые токсичные соли в почвах и грунтовых водах, также использовались для орошения. Чтобы предотвратить накопление солей в почвах и потерю урожайности, необходимо было увеличить подачу воды на орошение этих земель по сравнению с землями без проблем засоления.

Наряду с положительными последствиями, Зеленая революция привела в некоторых регионах к ряду отрицательных экологических и социально-экономических последствий, включая следующие:

- Сокращение разнообразия сельскохозяйственных культур на орошаемых землях. Рис, пшеница и кукуруза стали основными. Другие культуры оказались недостаточно эффективными для интенсивных технологий.
- Сокращение биоразнообразия сельскохозяйственных культур привело к интенсивному развитию вредителей и болезней растений и снижению продуктивности орошаемых земель.

Увеличение подачи воды на орошаемые сельскохозяйственные земли, высокие дозы минеральных удобрений и химических веществ для защиты растений привели в некоторых случаях к следующим негативным последствиям:

- К увеличению забора воды из рек или озер, увеличению потерь воды на фильтрацию из сети оросительных каналов, а также на глубинное просачивание воды на орошаемых участках по почвенному профилю в грунтовые воды, а также к росту поверхностного стока с орошаемых участков.
- К повышению уровня грунтовых вод, подтоплению и/или засолению почв, накоплению токсичных веществ в почвах и грунтовых водах.
- К понижению уровня подземных вод, истощению водоносных горизонтов и даже оседанию поверхности земли на территориях, где подземные воды чрезмерно используются для орошения.

- К увеличению стока остатков пестицидов и удобрений с сельскохозяйственных угодий, загрязнению природных, главным образом поверхностных вод (рек, ручьев, озер, лиманов), ухудшению их водных экосистем и здоровья людей.
- К истощению водных ресурсов доступных для использования их человеком на больших территориях.
- К деградации почв, постепенной потере их естественного плодородия (в течение десятилетий) и к снижению продуктивности сельскохозяйственных земель.
- К ухудшению состояния окружающей среды водосборов и благосостояния населения.

Такие побочные негативные последствия чрезмерного орошения относятся, главным образом, к территориям, орошаемым с помощью самотечных поливов по бороздам, полосам и затоплением.

Проанализируем более подробно эти последствия и возможные мероприятия по их предотвращению.

Экологические и социально-экономические возможные последствия избыточного орошения

Орошение в мире потребляет более 80% воды, используемой человечеством. Считается, что вода – это возобновляемый природный ресурс. Действительно, ежегодные осадки пополняют запасы поверхностных и подземных вод. Часть этих запасов ежегодно теряется в атмосферу в процессе эвапотранспирации естественной растительностью, другая часть стекает по поверхности земли в реки, озера, моря. Таким образом сохраняется баланс чистой воды на крупных территориях.

Однако, орошение резко усиливает потерю воды в атмосферу в процессе эвапотранспирации с орошаемых земель и испарения с поверхности построенных водохранилищ. Эта дополнительная потеря воды, как правило, не возвращается на территорию, где она была использована для орошения и потеряна в атмосферу в процессе эвапотранспирации. Она не возвращается даже на территорию крупного водосбора, так как вода в атмосфере транспортируется воздушными массами далеко за пределы водосбора и, возможно даже, за пределы континента. Некоторое количество чистой воды, взятой из природы и использованной на орошение, а также для бытовых, промышленных и других целей, возвращается обратно в окружающую среду, но в виде возвратных вод, загрязненных остатками удобрений, пестицидов, возможно также, токсичных почвенных солей и других токсичных химических и биологических веществ. Поэтому природная чистая вода, используемая для орошения, является только частично возобновляемым и способным к истощению природным ресурсом.

Наибольшую озабоченность вызывает состояние земель, водных ресурсов и экосистем речных бассейнов в Центральной Азии, на Ближнем Востоке и в Северной Африке, где наблюдается прогрессивное засоление и деградация орошаемых земель, и где отбор воды для орошения из рек и озер может вызвать полное истощение водных ресурсов. Это приводит к снижению урожайности основных культур, используемых в технологии Зеленой революции. Ежегодный прирост производства пшеницы снизился с 5% в 1980 году до 2% в 2005 году, а в отношении риса и кукурузы - с 3 до 1% (FAOSTAT, 2019).

Экологические и социально-экономические последствия ирригации зависят от:

- Технологии орошения. Это поверхностное самотечное, дождевание, капельное орошение и др.?
- Типа водораспределительной сети. Это трубчатая сеть или по каналам? Каналы с или без облицовки?
- Качества воды. Это пресная или соленая, или загрязненная сточная вода?
- Источника воды. Это поверхностная или подземная вода?

Наибольшие потери воды происходят при поверхностном самотечном орошении, меньшие при дождевании и намного меньше при капельном способе и микродождевании. Потери воды в распределительной сети меньше, когда каналы имеют облицовку, и намного меньше, когда она построена из труб. Тем не менее, стоимость снижения потерь воды значительно увеличивается с улучшением технологии и качества водораспределительной сети.

Чрезмерная откачка подземных вод может привести к значительному увеличению затрат на откачку и даже к их истощению.

Уменьшение доступных водных ресурсов без значительных инвестиций в повышение эффективности водораспределения и в совершенствование техники и технологии орошения приводит к снижению

продуктивности орошаемых земель и их рентабельности. Ухудшение качества воды может также сопровождаться загрязнением сельскохозяйственной продукции токсичными веществами, содержащимися в поливной воде.

Существуют нормативы качества воды для орошения. Пресная вода является предпочтительной. Подземные воды движутся и пополняются очень медленно по сравнению с поверхностными водами. Поэтому имеющиеся запасы подземных вод могут истощиться быстрее, чем запасы поверхностных вод. Однако поверхностные воды более доступны для забора, но менее защищены от загрязнения по сравнению с подземными водами. Поэтому загрязнение поверхностных вод широко распространено по всему миру. Например, в Мексике 74% поверхностных вод загрязнены в разной степени (CONAGUA, 2017). Из-за нехватки пресной воды некоторые страны используют слабосоленую или очищенную и даже неочищенную муниципальную сточную воду. Сточные воды используются для орошения в Китае, Латинской Америке, на Ближнем Востоке, в Центральной Азии и др.

Проблема чрезмерного использования и истощения водного ресурса, а также ухудшения его качества на больших территориях в пределах водосборов рек или озер, имеет место в разных странах.

Например, река Колорадо, протекающая по территории США и частично в ее нижнем течении по территории Мексики, в начале 20-го века сбрасывала 22 км³/год в ее дельту и в Калифорнийский залив (море Кортеса). Кроме того, река несла около 1,23 км³/год наносов, что было важно для дельты реки и ее экосистемы. В настоящее время Мексика получает около 2,07 км³/год воды, загрязненной химическими и органическими веществами, в частности, селеном, кадмием, свинцом, ртутью, литием, свободноживущими амебами, кишечными палочками коли, пестицидами, в результате смешения с муниципальными, промышленными и сельскохозяйственными сточными водами. Поступающая в Мексику вода используется, в основном, для орошения сельскохозяйственных угодий, а это приводит к загрязнению кормов и некоторых продуктов питания людей. В большинстве лет воды реки Колорадо не достигают залива из-за полного их использования. Это ухудшает экологическое состояние дельты реки и прибрежных акваторий (Cohen *et al.*, 2001; Garcia-Hernandez *et al.*, 2001; Varady *et al.*, 2001; Angulo, 2004; Samaniego-Lopez, 2008; Stockle, 2012).

