

## 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ЗАСОЛЕНИЯ, ОЩЕЛАЧИВАНИЯ И СОДОПРЯВЛЕНИЯ В ОРОШАЕМЫХ ПОЧВАХ

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ ПРИ ОРОШЕНИИ<sup>1</sup>

#### Введение

По данным ФАО<sup>2</sup>, население земного шара очень быстро растет и за последние 15 лет увеличилось на  $\frac{1}{3}$ . В то же время около 75% населения (исключая население индустриально развитых стран) страдает от голода. В связи с этим в мире усиленно изучается потенциальная биологическая продуктивность нашей планеты. И если для увеличения продуктов питания в ряде стран в первой половине века главное внимание уделялось химизации, то во второй половине века – ирригации. В настоящее время орошается шестая часть пахотных земель мира (225 млн. гектаров). Причем к ирригации прибегают не только в странах с сухим климатом, где без орошения земледелие практически невозможно, но и в странах с достаточным увлажнением (например, в Англии, Голландии и др.), где с помощью ирригации получают устойчивые урожаи (С.А. Гиршкан, 1969).

В Советском Союзе для удовлетворения возрастающей потребности населения в продуктах питания, а промышленности в сырье намечена грандиозная программа работ по мелиорации земель, которой предусмотрено создание трех районов гарантированного урожая зерновых культур – на Украине, Поволжье и Северном Кавказе. К концу четвертого года пятилетки на Украине введено в эксплуатацию 1,3 млн. гектаров орошаемых земель. Производство зерна на этих землях в девятой пятилетке должно достичь 10–12 млн. тонн.

Курс на ирригацию в стране оправдался уже в первые годы. Так, в Крымской области за 1966–1970 гг. урожай зерновых составил в среднем 45,1 ц/га, в том числе озимой пшеницы 41,3 и риса 53,9 ц/га. За этот же период в совхозе «Комсомольский» Херсонской области урожай озимой пшеницы достиг 52,6 ц/га, а в совхозе «Авангард» Николаевской области – 52,7 ц/га. В целом

---

<sup>1</sup> Опубликовано в монографии «Прогнозирование вторичного засоления почв при орошении». Киев, изд. «Урожай», 1975, 184 с. Из этой книги в данный сборник помещены: введение, глава II и выводы.

<sup>2</sup> ФАО – секция ЮНЕСКО, занимающаяся вопросами продовольствия и сельского хозяйства.

во многих хозяйствах юга Украины урожай озимой пшеницы и риса достиг проектного уровня, по другим культурам урожаи пока ниже проектных.

Некоторые организационные и эксплуатационные недостатки, а также не вполне благоприятные природные условия в какой-то мере сдерживают получение ожидаемого эффекта от орошения на части площади. В известной степени это закономерно, ибо мировой практикой ирригации установлено, что орошение земель засушливых областей представляет собой исключительно сложную проблему и прежде всего потому, что эти территории нередко приурочены к бессточным низменностям, испытавшим засоление в прежние геологические эпохи, а поступление огромных количеств воды при ирригации нарушает сложившийся водно-солевой баланс и ведет к повышению уровня грунтовых вод, заболачиванию и вторичному засолению.

В настоящее время вторичное засоление проявляется в огромных размерах на орошаемых землях Пакистана, Ирака, Сирии, Китая, Египта и других стран.

Вторичное засоление не только приносит огромный материальный ущерб, но и портит природу земного шара. И в этом аспекте вопросы правильного выбора территории под орошение, прогнозирования и предотвращения вторичного засоления и рационального использования почв при ирригации выходят за рамки чисто научных и даже национальных интересов, приобретая, в известной мере, международное значение.

С особой остротой эти вопросы возникли на Украине, где ранее не было опыта широкого орошения. Здесь на впервые построенных системах произошло некоторое ухудшение мелиоративной обстановки. Возникла необходимость в реконструкции построенных и уточнении проектов новых оросительных систем. Потребовались более глубокие научные исследования с обстоятельным анализом исходных природных условий, учетом влияния первых лет орошения и прогнозом дальнейших изменений мелиоративной обстановки.

Одним из первых в эту работу включился Украинский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского. Еще задолго до широкой ирригации, в начале 50-х годов, автор данной книги начал изучать почвы Крымской области по вопросам, связанным с предстоящей ирригацией и повышением плодородия солонцовых почв.

В результате исследований было обнаружено резкое различие в водно-солевом режиме почв в зависимости от глубины грунтовых вод, которое послужило основой для разделения

почвенного покрова на луговые, лугово-степные и степные комплексы почв, что имело существенное значение при оценке возможности использования почв под орошение. Разделение почвенного покрова по степени гидроморфности отражено на ряде почвенных карт Крыма, в том числе и на последней, составленной почвоведом Крыма под нашей редакцией в масштабе 1 : 200000, а также на составленной нами карте степного Крыма в масштабе 1 : 750000, являющейся частью карты почв Украины.

Была также установлена своеобразная геохимическая зональность соленакопления, отраженная на первой карте типов засоленности почв степного Крыма, составленной в 1953 г. Эта карта использована при мелиоративном районировании и первых прогнозных расчетах, выполненных для проектирования орошения в пятидесятых годах (А. В. Новикова, 1958, 1959).

Поставленные автором в 1949 г. опыты по мелиорации солонцов в разных геоморфологических условиях Крыма, которые сопровождались изучением генезиса солонцов, позволили в короткий срок установить необходимость применения различных приемов повышения их плодородия, предложить их районирование (А. В. Новикова, 1962), а с 1959 г. по решению Крымского облисполкома их стали внедрять в производство.

С 1962 г. мы начали вплотную заниматься разработкой метода солевого прогноза на примере ряда участков Краснознаменного и Северо-Крымского массивов еще до начала их орошения (А.В. Новикова, 1964, 1967). В последующие годы на этих участках были организованы стационарные опыты, на которых велись наблюдения за фактическим изменением солевого состава почв и грунтовых вод при орошении.