Река Хуанхэ (Желтая река) в Китае, одна из крупнейших рек в Азии и первая в мире для транспорту взвешенных наносов, загрязнена промышленными и бытовыми стоками, а также агрохимикатами. С 60-х годов 20-го века периодически существенно сокращается ее сток в результате чрезмерного использования воды для орошения и других хозяйственных нужд. Степень снижения стока постепенно увеличивается. В 2000 году площадь орошаемых сельскохозяйственных угодий, пострадавших из-за нехватки воды, увеличилась более чем в 3 раза по сравнению с 1976 годом. Уменьшение стока реки Хуанхэ оказывает негативное влияние на социально-экономическое развитие регионов, расположенных в основном в средней и нижней части бассейна реки.

Строительство дамб на реке Янцзы в Китае и реке Нил в Египте привело не только к уменьшению их стока из-за испарения с поверхности водохранилищ, но также к прекращению переноса взвешенных отложений в низовья, разрушению дельт рек и сокращению обеспеченности орошаемых земель питательными веществами вместе с наносами. Это заставило фермеров применять высокие дозы минеральных удобрений.

Из-за чрезмерного использования подземных вод для орошения они могут быть истощены. Например, из-за этого Техас в США потерял 14% своих орошаемых земель (Stockle, 2012). В Пенджабе, Индия, уровни водоносных горизонтов снижаются с интенсивностью не менее 1 м/год. В Мексике 20% подземных вод истощены, в некоторых местах глубина их уровня превышает 300 м (CONAGUA, 2017).

Одним из наиболее впечатляющих и изученных примеров экологических и социально-экономических последствий избыточного орошения является бассейн Аральского моря (Рисунок 1).



Рисунок 1. Расположение Аральского моря в Центральной Азии.

Экологические и социально-экономические последствия избыточного орошения в бассейне Аральского моря

Развитие орошения

До середины 20-го века Аральское море было четвертым по величине озером в мире. Его длина составляла 426 км, ширина - 284 км. Две крупные реки, Амударья и Сырдарья, с общим годовым стоком около 100 км^3 , наполняли Аральское море водой и были основным источником воды для орошения в его бассейне. До 1950 года эти реки ежегодно приносили в море около 60 км^3 высококачественной пресной воды, получаемой в основном из горных ледников.

В настоящее время море практически исчезло. Сток обеих рек полностью используется для орошения, и вода практически не поступает в Аральское море.

Много лет Аральское море использовалось для интенсивного рыболовства. Вокруг этого моря было несколько небольших населенных пунктов, где население традиционно занималось рыболовством и переработкой рыбы. Поймы обеих рек и их обширные дельты с многочисленными небольшими озерами имели особую флору и фауну. Почему исчезло Аральское море?

В бассейне Аральского моря расположено, в основном, пять республик: Узбекистан и части Казахстана, Таджикистана, Кыргызстана и Туркменистана с общей численностью населения (в границах бассейна) около 25 миллионов человек. Среднегодовая температура воздуха в основной орошаемой части бассейна Аральского моря составляет около 14°C , годовое количество осадков 100-250 мм, а потенциальное суммарное испарение 1200-1400 мм. В соответствии с современной классификацией почвы, в основном, Gypsisols, Calcisols, Phaezems and Anthrosols (Сероземы) (ФАО, 2006).

Орошаемое земледелие имело место в этом бассейне на протяжении веков. Раньше орошаемое земледелие практиковалось, в основном, в районах с богатыми плодородными почвами, глубокими или пресными близко расположенными грунтовыми водами. Крестьяне практически не строили дренаж на орошаемых землях, используя, как правило, эффект естественного дренажа на землях с глубоким уровнем грунтовых вод или эффект субиригации в районах с близкими пресными грунтовыми водами. Орошаемые земли располагались, главным образом, в речных долинах, дельтах и предгорьях.

В начале 20-го века объем воды нетто, доставляемой на обрабатываемую площадь, был довольно небольшим, около $3000\text{-}5000 \text{ м}^3/\text{га}$ в год. Орошаемые участки были небольшими, хорошо выровненными, применялось, в основном, орошение по тупым бороздам, то есть, поверхностный сток возвратных вод практически был исключен. Оросительные системы в то время имели высокий уровень организации и обеспечивали не только эффективное использование воды, но и сохранение экологического равновесия территорий. Оросительные каналы в долинах рек были глубиной 1-1,5 м и поэтому одновременно служили ирригационно-дренажной сетью. Оросительная вода подавалась на

участки с использованием примитивных водоподъемных устройств. Эффективность использования воды составляла почти 100%, то есть 100% воды, взятой из природных источников, было использовано для суммарного испарения. Засоленность орошаемых земель исключалась. Основными поливными культурами были зерновые и люцерна. Они занимали более половины всей орошаемой площади в бассейне Аральского моря. Хлопок занимал менее 20-30%, а рис - не более 5-15% орошаемой площади. В те времена минерализация речных вод составляла около 0,1–0,2 г/л в верховьях и около 0,4 г/л в низовьях рек вблизи Аральского моря.

В течение 20-го века население бассейна Аральского моря удвоилось. В начале века там жило около 12 миллионов человек, сейчас - 25 миллионов. Орошение развивалось интенсивно, площадь орошаемых земель почти утроилась с 2-3 млн. га в начале 20-го века до 7 млн. га в конце его. В середине 20-го века, в связи с передачей права собственности на землю от частного к государственному или коллективному, произошли следующие изменения в орошаемом земледелии (Якубова, 1977; Волинов и др., 1980; Самойленко и др., 1987; Micklin, 2007; Зонн и Гланц, 2008; Айдаров, 2010; Айдаров, 2012):

- Чувство частной собственности на землю и желание получить личную прибыль от орошаемого земледелия были утеряны.

- Крупные оросительные системы площадью в сотни тысяч гектаров были построены в основном в степной и пустынной частях бассейна Аральского моря, вдали от русел рек, где уровень грунтовых вод изначально был глубоким (глубже 30-50 м от поверхности почвы). В 1960-1980х годах на водосборах рек Амударья и Сырдарья было построено много плотин, чтобы увеличить доступные для орошения запасы воды.

- Общая орошаемая площадь к концу 20-го века увеличилась более чем в 2,5 раза по сравнению с началом века и достигла 7,9 млн.га. Ирригация развивалась главным образом посредством строительства новых оросительных систем и в меньшей степени путем реконструкции старых.

- Размер орошаемых участков был увеличен с долей гектара до нескольких десятков гектаров.

- Хлопок стал основной культурой для увеличения производства хлопка-сырца, удовлетворения внутренних потребностей, прекращения его импорта, достижения хлопковой независимости и продажи хлопка за границу для получения твердой валюты. Площадь хлопка в севооборотах до 1940х годов не превышала 10-30%, а затем была увеличена до 70-80%. С 1950х годов хлопок занимал 70-80% всей орошаемой площади бассейна Аральского моря. Процент площади люцерны в севооборотах, соответственно, уменьшился. Площадь, занятая рисом, значительно увеличилась с 1970х годов, главным образом, в дельтах обеих рек. В начале века рис занимал 0,2-0,4 млн. га, а после 1980х годов он занимал около 0,7 млн. га.

- Объем воды, поступающей на орошаемые земли, увеличился более чем в 1,5 раза. Значительно возросло применение минеральных удобрений и различных пестицидов.

- Около 50% оросительной воды, взятой из рек, ежегодно терялось из-за фильтрационных потерь в сети оросительных каналов и глубокого просачивания через почвенный профиль на орошаемых участках. Потеря воды вызвала повышение уровня грунтовых вод, засоление почвы и даже подтопление.

- Для предотвращения засоления почв и подтопления сельскохозяйственный дренаж строился в больших масштабах с 1940х, но медленнее, чем строительство новых оросительных систем. Между тем оросительная норма постепенно увеличивалась для удаления солей из почвы. В конце 20-го века около 60% орошаемых земель имели дренаж. В некоторых районах это закрытый трубчатый дренаж, а в других – открытый в виде дренажных каналов. Дренаж ускорил отток и понизил уровень грунтовых вод. Однако этот дренаж вместе с водой удалял токсичные почвенные соли, а также часть удобрений и пестицидов, применяемых в сельском хозяйстве.

Необходимость строительства дренажа не была очевидна в самом начале, когда было замечено опасное повышение уровня грунтовых вод в степных и пустынных районах. В первые годы предпринимались попытки предотвратить повышение уровня грунтовых вод за счет уменьшения оросительных и поливных норм, реконструкции оросительных каналов и снижения потерь воды на

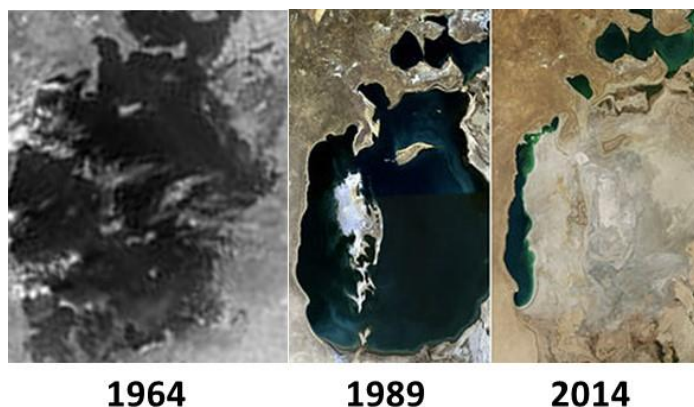
просачивание из оросительных каналов и глубинное просачивание на орошаемых участках. Поскольку орошаемые площади постепенно расширялись, эти подходы оказались недостаточными и началось массовое строительство дренажа. Сначала строился довольно неглубокий дренаж (глубиной 1,5-2 м). Однако практика показала, что глубокий дренаж (с глубиной 2,5-3 м), который мог бы поддерживать уровень грунтовых вод на глубине не менее 2 м, был бы предпочтительным. Чем выше уровень грунтовых вод, тем больше воды для орошения необходимо использовать для предотвращения засоления почвы. Дренаж с глубиной 2,5-3 м строился в основном с 1960-х годов.

- В конце 20-го века, по оценкам, общий коллекторно-дренажный сток достигал около 45% от водозабора из рек. Половина этого количества вернулась в реки и затем основная часть была вновь использована оросительными системами, расположенными ниже по течению рек, около 20% сброшено в Аральское море, около 30% сброшено в сухие земли (некоторая часть была накоплена в искусственных озерах в понижениях местности). Более поздний анализ экспериментальных данных в бассейне Аральского моря показал, что практически единственный способ сэкономить воду и в то же время предотвратить засоление почвы при одном и том же виде сельскохозяйственного использования земли - это поддерживать уровень грунтовых вод на максимально возможной глубине (не менее 2,0-2,5 м) и использовать для полива пресную воды хорошего качества (Аверьянов, 2015; Айдаров и др., 1990). Этот подход также помогает предотвратить загрязнение грунтовых вод. Согласно рекомендациям ФАО (1980), для предотвращения засоления почвы необходимо поддерживать уровень грунтовых вод на глубине не менее 1,5-1,7 м и строить дренажи на глубине около 2-2,5 м.

Экологические и социально-экономические последствия орошения

В результате роста площади орошаемых земель и роста потребления воды, речной сток полностью был использован к концу 20-го века. Общее потребление воды на орошение составляло около 10-15 км³/год с 1900 года до 1930х годов, 40 км³/год в 1960х годах и более 85 км³/год с 1985 года (Решеткина, 1991). Около 6-7 км³/год речного стока терялось с 1985 года в результате испарения из водохранилищ на реках, дополнительных потерь в размере около 10-20 км³/год на фильтрацию из сетей оросительных каналов и из-за сброса неиспользованной воды (в основном дренажной) в понижения местности. В пределах бассейна дренажные воды удалялись с орошаемых земель, в основном, в реки. Вниз по течению речные воды, смешанные с дренажными водами, повторно использовались для орошения и для бытовых целей.

Общий речной сток в Аральское море начал значительно уменьшаться в 1950х годах, особенно с 1960х по 1980е годы. Он сократился с 60 км³/год (до 1940 года) до 10-15 км³/год в конце 1970х годов. К 1985 году реки прекратили свой сток в Аральское море. Из-за сокращения, а затем и прекращения речного стока в низовьях рек, уровень Аральского моря начал снижаться с ускорением с 1950х годов. В конце 20 века море практически исчезло (рис. 2).



**Рисунок 2. Спутниковые снимки Аральского моря с 1960х годов
(доступно на сайте: <http://regnum.ru/news/2470294.html>)**

На бывшем морском дне сформировалась высохшая соленая поверхность площадью около 68 тыс. км² с содержанием солей около 100-300 т/га в верхнем слое глубиной 1 м. Соленая пыль переносится

ветром с этой поверхности каждый год на расстояние более 300 км от моря. Соленая пыль уносится ветром с этой поверхности каждый год на расстояние более 300 км от моря. Около 1 тонны морских донных солей ежегодно выпадает на каждый гектар дельт рек. Соленые пыльные облака поднимаются очень высоко и даже достигают ледников в горах, ускоряя их таяние. В прибрежной зоне Аральского моря появились соленые дожди с концентрацией соли до 160 мг/л (Разаков, 1990).

С 1980-х годов рыба исчезла из моря, рыбоперерабатывающее производство было разрушено. Все рыбацкие деревни и рыболовные судна находятся далеко от моря (Рисунок 3). Бывшее население побережья потеряло работу. Прекратилось ежегодное затопление пойм в нижнем течении обеих рек. Из-за этого происходит деградация богатых аллювиальных почв. Уровень воды в дельтах рек понизился, и процессы почвообразования изменились с гидроморфных и полугидроморфных на автоморфные. Происходит опустынивание дельт рек. Многочисленные озера с пресной водой (некоторые из них использовались ранее для рыболовства) высохли. Появились озера с токсичной водой. Природные пастбища для домашних и диких животных исчезли. Исчезла эндемичная флора и фауна в прибрежной зоне бывшего Аральского моря. Амплитуда годового колебания температуры воздуха поднялась на 2-3 °С на расстояние до 100 км от бывшего моря.