Когда в последние годы возникла необходимость обоснования уточненного проекта орошения Северо-Крымской и переустройства Краснознаменной систем, то, располагая большим фактическим материалом личных исследований, исследований сотрудников руководимой лаборатории, а также фондовыми материалами ряда организаций, мы приступили к их обобщению, желая помочь проектирующей организации.

Известно, что качество проекта орошения в значительной мере определяется полнотой и глубиной предшествующих ему изысканий, в частности почвенно-мелиоративных. Недостаточная исходная характеристика объекта орошения нередко приводит к просчетам в проектировании и оборачивается в последующем большими затратами на переустройство оросительной сети и осуществление дополнительных мер по оздоровлению мелиоративной обстановки.

Поэтому сейчас, в период широкой ирригации в стране, особенно важно совершенствовать методы почвенно-мелиоративных исследований.

Возникнув в начале XX века на стыке почвоведения, гидрогеологии и гидромелиорации, мелиоративное почвоведение своим появлением было обязано работам В.С. Богдана (1900), С.А. Захарова (1905) и особенно Н.А. Димо (1910, 1911), который впервые при обследовании почв поставил цель получить оценку пригодности их под орошение и обосновать рациональное их использование. В 30-е годы в почвенной мелиорации формируются собственные методы исследований (Б.Б. Пологинов, 1930; С.В. Зонн, 1934; Н.А. Качинский, 1934; Л.П. Розов, 1936; В.А.Ковда, 1937; Д.Г. Виленский, 1937 и др.).

С конца сороковых годов в связи с развертыванием в стране ирригации усилилось внимание к почвенной мелиорации. Широкие региональные и стационарные исследования, результаты которых изложены в крупных обобщениях, вскрыли новые закономерности в системе почво-грунт – вода и дали возможность усовершенствовать методы почвенно-мелиоративных исследований (В.А. Ковда, 1946; А.Н. Розанов, 1946, 1959; В.Р. Волобуев, 1948; А.Т. Морозов, 1954; П.А. Летунов, 1958; В.В. Егоров, 1959; И.С. Рабочев, 1961; О.А. Грабовская, 1961; А.П. Бирюкова, 1962; Н.И. Базилевич, 1965; П.С. Панин, 1968; Н.Г. Минашина, 1970 и др.).

В настоящий период в связи с научно-техническим прогрессом почвенно-мелиоративная наука получает дальнейшее свое развитие благодаря использованию ряда методов смежных наук, а также успехов мелиоративного почвоведения. Так, появилась возможность количественно оценить не только общую, но и токсичную засоленность почво-грунтов; перейти от характеристики засоления по так называемым типичным разрезам к усредненной математически достоверной оценке засоления, основанной на использовании теории вероятности; вместо качественной характеристики степени естественной дренированности перейти к количественным показателям и т. д.

В работе над книгой автор стремился показать на примере юга Украины возможность применения более совершенных методов оценки пригодности территории для орошения, более широкого использования методов математической статистики в мелиоративном почвоведении, ознакомить с предложенным методом солевого прогнозирования и результатами расчетов, показать фактическое изменение обстановки в первое десятилетие

орошения и предложить мероприятия по предупреждению вторичного засоления и по рациональному использованию почв.

## ГЛАВА II

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ

#### Основные принципы существующих методов почвенно-мелиоративного прогнозирования

Проектирование оросительных мелиораций в нашей стране имеет довольно длительную историю. Однако до настоящего времени существенным недостатком как изыскательских работ на территории будущего широкого орошения, так и самих проектов, являлась поверхностная оценка возможного изменения мелиоративной обстановки в ходе ирригационной эксплуатации поливных массивов. Такую оценку делали на основании условий, предшествующих орошению. Как отмечает С.Ф. Аверьянов, «у многих почвоведов и гидрогеологов, которые дают заключение о пригодности земель для орошения и составляют их характеристики, прочно укоренилось ошибочное мнение, что описание существующих до орошения условий является вполне достаточным для обоснования проекта. По этим материалам делается районирование земель и качественно оценивается мелиоративное состояние последних. Поэтому часто создается впечатление о мнимом благополучии мелиоративного состояния земель, что приводит к серьезным ошибкам и необходимости в дальнейшем их исправления» (1965, стр. 95). И здесь же С.Ф. Аверьянов подчеркивает необходимость разработки специальных прогнозов, которые должны быть частью ирригационных проектов.

Со второй половины прошлого десятилетия положение в ирригационном проектировании сильно изменилось в лучшую сторону. Прогноз мелиоративной обстановки уже считается обязательной составной частью проекта. И все же научное прогнозирование почвенно-мелиоративной обстановки стало предметом настойчивых исследований лишь в последние годы. Раньше всего начали разрабатываться методы гидрогеологического прогноза, в становлении которых участвовали не только гидрогеологи, но и физики, математики. В результате этого к настоящему времени имеется целый ряд методов гидрогеологического прогноза (Д.М. Кац, 1969).

В разработке почвенно-мелиоративных прогнозов, которые стали изучаться позже, чем гидрогеологический прогноз, наметились следующие направления.

*Метод сравнительных почвенно-географических и почвенно-мелиоративных аналогий* базируется на использовании принципа экстраполяции (перенесения). Основан на изучении староорошаемых массивов и экстраполяции выводов об изменении почвенно-мелиоративных условий на территорию, намеченную под орошение.

*Балансовый метод* основан на расчетах баланса грунтовых вод, их состава и выноса солей в корнеобитаемую часть почвы на будущем орошаемом массиве (В.А. Ковда, 1947; Е.Л. Минкин, 1957; А.Т. Морозов, 1962; Н.М. Решеткина, 1965; Ф.И. Козловский, 1966).

*Аналитические методы* состоят в математическом описании процесса передвижения солей под влиянием конвективной диффузии и растворения (Н.Н. Веригин, 1953; С.Ф. Аверьянов, 1965; В.А. Барон, 1967; Л.М. Рекс, 1968; М.П. Чиркин, Д.Ф. Шульгин, 1967; В.И. Пеньковский, 1971 и др.). Методы позволяют рассчитать ожидаемое содержание солей только в первом приближении, поскольку не могут описать все процессы, которые совершаются при насыщении почво-грунтов грунтовыми водами.

*Метод моделирования* процессов перемещения воды и солей в почво-грунтах возник в связи с отсутствием четких представлений об элементарных процессах, протекающих при взаимодействии грунтовых вод с почво-грунтами. Этот метод мало разработан. Одной из попыток применения физического моделирования для составления солевого прогноза является метод, предлагаемый автором данной работы (А.В. Новикова, 1964, 1967), основные положения которого будут рассмотрены ниже.

Прогнозированию распределения солей при орошении посвящено и несколько зарубежных работ (Шевет и Рейнгер, 1964; Дей и Форзиц, 1957; Гарднер и Брук, 1957; Нильсон и Биггар, 1962; Дутт, 1964; Бреслер, 1967 и др.), однако в них рассмотрены вопросы прогнозирования распределения солей в почве под влиянием промывного режима. При этом учитывается осолоненность оросительной воды. Влияние отрицательного водного баланса, при котором испарение преобладает над инфильтрацией, а также воздействие грунтовой воды при подпитывании ею почвенного профиля, в этих работах не взяты во внимание. Лишь в опубликованной в 1971 г. статье Сабольч, Дараб, Варалляи отмечается отрицательное влияние грунтовых вод на засоление почв и предлагается формула для учета такого воздействия.

## **Основные положения теории вторичного засоления почв и вопросы, решаемые при прогнозировании**

Литературные данные по характеристике условий и факторов, способствующих появлению вторичного засоления и его развитию во времени и пространстве (В.С. Богдан, 1900; С.А. Захаров, 1905; Н.А. Димо 1911; В.С. Малыгин, 1913; М.М. Бушуев, 1915; Б.Б. Польшов, 1903; Ю.Г. Лопато, 1932; Л.П. Розов, 1936; В.А. Ковда, 1946; А.Н. Розанов, 1946; В.В. Егоров, 1959; Н.Г. Минашина, 1963; К.Э. Бурзи, 1970 и др.), а также непосредственный анализ явлений, протекающих на новых оросительных системах юга Украины в первое десятилетие после ввода их в эксплуатацию, дают возможность автору представить следующую концепцию вторичного засоления почв.

Вторичное засоление является неизбежным спутником орошения только при следующих условиях: слабой естественной дренированности территории; наличии определенного исходного запаса солей в почво-грунтах (а также грунтовых водах), вовлечение которых в ирригационный влагооборот может вывести эти соли из состояния резерва и привести в активное состояние; подъеме грунтовых вод и превышении критической глубины их залегания и критической минерализации (В.А. Ковда, 1946). Грунтовые воды поднимаются вследствие фильтрации воды в каналах и на полях с образованием куполов фильтрационной воды, непосредственного растекания этой воды в стороны и гидродинамического отжимания естественных грунтовых вод вверх (А.Н. Костяков, 1960; А.Н. Костяков, Н.Н. Фаворин, С.Ф. Аверьянов, 1956; В.А. Ковда, 1946; В.В. Егоров, 1959). Подъем грунтовых вод представляет, таким образом, результирующую горизонтального и вертикального перемещения воды в почво-грунтах. Темп подъема грунтовых вод зависит от элементов, составляющих водный баланс территории.

Поднимаясь в толще почво-грунтов, грунтовые воды претерпевают изменения в минерализации и составе, что обусловлено растворением солей из твердого субстрата (или выпадением их в осадок из раствора), диффузией, обменно-поглощительными реакциями с коллоидным комплексом или взаимодействием самих солей. Помимо этого, на состав грунтовых вод оказывает влияние также инфильтрация поливной воды (если она имеет место). Она может усилить или ослабить осолоненность поднимающихся грунтовых вод. Если вода недостаточно насыщена солями, то она может растворить соли, заключенные в породах и почвах, и, следовательно, минерализация ее

повысится. Если же ею достигнут предел солевой концентрации для данных условий (т. е. уровень насыщенности солями), то она в дальнейшем, проходя сквозь другие слои почво-грунтов, «не растворяет соли и не наращивает минерализации, а проходит через эти слои транзитом. Когда предельно насыщенная вода поступает в слои с меньшим засолением или с меньшей влажностью, эти слои становятся более засоленными» (П.С. Панин, 1968, стр. 50). В том же случае, когда минерализация воды при перемещении сквозь толщу пород даже остается неизменной, то в ней все же увеличивается количество хлоридов, поскольку они не адсорбируются почвой и имеют высокую растворимость.

Отмеченные здесь изменения минерализации вод при их прохождении сквозь почвы и породы должны происходить не только при фильтрации пресной воды, т. е. при движении ее главным образом вниз (что изучали В.В. Спенглер и П.С. Панин), но (что вполне очевидно) и в случае подъема грунтовой воды, т. е. при движении ее вверх.

По достижении грунтовыми водами критического уровня (критической глубины залегания) создается возможность интенсивного расходования их на испарение и транспирацию. Если водный баланс складывается таким образом, что эта статья расхода преобладает над приходом воды (осадки плюс оросительная вода и подземный приток), то в почве начинается процесс вторичного засоления (С.Ф. Аверьянов, 1965).

Миграция солей в почве совершается благодаря двум основным процессам: диффузии солей и передвижению их вместе с влагой.

Диффузионное перемещение подчиняется общей закономерности выравнивая концентрации, установленной Фиком, которая заключается в том, что количество диффундирующего вещества пропорционально падению концентрации и времени.

Скорость диффузии зависит от растворимости соли, ее концентрации, влажности почвы (В.А. Чернов, 1935, 1939; С.И. Долгов и З.И. Каменева, 1937; Н.А. Комарова, 1937 и др.).

При движении воды в водонасыщенной среде проявляется механизм конвективной диффузии, т. е. молекулярной диффузии в потоке жидкости (Н.Н. Веригин, 1953; А.Е. Орадовская, 1957 и др.), величина которой хотя и мала, но имеет существенное значение в определенных условиях (С.Ф. Аверьянов, 1965).