Рисунок 3. Вид Аральского моря в середине и конце 20го века
(доступно на сайтах: <https://rg.ru/2014/01/19/aralskove-more-site.html> и <http://imgtube.ru/images/stories/2013/06/024-aral/aral3.jpg>)

Минерализация речных вод росла на протяжении многих лет из-за огромного сброса дренажных вод и их повторного использования. Качество речной воды ухудшалось, особенно в низовьях. Наиболее резкое увеличение минерализации речной воды произошло в 1970-х и 1980-х годах. Вместе с почвенными солями речная вода транспортировала токсичные агрохимикаты (различные пестициды, нитраты и т.д.). В речные воды ежегодно поступало около 0,3–0,5 кг пестицидов (в основном в хлорорганических формах) и около 50 кг азота с каждого гектара хлопковых полей (Якубова, 1977; Самойленко и др., 1987). Поскольку речной сток сократился, а качество воды ухудшилось, проблема распределения воды для орошения между государствами в бассейне увеличилась. Республики, расположенные в верховьях бассейна, использовали воду лучшего качества, чем расположенные вниз по течению.

Несмотря на строительство дренажа и рост водоподачи на орошаемые участки, засоленность почв постепенно увеличивалась. Это стало заметно особенно в районах ниже по течению рек. Например, в конце 1980х годов умеренно и сильно засоленные почвы занимали 30-40% и 60-70% орошаемых земель, расположенных соответственно в верховьях рек (Таджикистан и Киргизстан) и низовьях (Узбекистан, Туркменистан и Казахстан). В районах, близких к Аральскому морю, засоленность почвы возникла на 70-90% орошаемых земель (Решеткина, 1991; Айдаров и др., 2010). В результате этого урожай хлопка во всем бассейне Аральского моря начал снижаться.

Чтобы увеличить урожайность хлопка, фермеры использовали все больше воды, удобрений и пестицидов. Кроме того, строился новый дренаж и реконструировались ирригационные системы, однако с недостаточной интенсивностью. В период с 1940х по 1980е годы объем водоподачи на орошаемые участки увеличился с 5000-6000 м³/га до 12000-15000 м³/га, а ежегодные дозы

минеральных удобрений (NPK) увеличились с 50-100 кг/га до 300-500 кг/га. В 1980х годах количество азота, применяемого на хлопковых полях, выросло до 250 кг/га (по сравнению с дозой для зерновых равной 50 кг/га), а количество пестицидов увеличилось до 20-40 кг/га в год (Самойленко и др., 1987). Тем не менее, с 1970х годов урожай хлопка начал постепенно снижаться. Возникла проблема загрязнения орошаемых почв пестицидами. С 1980х годов более 75% всей орошаемой площади бассейна имели высокий уровень загрязнения почв пестицидами, 40-50% орошаемых земель имели очень высокую концентрацию пестицидов в почвах, превышающую допустимые уровни в 3-17 раз (Якубова, 1977). Загрязнение поверхностных и грунтовых вод усилилось в средней части и еще более сильно в нижней части бассейна Аральского моря. Было замечено, что в нижней части бассейна концентрация пестицидов в мясе домашних животных превышало допустимый уровень в 8 раз, а в овощах - в 16 раз (Якубова, 1977; Безуглый и др., 1987; Нестеров, 1990).

Число серьезных заболеваний, таких как вирусный гепатит, брюшной тиф, рак пищевода и т.д., увеличилось в 5-30 раз в 1960х-1980х годах в нижней части бассейна. Младенческая смертность там удвоилась. Чрезвычайно серьезные проблемы со здоровьем возникли в Каракалпакской Автономной Республике Узбекистана, которая находится в прибрежной зоне Аральского моря. С 1980х годов заболеваемость желчекаменной болезнью и раком пищевода выросла в 8-10 раз, сердечная и почечная заболеваемость выросла примерно в 2 раза. Соленость материнского молока превышала допустимый уровень в 3-4 раза (Безуглый и др., 1987; Нестеров, 1990). В районах, близких к бывшему Аральскому морю, возник ряд респираторных заболеваний из-за выдувания соли и пыли с высохшего морского дна.

Основными причинами экологического кризиса, по-видимому, являются следующие:

- (а) Чрезмерный рост орошаемой площади.
- (б) Неэффективное водопользование.
- (в) Загрязнение речных вод и их использование для орошения и бытовых нужд населения.
- (г) Плохие санитарные условия жизни человека.

Например, в Узбекистане (где проживает более 60% всего населения бассейна Аральского моря, и который занимает основную часть его территории) 70% больниц не имели трубчатых систем канализации, а 80% из них не имели горячей воды (Безуглый и др., 1987).

Рост площади орошения и неэффективное водопользование привели к необходимости строительства дренажа и отведения огромного количества сельскохозяйственных дренажных вод. Раньше предполагалось, что дренаж предотвратит не только засоление почвы и подтопление, но также приведет к рассолению грунтовых вод. Таким образом, пресные грунтовые воды могли бы частично использоваться для субиригации. Предполагалось также, что повторное использование для орошения дренажных вод, смешанных с речными водами, увеличило бы эффективное использование ограниченных водных ресурсов. Однако оказалось, что концентрация солей в дренажных водах не сильно изменилась. Загрязненные речные воды и водоносные горизонты использовались не только для орошения, но и для бытовых нужд. Это привело к росту числа тяжелых заболеваний среди населения. Подъем соленых грунтовых вод на орошаемых землях привел к необходимости увеличения оросительных норм для предотвращения засоления почвы, несмотря на строящийся дренаж. Наряду с низкой эффективностью оросительных систем, плохим контролем водопользования и ростом площади орошаемых земель, произошло истощение водных ресурсов, исчезновение Аральского моря, рост площади засоления сельскохозяйственных земель и некоторые другие негативные последствия.

Основные пути снижения побочных эффектов избыточного орошения

Масса предложений по решению проблемы бассейна Аральского моря было сделано большим числом специалистов из различных стран. Вот некоторые из них:

- (а) Необходимо очистить питьевую воду, чтобы снизить частоту заболеваний людей в районах, расположенных в низовьях рек Амударьи и Сырдарьи.

(б) Необходимо уменьшить потери воды на фильтрацию из оросительных каналов и на глубокое просачивание по почвенному профилю и строго контролировать потребление воды в сельском хозяйстве.

(б) Необходимо снизить потребление воды, сделав следующее:

- уменьшить площади орошения (прежде всего на землях с низкой продуктивностью и с определенными трудностями мелиорации земель);
- создавать предприятия с меньшим водопотреблением для трудоустройства людей и экономии воды;
- уменьшить площадь выращивания хлопка;
- выращивать сельскохозяйственные культуры с меньшим водопотреблением;
- шаг за шагом улучшать технику и технологию орошения, заменив поливы по бороздам и полосам на более совершенные методы (на дождевание, капельное орошение, микродождевание и т.д.), при которых вода используется с большей эффективностью и с меньшей потерями на глубокое просачивание на полях. Изменение технологии орошения приведет к необходимости реконструкции дренажа. Реконструкция сетей оросительных каналов, технологии их управления, техники и технологии орошения, а также дренажных сетей должна уменьшить коллекторно-дренажный сток.

(в) Коллекторно-дренажные воды не следует смешивать с речной водой. Они должны быть направлены в Аральское море или в естественные впадины.