Передвижение солей вместе с водой (пассивное – по терминологии В.Р. Волобуева, 1941) может быть в зависимости от форм влаги различным: молекулярным, капиллярным, гравитационным. От форм влаги зависит и скорость передвижения

солей: она будет небольшой в случае пленочного передвижения и большой в остальных случаях.

Вторичное засоление почв развивается по этапам (фазам), стадийно, что получает отражение в распределении его как во времени, так и в пространстве (В.А. Ковда, 1946; А.Н. Розанов, 1946; В.В. Егоров, 1959).

Таким образом, вторичное засоление почв – явление многоплановое, включающее разные процессы: гидродинамические, физико-химические, физические и другие, которые, однако, имеют в данном случае комплексный характер. В природной обстановке происходит своеобразное наложение названных выше процессов друг на друга, поэтому трудно вычленить роль и значение каждого из них в отдельности. Отсутствие в настоящее время четких данных по количественным характеристикам расчлененной совокупности факторов (процессов), обуславливающих вторичное засоление почв, вынуждает исследователей прибегать к изучению каждого из них в отдельности, применяя для этого самые разнообразные методы.

Выше мы отмечали, что гидрогеологическое и солевое прогнозирование может быть осуществлено на базе целого ряда методов, каждый из которых имеет свойственные лишь ему особенности и свои целевые сферы применения.

При прогнозировании вторичного засоления почв одним из эффективных путей является использование метода физического моделирования отдельных процессов, протекающих в «тройственной» системе «почво-грунт – грунтовая вода – оросительная вода».

Для такого прогнозирования можно прибегнуть и к сочетанию данного метода с другими, например, с аналитическим.

Перечислим теперь узловые вопросы, которые, исходя из изложенных выше основных положений теории вторичного засоления почв, должны, по нашему мнению, решаться при прогнозировании последнего.

1. Определение степени естественной дренированности территории для предварительной оценки возможности появления вторичного засоления. Если будет установлено, что естественная дренированность слабая, то этим уже будет доказана правомерность дальнейших исследований по прогнозированию изменений почвенно-мелиоративной обстановки под влиянием орошения. Исходя из сложности процессов, которые вызывают вторичное засоление, и специфичности некоторых из них, прогнозирование должно быть разделено на два этапа: а) гидрогеологический прогноз, б) почвенно-солевой прогноз.

2. Разработка гидрогеологического прогноза, целью которого является показ возможного изменения уровня грунтовых вод под влиянием орошения. При этом должны учитываться природно-климатические условия, будущая агротехника, поливной режим и особенности выращивания тех сельскохозяйственных культур, которыми будет занят ирригационный массив, а также исходная глубина грунтовых вод. По нашему мнению, эта часть исследований должна выполняться специалистами, владеющими современными методами гидрогеологического прогнозирования – аналитическими, моделированием и другими, в частности гидрогеологами, гидравликами, математиками.

3. Разработка почвенно-солевого прогноза, задача которого сводится к выявлению возможных изменений в минерализации и составе грунтовых вод и степени засоленности почв под влиянием ожидаемого изменения уровня грунтовых вод и водного баланса орошаемого поля. Для составления прогноза солевого режима тем или иным методом потребуются решение нижеследующих вопросов:

а) определение степени исходной засоленности почвогрунтов во всей зоне аэрации (или до регионального водоупора, а при наличии связи между отдельными слоями подземных вод и засоленности более глубоких слоев пород – наличие солей и в них); получение данных о водно-физических свойствах почвогрунтов, необходимых для последующих расчетов;

б) определение минерализации исходных (природных) грунтовых вод и прогноз ее изменения под влиянием орошения должно составлять одну из центральных задач солевого прогноза;

в) изучение водного баланса и его составляющих, в частности расхода грунтовых вод для испарения в данной почвенно-климатической зоне, как фактора, активно способствующего возможному вторичному засолению;

г) установление скорости капиллярного передвижения солей в почво-грунтах, как наиболее важного механизма вторичного засоления, является необходимым элементом исследования. Наряду с этим должен изучаться также диффузионный путь миграции солей (коэффициент конвективной диффузии);

д) определение критической глубины залегания (критический уровень) и критической минерализации грунтовых вод обязательно для каких-то заранее оговоренных условий (богара, орошение, с непременно́м учетом водно-солевого режима);

е) расчет количества солей, которые смогут накопиться в почве при вторичном засолении или опреснении и их распределение в почве – центральный этап прогнозирования;

ж) составление карт прогноза. Совокупность материалов, полученных в ходе выполнения перечисленных выше комплексных научно-исследовательских работ, позволяет составить карты прогноза вторичного засоления, на которых показывают участки, где оно возможно при определенных условиях водного баланса.

Для решения перечисленных здесь вопросов применительно к условиям степного Крыма и Днепровской террасово-дельтовой равнины нами были применены различные методы: физическое моделирование (прогноз минерализации грунтовых вод, определение скорости капиллярного передвижения растворов и др.), полевые наблюдения (определение критической глубины грунтовых вод, влияние засоленности почво-грунтов и грунтовых вод, отбор проб для моделирования, определение коэффициента конвективной диффузии и др.), аналитические (прогноз распределения солей в почвах по методу С.Ф. Аверьянова и др.).

Ниже излагаются методические проработки автора по научному обоснованию метода прогноза минерализации грунтовых вод и солевого прогноза почв, а затем освещаются результаты исследований по названным выше вопросам в степном Крыму и на юге Днепровской террасово-дельтовой равнины.

### **Прогноз минерализации грунтовых вод методами физического моделирования и расчетным**

Первыми в нашей стране действие воды на соли, заключенные в почве, изучали С.А. Захаров и К.К. Гедройц.

С. А. Захаров (1905,) установил влияние времени взаимодействия почвы с водой на переход солей в раствор. К.К. Гедройц (1955) показал, что при действии воды на почву происходят следующие процессы: растворение простых солей, растворение гумусовых и кремнекислых соединений, разложение сложных солей и гидролизующее действие воды на соли. Влияние разных объемов растворителя сказывалось по-разному в зависимости от состава солей в почве.

На основании работ С.А. Захарова и К.К. Гедройца в почвоведении до сих пор применяется разработанный ими метод извлечения солей водной вытяжкой при соотношении твердой и жидкой фаз как 1 : 5.

В связи с освоением засоленных почв ставилось много опытов с промывкой солей пресной водой – на монолитах, в колонках с насыпным грунтом и т. д. В то же время влияние солевых растворов на выщелачивание солей из почвы специально не исследовалось. Этот вопрос освещался лишь частично в ходе опытов с промывкой солей пресной водой. Так, В.В. Спенглер (1950) выясняла причины различной интенсивности выщелачивания солей при промывках водой из отдельных горизонтов засоленных почв, помещенных в латунные цилиндры. Цилиндры были установлены один над другим таким образом, чтобы фильтрат из первого цилиндра поступал во второй, из второго в третий и т. д. Фильтраты из каждого цилиндра подвергались анализу. В.В. Спенглер удалось установить, что при насыщении почвы водой до предельной влагоемкости происходит не только растворение солей, но и перемещение их вниз. По мере передвижения воды из верхних горизонтов почвы к нижним возрастает ее минерализация. Чем выше минерализация воды, поступающей из вышележащих слоев, тем меньше солей она вымывает из последующих.

Аналогичный опыт провел А.И. Силин-Бекчурин (1960). Небольшие монолиты, обточенные в виде цилиндра, помещались в стеклянные трубки с оттянутым нижним концом в виде воронки. Первый монолит промывали пресной водой, последующие – фильтратами из вышележащих монолитов. Оказалось, что минерализация фильтратов увеличивалась и менялся химический состав. Растворы превращались из сульфатно-натриевых в хлоридно-сульфатные.

Убедительный эксперимент, показывающий значение минерализации на выщелачивание солей при промывке пресной водой, поставил П. С. Панин (1968). Он промывал два монолита: один представлял собой полный почвенный профиль (0–100 см), второй лишь нижнюю часть (80–100 см) такой же почвы. После промывки сравнивались слои на глубине 80–100 см. В первом монолите пресная вода пока доходила до глубины 80 см становилась высокоминерализованной, во втором, где верхняя толща почвы отсутствовала, на слой 80–100 см действовали также пресной водой. В результате оказалось, что из слоя 80–100 см первого монолита вымылось в 10 раз меньше солей, чем из такого же слоя второго монолита.

На основании этих опытов было установлено, во-первых, что по мере продвижения воды в грунте минерализация ее увеличивается, во-вторых, что минерализованная вода вымывает меньше солей по сравнению с пресной.

Однако эти опыты не давали представления о том, как конкретно влияет различная концентрация грунтовых вод на переход солей из почво-грунтов, тем более для объектов, в которых нами велись исследования (юг Украины). Поэтому возникла необходимость в постановке специальных лабораторных опытов. Но прежде всего возникла задача определить, каковы запасы (резервы) солей в типичных по засолению лессовых грунтах и в какой мере показания водной вытяжки при соотношении навески и воды как 1 : 5 отвечают истинным запасам солей.

### **Определение запасов солей в лессовидной глине Присивашья**

В качестве объекта исследования была взята широко распространенная в Причерноморской впадине почво-образующая порода – лессовидная глина из Крымского Присивашья (совхоз «Воинский» Красноперекопского района). Из большого объема этой породы отобрано 10 смешанных проб каждая весом в 50 г. Навески были помещены в конические колбы и после добавления 250 мл дистиллированной воды (соотношение навески к воде 1 : 5) закрывали пробками, встряхивали в течение трех минут и оставляли на сутки или более продолжительное время, необходимое для полного осветления раствора. Затем из каждой колбы с помощью специально изготовленного сифона прозрачный раствор сливали в мерный цилиндр, переносили в новую колбу и подвергали анализам. Каждый раз сливали одинаковый объем – 150 мл, а 100 мл оставляли в колбе ввиду необходимости сохранить над осадком слой жидкости для предотвращения взмучивания. В каждой отобранной пробе определяли сухой остаток и через определенные интервалы выщелачивания – солевой состав.

Длительность выщелачивания составила 130 дней (с 30. III по 8. VIII – 1967). За это время было слито 26 последовательных декантационных вытяжек. Полученные данные о количестве вынесенных солей обработаны методом математической статистики (А.В. Новикова, 1969).

Лессовидная глина, взятая для анализа, содержала в исходном состоянии  $\text{CaCO}_3$  6,78%,  $\text{CaSO}_4$  1,37% и водорастворимых солей 1,097%, определенных в водной вытяжке. В составе солей на сернистый натрий приходилось 31%, на сернокислый

магний –23,27%, на сернокислый кальций – 31,48% и на хлористый натрий 10,33%.<sup>1</sup>

В связи с тем, что после каждого сливания часть раствора в колбах сохраняли, то выщелачивание солей проходило замедленно.

В целом для удаления хлоридов и сульфатов, в том числе гипса, потребовалось 20 декантационных вытяжек. Объем поданной воды составил 6 л, общий объем до конца опыта – 8 л. Чтобы убедиться в полноте отмывания сульфатов из образцов глины, в ней по окончании выщелачивания было определено содержание гипса и карбонатов. Как оказалось, в остатке глины сохранилось 0,01 г гипса и 6,19 г карбонатов в пересчете на 100 г исходного грунта.

Подсчет баланса солей показывает хорошую сходимость между исходным количеством солей, с одной стороны, и количеством солей, вымытых и оставшихся после отмывания, с другой. Так, в исходном образце содержалось (в г на 100 г навески): легкорастворимых солей 1,1, гипса 1,37, карбонатов 6,78 – всего 9,25. Во время декантации вымылось 3,04 и сохранилось в остатке 6,10, что дает в сумме 9,24. Разница между суммой солей в первом и во втором случаях находится в пределах ошибки анализа; следовательно, результаты опыта не вызывают сомнений.

Установив таким образом возможные размеры перехода солей из засоленного грунта в пресную воду при последовательном выщелачивании солей и по данным водной вытяжки, мы далее задались целью определить, как влияют на переход солей из почво-грунта в раствор различные концентрации и объем растворителя.