(г) Аральское море не может быть восстановлено. Однако для экономии воды необходимо ежегодно снабжать его 20-30 км³ воды, включая дренажные воды в качестве основного компонента. Необходимо использовать специальные методы (например, каскад земляных плотин и участки между ними, периодически затопляемые поступающими водами), чтобы предотвратить вынос ветрами песка, пыли и соли с высохшего дна моря. Опыт Казахстана показал, что за счет строительства земляных плотин и затопления огороженных территорий можно постепенно улучшать состояние определенных участков моря. Казахстанский опыт показал, что за счет строительства дамб и отгороженных территорий можно постепенно улучшить состояние отдельных участков моря.

Деградация почв в результате избыточного орошения

Орошение увеличивает продуктивность сельскохозяйственных земель и неизбежно влияет на свойства почвы. Орошение может увеличить плодородие почвы, но также может снизить его. Процесс изменения свойств почвы, как правило, довольно медленный, измеряется в течение нескольких и даже десятков лет (Arnold *et al.*, 1990; Schlesinger and Bernhardt, 2013). Известно, что сельскохозяйственная деятельность изменяет естественные процессы почвообразования и влияет на плодородие почвы. Орошение усиливает процессы почвообразования, но также вызывает выщелачивание химических элементов из почвы. Степень влияния орошения на почву связано с типом землепользования, применяемой практикой агротехнического обслуживания посевов сельскохозяйственных культур, а также с технологией орошения и качеством оросительной воды. При использовании на орошение воды хорошего качества и отсутствии проблем засоления, осолонцевания или загрязнения почв и отсутствия эрозии почв, как правило, ожидается постепенное увеличение или, по крайней мере, сохранение их плодородия (Hagan *et al.* 1987; Molden, 2007). Тем не менее, есть публикации, указывающие, что длительное чрезмерное орошение пресной воды в различных климатических условиях может привести к постепенному ухудшению основных свойств орошаемых почв и снижению их плодородия, даже если не наблюдается ни эрозии их, ни засоления, ни загрязнения. Это происходит из-за вымывания органического вещества (в русскоязычной литературе вместо термина «органическое вещество» используется термин «гумус») и ряда полезных обменных катионов в глубокие слои почвенного профиля ниже корнеобитаемой зоны.

Традиционно, режимы орошения и оросительные нормы определяются в зависимости от потребностей сельскохозяйственных культур в воде, особенностей их развития, применяемой агротехники, гидрофизических свойств почв и наличия и качества водных ресурсов.

Положительное влияние орошения на плодородие почв связано с увеличением их влажности, интенсификацией микробиологической и макробиологической активности, накоплением органического вещества (ОМ), увеличением емкости катионного обмена (СЕС) и повышением эффективности использования органических и минеральных удобрений (Айдаров, 1985; Baldock *et*

al., 2000; Oriola, 2003; Schjonning *et al.*, 2004; Айдаров и Никольский-Гаврилов, 2016). Следует отметить, что *ОМ* является основным фактором естественного плодородия почв.

Негативное воздействие орошения на почву обычно связано с ее водной эрозией, использованием воды плохого качества (с высокой минерализацией или плохого химического состава, а также очищенных или неочищенных сточных вод), с засолением или осолонцеванием почвы. Существуют различные рекомендации по снижению риска загрязнения почв и растений, предотвращения засоления и осолонцевания почв и возможного снижения продуктивности орошаемых земель (Айдаров, 1985; Alguacil del Mar *et al.*, 2012; Artigao *et al.*, 2002; Skaggs and van Shilfgaarde, 1999).

Исследования по влиянию многолетнего орошения водой хорошего качества на плодородие почв, к сожалению, немногочисленные и неоднородные по целям и методам, проводились в Северной и Южной Америке, Европе, России, Юго-Восточной Азии (в основном в Китае и Индии), Израиле, Северной Африке, Австралии, Новой Зеландии, но не носили системного характера и не были обобщены.

Например, исследования, проведенные в Калифорнии и Аризоне, США, в аридном и полуаридном климате, показали, что традиционное поверхностное самотечное орошение пресной водой хорошего качества супесчаных и суглинистых известковых почв в течение 90 лет привело к снижению их плодородия. В частности, было отмечено снижение содержания органического углерода (*ОС*), как основного компонента *ОМ*, на 56-62% в слое почвы 0-30 см по сравнению с неорошаемыми почвами в результате вымывания *ОС* в глубокие слои почвенного профиля (Eshel *et al.*, 2007; Artiola and Walworth, 2009). Почва была слабощелочной с $pH = 7-8$. Вода для полива была хорошего качества с общим содержанием растворенных веществ (*TDS*) 0,1 - 0,6 г/л и с электропроводностью (*ЕС*) 0,2 - 1 ds/m (децисименс на метр). Было также отмечено, что наибольшее снижение *ОС* и *ОМ* соответствует орошению водой с *TDS* менее 0,2 г/л или *ЕС* менее 0,3 ds/m по сравнению с водой большей минерализации. Присутствие ионов натрия (*Na*) значительно увеличило выщелачивание *ОС* и *ОМ*. Степень выщелачивания *ОС* и *ОМ* сильно коррелирует с растворимостью карбонатов почвы. Небольшое увеличение содержания ила (до 5%) также наблюдалось при длительном избыточном орошении пресной водой.

Getahun *et al.* (2011) изучал влияние орошения пресными водами в течение 20-30 лет на супесчаных, суглинистых и глинистых почвах Эфиопии. Эти почвы сформированы в условиях полугумидного и гумидного климатов со среднегодовой суммой осадков 850-2000 мм и сравнительно интенсивного просачивания воды в глубокие слои почвенного профиля. В слое 0-20 см почв $pH = 5-7$, *СЕС* = 30-50 смоль(+)/кг. Поливная вода имела *TDS* = 0,1-0,7 г/л и *ЕС* = 0,2-0,9 ds/m. Орошение и усиленное промывание почв оказало различное на них влияние в зависимости от их текстуры и минерализации поливной воды. В супесчаных и суглинистых почвах многолетнее орошение привело к уменьшению содержания *ОМ* в 1.2-1.5 раз. В глинистых почвах орошение привело к увеличению *ОМ* в 1,-2 раза. Содержание доступной растениям формы фосфора (*P*), обменного магния (*Mg*) и плотность почвы увеличились на всех участках. Содержание обменного кальция (*Ca*) и *СЕС* заметно уменьшились на участках, где *ЕС* поливной воды было меньше 0,3 ds/m и слегка увеличилось, где *ЕС* = 0,9 ds/m. Не отмечено заметное изменение pH почвы на всех участках.

В Новой Зеландии установлено, что в районах с полугумидным и гумидным субтропическим климатом со среднегодовыми осадками 600-1600 мм даже капельное орошение садов дождевой водой в течение 18 лет привело к снижению содержания *ОС* в слое 0-15 см песчаных почв с 5,4 до 5,1 г/кг и *СЕС* с 3.8 до 2.9 смоль(+)/кг (Siggins *et al.*, 2016).

В Индии в районе полугумидного тропического климата с осадками 1100 мм/год самотечное орошение овощей пресной речной водой на супесчаных почвах в течение 15 лет привело к снижению содержания *ОС* в слое 0-22.5 см с 6.6 до 5.0 г/кг и *СЕС* с 21.2 до 16.0 смоль(+)/кг (Ghosh, Bhatt, Agrawal, 2011).

В степной зоне России с годовым количеством осадков 300-650 мм также изучалось влияние многолетнего орошения пресной водой самотечным способом и дождеванием на черноземные и каштановые почвы. Вода для орошения имела общую минерализацию *TDS* = 0,4-0,7 г/л и *ЕС* = 0,3-0,4 ds/m (Айдаров, 1985; Айдаров и др., 2012). Результаты показали, что орошение черноземных и

каштановых почв пресной водой в течение 20 лет ухудшило плодородие почв. Изменения свойств черноземов и каштановых почв в слое 0-20 см были следующими:

- Снижение содержания *OM* с приблизительно 6,7 и 2,7 до 5,9 и 2,3% в черноземах и каштановых почвах, соответственно;
- Увеличение содержания фульвокислот, как легко растворимого и выщелачиваемого компонента *OM*; соотношение между относительно малоподвижными гуминовыми кислотами (*HA*) и фульвокислотами (*FA*) уменьшилось с 1,0 и 1,2 до 0,6 и 0,8 соответственно;
- Снижение *СЕС*, накопление *Na*, *Mg* и снижение *Ca*;
- Снижение содержания доступных растениям элементов минерального питания;
- Увеличение плотности почвы.

Увеличение годовой оросительной нормы привело к более интенсивному глубокому просачиванию воды по профилю почвы с 0,14-0,17 до 0,30-0,40 от среднегодовой водоподачи (оросительная норма *Ir* плюс осадки *Pr*) и к следующим последствиям через 20 лет:

- Вымывание *OM* в глубокие слои почвы увеличилось с 5-10% до 30-40% от его исходного содержания;
- *СЕС* снизился на 2-5% и 15-20% соответственно по сравнению с его значением до орошения;
- Содержание *Na* и *Mg* в *СЕС* увеличилось в два раза; *Ca* уменьшился в 1,5 раза.

Специальные полевые эксперименты по выяснению влияния оросительной нормы на вымывание *OC* в супесчаных почвах, классифицируемых как кварцевый неозол (Diogenes *et al.*, 2017), были проведены в Бразилии. Основные свойства почвы в слое 0-20 см были следующими: *OM* = 0,37%, *СЕС* = 3,19 смоль (+) кг-1; *pH* = 5; поглощенные основания (в процентах от их общего количества): *Ca* = 18%, *Mg* = 12%, *Na* = 1%, *K* = 4%. Климат полусухой со среднегодовым количеством осадков *Pr* = 900 мм. Орошение проводилось в сухой период года нормой (*Ir*) 108, 215, 288 и 426 мм на разных участках, что соответствовало пропорционально 0,3, 0,6, 0,9 и 1,2 от потенциальной эвапотранспирации. Сельскохозяйственная культура – вигна или коровий горох (*Vigna sinensis* Edl.). Результаты показали, что ежегодное внесение каждого 1 мм поливной воды в этих условиях приводило к накоплению *OC* около 8 кг га⁻¹ год⁻¹ за счет растительных остатков. По мере увеличения нормы орошения усиливалось ежегодное разложение и вымывание *OM*, несмотря на рост биомассы растительных остатков. По мере увеличения нормы орошения интенсивность вымывания *OC* постепенно увеличивалась примерно до 23% от его первоначального содержания. В целом баланс *OC* был положительным: конечное содержание *OC* было больше, чем в начале для всех норм орошения, за исключением вариантов, когда норма орошения была равна или превышала потенциальную эвапотранспирацию.

Влияние многолетнего орошения пресными водами на плодородие почв в различных климатических зонах оценивалось также в Мексике путем статистического сравнения региональных свойств почв, орошаемых в течение более 50 лет, и неорошаемых целинных почв. Орошаемые и неорошаемые почвы расположены на ровных, геоморфологически однородных территориях с уклоном поверхности менее 1%. Грунтовые воды расположены достаточно глубоко, глубже 5 метров. Основной техникой орошения является самотечное поверхностное. Оно применяется на более чем 85% общей площади орошаемых земель. Основным источником орошения являются поверхностные воды из водохранилищ, расположенных в горных районах. Эти водохранилища обеспечивают водой более 80% всей орошаемой площади страны. Типичное качество поверхностных вод хорошее.

Среднегодовые климатические условия характеризуются отношением значений потенциальной эвапотранспирации (*ET*) к слою осадков (*Pr*). В тропической гумидной зоне отношение *ET/Pr* приблизительно менее 0,7; в полугумидной и полуаридной зонах соотношение *ET/Pr* изменяется от 0,7 до 1,0 и от 1,0 до 3,0 соответственно; в аридной зоне *ET/Pr* более 3,0.

Сравниваемые орошаемые и неорошаемые земли не имеют проблем ни с водной или ветровой эрозией, ни с засолением, ни с осолонцеванием почв. Сравнивалось плодородие орошаемых и неорошаемых целинных почв во гумидной тропической, полугумидной, полуаридной и аридной зонах Мексики (Никольский и др., 2019).

Почвы, в основном, представляют собой Файоземы в полуаридных и полугумидных регионах центральной части страны, Ксеросоли (или Кальцисоли) и Рендзины (Лептосоли), Кастаноземы в

аридных и полуаридных регионах центральной и северной части, и Лювисоли и Вертисоли (FAO, 2015) в регионах с умеренным и тропическим гумидным климатом в центральной и юго-восточной части. Мощность почвенного покрова обычно превышает 1,5 м, все почвы имеют хороший сельскохозяйственный потенциал, высокую насыщенность обменными основаниями и наличие стабильных агрегатов. В Рендзинах преобладают катионы кальция в поглощающем комплексе. Вертисоли – это глинистые почвы, которые характеризуются набуханием и усадкой, при ежегодном увлажнении и высыхании почвы, в результате чего образуются трещины в почвенном профиле. Проблемы засоления или осолонцевания почв на анализируемых территориях нет; также нет проблемы эрозии почв.

Исследования в Мексике показали следующее (SEMARNAT-CP, 2002; Ortiz-Solorio, 2011; Никольский и др., 2019):

1. Многолетнее избыточное орошение пресной водой может привести к снижению плодородия почв в различных климатических условиях из-за вымывания органического вещества в глубокие слои почвенного профиля. Такой эффект характерен для почв с относительно высокой влагопроводностью: в основном, для почв песчаных, супесчаных и суглинистых. Потеря плодородия почв в Мексике происходит примерно на $1,6 \cdot 10^6$ га или на 20% орошаемых земель.

2. Наблюдаемый эффект снижения плодородия почв при длительном чрезмерном поливе пресной воды характерен для почв с относительно высокой проницаемостью, и в основном с песчаной, супесчаной и суглинистой текстурой.

Можно предположить, что для сохранения плодородия почвы необходимо снизить интенсивность глубокого просачивания воды по профилю почвы на орошаемых землях. Это может быть достигнуто путем улучшения техники и технологии орошения. Во влажных тропических условиях, где также отмечается отрицательное действие орошения на плодородие почвы, целесообразно увеличить поверхностный сток дождевых вод путем применения поверхностного дренажа, выравнивания поверхности сельскохозяйственных земель и других мер.