Вопрос о влиянии объема растворителя (минерализованного раствора) на выщелачивание солей из почво-грунта возник в связи со следующими представлениями о механизме взаимодействия грунтовых вод с твердой частью (породой и почвой). Грунтовые воды поднимаются в толще зоны аэрации. Происходит растворение части солей, заключенных в грунтах; кроме того, в условиях поднятия грунтовых вод возникают обменно-поглощительные реакции между катионами жидкой фазы и коллоидной частью грунта. При этом переход солей из грунта в грунтовые воды (и повышение их минерализации) совершается

---

<sup>1</sup> Такое содержание водорастворимых солей характерно для пород Присивашья (район IV) при 75%-ном уровне обеспеченности, поэтому взятые образцы можно считать типичными.

не беспредельно, а ограничивается их растворимостью и рядом факторов, влияющих на растворимость.

Для моделирования подъема грунтовых вод и процессов, протекающих при этом, предстояло имитировать этот природный процесс. Самым естественным приемом было моделирование в монолитах с ненарушенным сложением почво-грунтов и подачей в монолиты грунтовых вод. Так и было сделано на первом этапе работ. Однако оказалось, что такое моделирование является трудоемким, требует много времени и больших физических усилий. Тогда автор перешел к физическому моделированию с образцами, предварительно растертыми и пропущенными через сито с диаметром отверстий 1 мм. Преимущество такого моделирования состояло в возможности применять смешанные из нескольких повторностей образцы (с заранее выбранной степенью точности), а кроме того, оказалось и более быстрым.

Для того, чтобы иметь представление о том, в каких соотношениях твердой и жидкой фаз необходимо вести опыт, надо было проанализировать (расчетным путем), какие соотношения бывают в почве (в условной призме почвы) при заполнении ее пор водой снизу, что совершается в природе при подъеме уровня грунтовых вод.

### **Соотношение между твердой и жидкой фазами при заполнении водой условной призмы почвы**

Представим, что уровень грунтовых вод поднимется на высоту 1 м и заполнит призму грунта объемом в  $1 \text{ м}^3$ . При порозности грунта, равной, допустим, 0,4, объем воды в призме размером 1 S 1 S 1 м составит  $0,4 \text{ м}^3$ , или 400 л. Когда грунтовая вода начнет заполнять поры в грунте снизу вверх, то через каждый десятисантиметровый слой пройдет неодинаковое количество ее порций в виде величин полной влагоемкости. Примем для удобства, что полная влагоемкость во всех слоях одинаковая и для слоя 10 см составляет 40 л. При объемном весе 1,5 вес каждого слоя грунта равен 150 кг.

Как видно из таблицы 6, через самый нижний слой пройдет 10 величин полной влагоемкости, через вышележащий – 9 и так далее, а через самый верхний – только одна величина.

В рассматриваемом случае соотношение твердой и жидкой фаз будет изменяться по слоям от 1 : 2,6, в самом нижнем слое до 1:0,26, в самом верхнем (в среднем для толщи оно будет равно 1 : 1,45 или при значительном округлении 1:2).

Таким образом, соотношение между твердой и жидкой фазами при взаимодействии грунта и воды в образцах с нарушенным

сложением должно находиться в пределах (с округлением)  $1 : 3 - 1 : 0,3$ , а в среднем  $-1 : 2$  в первый год подъема грунтовых вод. Если же иметь в виду более долгосрочный прогноз, например на пять лет, то суммарные объемы жидкой фазы соответственно возрастут и указанное соотношение для нижнего образца составит  $1 : 13$ , для верхнего –  $1 : 1,3$ .

6. Соотношение между твердой и жидкой фазами в элементарных (10-сантиметровых) слоях метровой призмы грунта при подъеме грунтовых вод на один метр (полная влагоемкость каждого 10-сантиметрового слоя равна 40 л, а вес его твердой фазы — 150 кг)

Показатели	Элементарные слои метровой призмы, см									
	100—90	90—80	80—70	70—60	60—50	50—40	40—30	30—20	20—10	10—0
Количество фильтрата, прошедшего через каждый слой, начиная снизу, л	400	360	320	280	240	200	160	120	80	40
Количество смес фильтрата в величинах полной влагоемкости	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Соотношение твердой и жидкой фаз	1:2,6	1:2,4	1:2,1	1:1,8	1:1,6	1:1,3	1:1,1	1:0,8	1:0,5	1:0,26

Увеличение объемов воды может быть вызвано тем, что до известного предела грунтовые воды будут подниматься на орошаемом участке с каждым годом все выше (при отсутствии бокового их растекания). В этом случае метровый слой грунта, находящийся до орошения вблизи уровня грунтовых вод и увлажненный лишь до капиллярной влагоемкости, в последующем станет насыщаться влагой до состояния полной влагоемкости и по мере заполнения пор в нижней части будет фильтровать сквозь себя снизу вверх поднимающуюся грунтовую воду. Если принять, что в течение первого года поднявшийся уровень грунтовых вод заполнил лишь метровый слой, то на следующий год, в связи с дальнейшим подъемом вод, этот процесс повторится и в результате будет заполнен вышележащий метровый слой, в то время как через первый слой пройдет удвоенное количество воды.

Поэтому, если учитывать суммарно всю воду, прошедшую сквозь единицу объема грунта за период, пока грунтовые воды достигнут критической глубины, то соотношение твердой и жидкой фаз будет более широким.

Рассчитаем возможное соотношение между твердой и жидкой фазами для какого-либо слоя. Условно подразделив толщину грунта от естественного уровня грунтовых вод до критической глубины их залегания на ряд элементарных

слоев (мощность каждого из них можно увязать со скоростью подъема грунтовых вод в какую-то данную единицу времени), пронумеровав их сверху вниз, обозначив порядковый номер каждого слоя индексом  $i_x$ , зная пористость ( $m$ ) и объемный вес ( $d$ ), можно определить соотношение твердой ( $P$ ) и жидкой ( $I$ ) фаз в каждом слое по формуле:

$$P : I = 1 : \frac{m \times i_x}{d} . \quad (1)$$

В рассматриваемом примере, где верхний слой  $i_x = 1$ , а последний  $i_x = 10$ , получим следующее соотношение между твердой и жидкой (прошедшей через расчетный слой) фазами грунта:

$$\text{Для верхнего слоя } P : I = 1 : \frac{0,4 \times 1}{1,5} = 1 : 0,26$$

$$\text{Для нижнего слоя } P : I = 1 : \frac{0,4 \times 10}{1,5} = 1 : 2,66$$

что и показано в таблице 6.