3. Содержание органического вещества (*ОМ*) в орошаемых почвах после более чем 50-летнего орошения значительно меньше, чем в неорошаемых почвах в полуаридных и полугумидных климатических зонах Мексики, где отношение *ET/Pr* составляет, соответственно, примерно 0,7 и 2,0. Наиболее значительная потеря *ОМ* наблюдается в полугумидной зоне, где отношение *ET/Pr* составляет от 0,7 до 1,0. Потеря *ОМ* наблюдается также тропической гумидной зоне, но в меньшей степени, чем в полугумидной и полуаридной климатических зонах. Основной причиной потери органического вещества и плодородия почв при длительном чрезмерном орошении пресной воды является изменение исторических условий почвообразования. Увеличение содержания влаги в почве порождает ряд взаимосвязанных почвенных процессов, включая интенсификацию микробиологической активности, повышение растворимости и подвижности органических соединений, увеличение интенсивности глубокого просачивания поливных и дождевых вод по почвенному профилю ниже корневой зоны, вымывание минеральных и органических веществ и т. д. Наиболее интенсивное ежегодное просачивание воды по почвенному профилю происходит на орошаемых участках в полугумидных и гумидных условиях, где просачивание поливной воды добавляется к естественному ежегодному просачиванию дождевой воды. Во влажной тропической зоне орошение применяется в сухое время года. Поэтому вклад орошения в изменение среднегодовой интенсивности естественного просачивания дождевой воды значительно меньше, чем в полугумидной зоне. В полуаридной и аридной зонах вероятность совпадения орошения и осадков меньше, чем в полугумидных условиях. Поэтому среднегодовая интенсивность глубокого просачивания воды по почвенному профилю там меньше, чем в полугумидных условиях. Количество органического вещества, вымываемого из верхнего слоя почвы в глубокие слои, пропорционально интенсивности глубокого просачивания воды и содержанию органического вещества в верхнем слое почвы. Применение повышенных доз минеральных удобрений в орошаемых почвах снижает *pH* почв и часто усиливает вымывание *ОМ* (Black, 1968; Schlesinger and Bernhardt, 2013; Strawn *et al.*, 2015).

Учитывая, что *ОМ* является основным компонентом плодородия почв, от которого зависит продуктивность орошаемых земель, можно сделать вывод, что чрезмерное орошение наиболее заметно влияет на плодородие почв в полугумидных и полуаридных условиях.

В аридной зоне содержание *ОМ* в орошаемых почвах примерно вдвое больше, чем в неорошаемых. Это можно объяснить тем, что в годовом балансе органического вещества орошаемых почв в этой

зоне по сравнению с другими количество новообразованной органической массы превышает ее уменьшение в результате минерализации и вымывания в глубокие слои почвенного профиля.

Важно отметить, что процесс деградации почвы при многолетнем чрезмерном орошении пресной воды происходит как в развивающихся, так и в развитых странах. Термин «чрезмерное орошение» связан, главным образом, с несовершенной техникой и технологией полива и, следовательно, с чрезмерным использованием воды. Непосредственной причиной деградации орошаемых почв является нарушение естественных биохимических процессов. Известно, что биологическая продуктивность сельскохозяйственных растений и их потребление почвенных питательных веществ значительно выше, чем у естественных растений. Однако до 80% биомассы сельскохозяйственных растений удаляется с поля вместе с урожаем. Поэтому отрицательный баланс органического вещества формируется даже при богарном земледелии. Орошение усиливает вымывание органического вещества и элементов минерального питания из почвы. Для естественных растительных сообществ характерно равновесие или даже небольшой избыток растительных остатков, поступающих в почву, по сравнению с их разложением и удалением. Недооценка проблемы возможной деградации орошаемых почв, по-видимому, объясняется тем, что процессы деградации протекают медленно в течение десятилетий. Поэтому мало внимания уделяется этой проблеме. Между тем, необходимо учитывать, что почва является исчерпаемым природным ресурсом, который в масштабе жизни одного поколения практически не возобновляется.

Заключение

1. Во всем мире на орошение расходуется более 80% общего потребления воды человеком. Считается, что вода является возобновляемым природным ресурсом. Действительно, годовые осадки пополняют запасы поверхностных и подземных вод. Тем не менее, орошение значительно увеличивает потери воды в атмосферу при испарении с орошаемых земель и построенных водохранилищ. Кроме того, часть пресной воды, отобранной у природы и используемой для орошения, возвращается в окружающую среду в виде сточных вод, загрязненных остатками удобрений, пестицидов, возможно, также токсичных солей почвы. Поэтому природная пресная вода, используемая для сельскохозяйственного орошения, является лишь частично возобновляемым и истощаемым природным ресурсом.

2. Избыточное орошение относится, главным образом, к поверхностному самотечному орошению по бороздам, полосам и затоплением, которое является наиболее распространенным в мире, особенно в регионах без существенного ограничения имеющихся водных ресурсов. Такое орошение характеризуется несовершенством техники и технологии полива и часто сопровождается несовершенным состоянием сети распределительных каналов, когда они не имеют противофильтрационной одежды для предотвращения потерь воды.

3. Чрезмерное орошение может привести к следующим негативным последствиям:

- К чрезмерному водозабору из природных источников поверхностных и подземных вод, большим потерям воды в результате фильтрации из оросительных каналов (особенно из небольших), глубокого просачивания воды по профилю почвы и поверхностного стока на орошаемых землях.

- К истощению и загрязнению естественных поверхностных вод (рек, ручьев, озер, эстуариев) и ухудшению их экосистем, а также, возможно, здоровья людей из-за стока остатков пестицидов и удобрений с орошаемых сельскохозяйственных земель.

- К повышению уровня грунтовых вод, подтоплению и/или засолению почв, накоплению токсичных веществ в почвах и грунтовых водах. К понижению уровня подземных вод, истощению водоносных горизонтов и даже оседанию поверхности земли, когда подземные воды чрезмерно используются для орошения.

- К постепенной (в течение десятилетий) деградации почв, длительно орошаемых даже пресной водой, к потере их плодородия и снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

- К ухудшению состояния окружающей среды на водосборах и благосостояния населения.

4. Необходимо совершенствовать технику и технологию орошения с учетом не только потребности растений в воде, но и необходимости сохранения плодородия почвы и защиты окружающей среды.