Таким путем можно установить соотношение между твердой и жидкой (прошедшей через расчетный слой) фазами по каждому слою грунта, сквозь который будет подниматься грунтовая вода, что необходимо для физического моделирования процесса подъема грунтовых вод, когда применяется метод последовательных солевых вытяжек с образцами нарушенного сложения.

### **Влияние различных объемов и концентраций растворов на переход солей из почво-грунта в раствор**

Задача опыта состояла в том, чтобы определить изменения конечной концентрации солей в растворе в зависимости от изменений исходных объема и концентрации. В качестве объектов исследования были взяты искусственно приготовленные растворы солей, аналогичные по составу грунтовым водам Пришивашья, дистиллированная вода, а также образец лессовидной глины, аналог которой был использован в опыте, рассмотренном нами выше; исходный солевой состав глины и растворов, взятых для опыта, приведен в таблице 7.

7. Исходный солевой состав лессовидной глины  
и растворов, взятых для опыта

Объекты исследования	Сумма солей	HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>	Cl <sup>1-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>2+</sup>	K <sup>1+</sup>
Лессовидная глина	1,11 %	0,032 0,52	0,071 2,01	0,692 14,41	0,111 5,55	0,049 4,09	0,152 6,60	0,001 0,03
Раствор № 1	3,50 г/л	0,348 5,70	1,441 41,17	0,613 12,77	0,088 4,41	0,317 26,46	0,644 28,00	0,007 0,18
Раствор № 2	6,52 г/л	0,537 8,80	3,685 105,30	0,213 4,44	0,266 13,23	0,675 56,59	1,115 48,50	0,025 0,645
Раствор № 3	15,57 г/л	0,430 7,05	7,938 226,80	2,059 42,90	0,838 41,89	1,402 116,87	2,852 124,00	0,055 1,40

*Примечание.* В числителе для лессовидной глины – в г на 100 г навески, в знаменателе – мг-экв; для растворов — в числителе в г/л, в знаменателе – в мг-экв.

К навескам глины добавляли приготовленные растворы в количестве, при котором сохранялось соотношение твердой и жидкой фаз (в расчете на сухое вещество), как 1 : 1, 1 : 3, 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 и 1 : 50. Суспензии в течение 3 мин. взбалтывали, затем отстаивали в течение суток, фильтровали и анализировали. Опыт вели в пятикратной повторности. Конечная концентрация опытных растворов представлена в таблице 8.

Как и следовало ожидать, на растворимость солей и, следовательно, на изменение концентрации раствора в значительной мере влияет исходная концентрация последнего. Чем она слабее, тем в большей мере выражена способность раствора насыщаться солями из почво-грунта и тем резче в общем меняется его концентрация после соприкосновения с грунтом. Например, при соотношении между твердой и жидкой фазами 1 : 1 в дистиллированную воду перешло 6,81 г солей, а в раствор, исходная концентрация которого составляла 15,57 г/л, — только 3,5 г.

С возрастанием объемов раствора его солевая насыщенность или концентрация, уменьшается, но не строго пропорционально количеству новых, добавляемых объемов раствора. Связь между исследуемыми показателями носит более сложный характер, что объясняется тем, что в составе грунтов имеем смесь солей, состоящую не только из легкорастворимых, но и из средне- и труднорастворимых солей. Наличие одних лишь легкорастворимых солей, которые переходили бы в раствор сразу при первом объеме, обусловило бы снижение концентрации строго пропорционально увеличению количества добавленной

воды, т. е. в этом случае имела бы место функциональная зависимость.

*8. Изменение концентрации растворов при твердой и жидкой фаз и различной исходной концентрации (в среднем из пяти анализов)*

Соотношение между твердой и жидкой фазами	Исходная концентрация раствора, г/л			
	дистиллированная вода	3,5	6,5	15,6
	Конечная концентрация, г/л			
1 : 1	6,81	9,20	12,05	19,05
1 : 3	3,43	6,56	9,38	17,61
1 : 5	2,38	5,83	8,80	16,94
1 : 10	1,33	4,76	8,14	16,77
1 : 20	0,73	4,34	7,55	16,15
1 : 50	0,39	3,90	7,11	15,86

Таким образом, присутствие в составе почво-грунтов солей разной степени растворимости вызывает постепенное уменьшение концентрации раствора, что и наблюдалось в данном опыте. В дальнейшем с помощью корреляционного и регрессионного анализов удалось установить характер зависимости между объемом раствора и его концентрацией. Для этого отдельно по каждому из растворов, приготовленных и использованных в опыте, были составлены выборки (общее число их равно 30). Анализировали зависимость конечной концентрации от объема растворителя.

Во всех солевых растворах (а также дистиллированной воде) связь между объемами жидкости и повышением минерализации оказалась прямой линейной и существенной. Коэффициенты корреляции были равны 0,69 и  $0,71 \pm 0,13$  при вероятности 0,99.

В каждом из трех рассмотренных случаев уравнения регрессии несколько отличались.

Для случая с дистиллированной водой уравнение имело вид:

$$y = 3,70 - 0,08x, \quad (2)$$

для раствора с исходной концентрацией 3,5 г/л

$$y = 6,81 - 0,07x, \quad (3)$$

для раствора с исходной концентрацией 15,57 г/л

$$y = 17,66 - 0,04x, \quad (4)$$

где  $y$  – конечная концентрация раствора после взаимодействия с грунтом, содержащим 1,11% солей;  $x$  – объем раствора, который изменялся в пределах от 100 до 5000 мл при навеске сухого грунта 100 г.