Литература

- Айдаров И.П. 1985. *Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель*. Агропромиздат, Москва, 304 стр.
- Айдаров И.П., Голованов А.И., Никольский Ю.Н. 1990. *Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель*. Агропромиздат, Москва, 60 стр.
- Айдаров И.П. 2010. Пути решения региональных водных проблем, используя пример Аральского бассейна. *Мелиорация и водное хозяйство*, 5: 43-48.
- Айдаров И.П. 2012. *Экологические основы мелиорации земель*. Изд. МГУП, Москва, 178 стр.
- Айдаров И.П., Никольский-Гаврилов Ю.Н. 2016. Моделирование и его применение для интерпретации качества почв. *In: Lucke, B., Bäumler, R., Schmidt, M. (eds.). Soils and Sediments as Archives of Landscape Change, Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics*. Publ. Selbstverlag der Fränkischen Geographischen Gesellschaft in Kommission bei Palm&Enke, chapter 42: 329-348, Germany.
- Аверьянов С.Ф. 2015. *Управление водным режимом мелиорируемых сельскохозяйственных земель*. Изд. РГАУ, Москва, 523 стр.
- Безуглый В.П., Барда Л.К., Горская Н.З. 1987. Роль пестицидов в болезнях людей в жарком климате. *In: Гигиенические и биологические аспекты применения пестицидов в Центральной Азии и Казахстане*. Душанбе, стр. 254-286
- Нестеров Е.А. 1990. В зоне экологического кризиса. *Мелиорация и водное хозяйство*, 2.
- Никольский Ю.Н., Айдаров И.П., Ландерос-Санчес С., Пчелкин В.В. 2019. Влияние многолетнего орошения пресными водами на плодородие почв. *Journal of Irrigation and Drainage*, 68(5): 993-1001. DOI: 10.1002/ird.2381
- Разаков Р.М. 1990. Исследования и программы по улучшению экологической ситуации в прибрежной зоне Аральского моря. *Мелиорация и водное хозяйство*, 1: 6-8.
- Решеткина Н.М. 1991. Бассейн Аральского моря – самоуправляемая система. *Мелиорация и водное хозяйство*, 10: 13-18.
- Самойленко В., Якубова Р., Кахаров А. 1987. *Защита подземных вод от загрязнения пестицидами*. Изд. Мехнат, Ташкент, 189 стр.
- Волынов А.В., Забелин В.А., Кияткин А.К., Лунежкова М.С. 1980. *Орошение в Центральной Азии*. Изд. Колос, Москва.
- Якубова Р.А. 1977. *Природные воды Узбекистана и защита их от загрязнения пестицидами*. Изд. ФАН, Ташкент.
- Зонн И.С., Гланц М.Г. 2008. *Аральская энциклопедия*. Изд. Международные отношения, Москва, 256 стр.
- Alguacil del Mar, M., Torrecillas E., Torres P., Garcia-Orenes F., Roldan A. 2012. Long-term effects of irrigation with waste water on soil fungi diversity and microbial activities: the implications for agroecosystem resilience. *PLoS ONE* 7(10): 1-7. DOI: 10.1371/journal.pone.0047680.
- Angulo, C. 2004. El delta del río Colorado, situación crítica. Available in: <http://dignidadysupervivencia003.blogspot.com/>
- Arnold, R.W., Szabolcs, I., Targulian V.O. (Edits). 1990. *Global Soil Change*. IASA Publ., Laxenburg, Austria.
- Artigao, A., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., Juan, J.A. 2002. The impact of irrigation application upon soil physical degradation in Castilla-La Mancha (Spain). *Advances in Geocology* 35: 83-90.
- Artiola, J.F., Walworth, J.L. 2009. Irrigation water quality effects on soil carbon fractionation and organic carbon dissolution and leaching in a semiarid calcareous soil. *Soil Science* 174(7): 356-371. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181aea7b4
- Baldock, D., Caraveli, H., Dwyer, J., Einschütz, S., Petersen, J.E., Sumpsi-Vinas, J., and Varela-Ortega, C. 2000. *The Environmental Impacts of Irrigation in the European Union*. Publ. Institute for European Environmental Policy, London.
- Black, C.A. 1968. *Soil-plant relationships*. Second edition. Publ. Wiley Publ., New York.

- Cohen, M.J., Henges-Jeck, C., Castillo-Moreno, G. 2001. A preliminary water balance for the Colorado River delta, 1992–1998. *Journal of Arid Environments*, 49(1): 35-48. Available in: <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0834>
- CONAGUA. 2017. *Estadísticas del Agua en Mexico*. Publ. Comisión Nacional del Agua. Available in: <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-del-agua-en-mexico-edicion-2016/>
- Diogenes, L.C., Filho, J.F.L., Da Silva A.F.T., Nobrega J.C.A., Nobrega R.S.A., Filho J.I., De Andrade Junior A.S. 2017. Microbial activities, carbon, and nitrogen in an irrigated Quartzarenic Neosol cultivated with cowpea in southwest Piauí. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4(3): 348-354. DOI: 10.5433/1679-0359.2017v38n4p1765
- Eshel, G., Fine, P., Singer, M.J. 2007. Total soil carbon and water quality: an implication for carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal* 71(2): 397-405. DOI:10.2136/sssaj2006.0061.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1980. *Drainage design factors*. Irrigation and Drainage Paper, No. 38, Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Res. Rep. No. 103. Publ. IUSS Working Group WRB, Rome, Italy.
- FAOSTAT. 2019. *World Food and Agriculture. Statistical Pocketbook*. Publ. FAO, 248 p.
- García-Hernández, J., King, K.A., Velasco, A.L., Shumilin, E., Mora, M.A., Edward, P. Glenn, E.P. 2001. Selenium, selected inorganic elements, and organochlorine pesticides in bottom material and biota from the Colorado River delta. *Journal of Arid Environments*, 49(1): 55-89. Available in: <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0836>
- Getahun, M., Adgo, E., Atalay, A. 2011. Impacts of irrigation on soil characteristics of selected irrigation schemes in the Upper Blue Nile. In: A.M. Melesse (Ed.), *Nile River Basin. Hydrology, Climate and Water Use*, Springer Science+Business Media Publ., London, UK - New York, USA, Chapter 19: 383-389. DOI 10.1007/978-94-007-0689-7_19.
- Ghosh, A.Kr., Bhatt, M.A., Agrawal, H.P. 2011. Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. *Environ. Monit. Assess.* 184: 1025-1036. DOI 10.1007/s10661-011-2018-6
- Hagan, R.M., Haise, H.R., Edminster, T.W. (Eds.). 1987. *Irrigation of Agricultural Lands*. Am. Soc. Agron. Publ, No. 11, Madison, USA.
- Micklin, Ph. 2007. The Aral Sea Disaster. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 47-72.
- Molden, D. (Ed). 2007. *Water for food, Water for life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan/IWMI Publ., London/Colombo.
- Oriola E.O. 2003. Effects of irrigation on soils of a sub-humid part of Kwara state, Nigeria. *Centrepoin (Science Edition)* 12: 52-62.
- Samaniego-Lopez M.A. 2008. El control del río Colorado como factor histórico. La necesidad de estudiar la relación tierra/ agua. *Frontera Norte*: 20(40). Available in: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73722008000200002
- Schlesinger W.H., Bernhardt E.S. 2013. *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. Academic Press Elsevier Publ., USA-UK.
- Schjonning P., Elmholt S., Christensen B.T. (Eds.). 2004. *Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture*. CABI Publ., Wallingford, UK; Cambridge, USA.
- SEMARNAT-CP. 2002. *Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana*. Memoria Nacional. Publ. Diamante, Edo. de Mexico, Mexico.
- Siggins, A., Burton, V., Ross, C., Lowe, H., Horswell, J. 2016. Effects of long-term greywater disposal on soil: A case study. *Science of the Total Environment* 557–558: 627–635. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.084)
- Skaggs, R.W., van Shilfgaarde, J. (Eds). 1999. *Agricultural Drainage*. Agronomy Publ., 38, Madison, Wisconsin, USA.
- Stockle C.O. 2012. *Environmental impact of irrigation: review*. Washington State Univ. Publ., USA, 15 p. Available in: https://www.researchgate.net/publication/252698502_ENVIRONMENTAL_IMPACT_OF_IRRIGATION_A_REVIEW
- Strawn, D.G., Bohn, H.L., O'Connor, G.A. 2015. *Soil Chemistry*. John Wiley & Sons Publ., UK, 357 p.

Varady R.G., Hankins K.B., Kaus A., Young E., Merideth R. 2001. ...to the Sea of Cortés: nature, water, culture, and livelihood in the Lower Colorado River basin and delta—an overview of issues, policies, and approaches to environmental restoration. *Journal of Arid Environments*, 49(1): 195-209. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0842>