Из приведенных уравнений вытекает, что с увеличением объема раствора конечная концентрация его уменьшается, причем последнее более значительно выражено для относительно пресных растворов, а менее значительно для растворов минерализованных.

Учитывая, что среди исходных растворов два (с концентрацией 3,5 и 15,6 г/л) имели близкое соотношение ионов Cl к SO<sub>4</sub> (равное примерно 3–5), мы провели корреляционный анализ, исследовав характер изменения конечной концентрации раствора при разных уровнях исходной концентрации его.

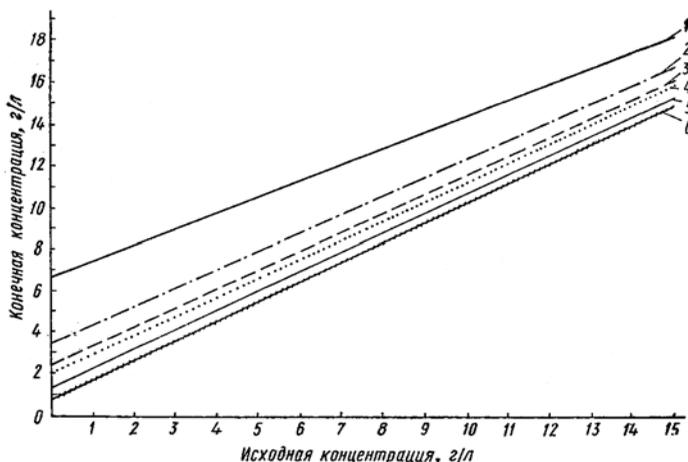
Для этого в выборку относили исходную и конечную концентрации только для какого-то одного соотношения твердой и жидкой фаз. Исследовались результаты с дистиллированной водой и растворами, исходная концентрация солей в которых составляла 3,5 и 15,6 г/л.

Связь признаков оказалась очень тесной, коэффициенты корреляции вплотную приближались к 1 (0,999). Были найдены уравнения регрессии, решение которых позволило получить целый ряд данных об изменении конечной концентрации растворов в зависимости от исходной и построить график (рис. 5). Им можно пользоваться в практических целях для определения изменения конечной концентрации в зависимости от величины соотношения твердой и жидкой фаз суспензии.

Предположим, что была сделана солевая вытяжка из грунта при одном каком-то соотношении твердой и жидкой части (например, 1 : 5) и получена определенная конечная концентрация раствора (например, 5 г/л). Теперь, допустим, необходимо узнать, как эта величина изменится, если соотношение будет иным (например, 1 : 1). Для этого на оси ординат графика находим цифру 5 и проводим горизонтальную линию (параллельно оси абсцисс) до пересечения с линией, соответствующей соотношению 1 : 5. Затем от места пересечения линий возводим перпендикуляр до пересечения с другой линией, соответствующей соотношению 1 : 1. От места пересечения проводим влево к оси ординат линию и снимаем показания конечной концентрации.

Следует подчеркнуть, что графиком можно пользоваться для случая, в котором проведен эксперимент, т. е. когда почвогрунт имеет сульфатный состав солей, а грунтовые воды (с ми-

нерализацией не выше 15,64 г/л) содержат в основном хлориды и сульфаты с соотношением первых ко вторым, равным 3–5.



**Рис. 5.** График зависимости конечной концентрации растворов от исходной их концентрации при различном отношении твердой и жидкой фаз в водной суспензии. Составила А.В. Новикова. Отношение твердой фазы к жидкой в водной суспензии: 1 — 1 : 1; 2 — 1 : 3; 3 — 1:5; 4 — 1 : 10; 5 — 1 : 20; 6 — 1 : 50.

Следовательно, для прогнозирования минерализации грунтовых вод можно прибегать к физическому моделированию, используя при этом смешанные растертые образцы, которые обрабатывают искусственно приготовленным солевым раствором, аналогичным по составу природным грунтовым водам в изучаемом районе. Соотношение между твердой и жидкой фазами раствора должно устанавливаться заранее, как указано в предыдущем параграфе. Если же возникает необходимость внести поправку на соотношение твердой и жидкой фаз, тогда можно воспользоваться графиком (рис. 6).

Для взаимодействия раствора и почво-грунта (исходя из данных С. А. Захарова) может быть достаточно суток при наличии большого количества сульфатов, а при хлоридном засолении достаточно 3–5 мин.

Ход работ при физическом моделировании прогнозирования конечной минерализации грунтовых вод ( $C_k$ ) и основные этапы его таковы. Из нескольких параллельных скважин, расположенных на объекте, для которого составляют прогноз, отби-

рают образцы почво-грунта на определенной ключевой площадке (размером 2–10 га) на всю глубину зоны аэрации. Эти образцы извлекают в нескольких повторностях, количество которых нужно заранее определить с учетом того, что доверительная вероятность должна приниматься не менее 70–80%. Образцы почвенного вида смешивают по-горизонтно в один образец. Готовят искусственный солевой раствор, состав которого аналогичен солевому раствору грунтовых вод этой ключевой площадки (или берут природную грунтовую воду этой площадки). Делают предварительный расчет необходимых навесок и объемов раствора таким образом, чтобы при обработке сохранять заранее выбранное соотношение между ними.

Затем производят последовательные солевые вытяжки: вначале исходным раствором обрабатывают навеску образца, взятого с самой нижней части зоны аэрации, после чего полученным фильтратом обрабатывают образец грунта из расположенной выше части – и так до глубины, соответствующей критическому уровню грунтовых вод. Конечная минерализация и явится прогнозируемой величиной минерализации грунтовых вод (Ск).

### **Математическая модель физического моделирования прогноза минерализации грунтовых вод**

Пользуясь предложенным методом физического моделирования, изложенным выше, мы путем последовательных солевых вытяжек получили величины прогнозируемой минерализации грунтовых вод (Ск) для различных ключевых участков, находящихся в зоне Северо-Крымского канала. В дальнейшем эти данные использовались для прогноза вторичного засоления почв.

При физическом моделировании, помимо конечного солевого состава растворов, соответствующих грунтовым водам, условно залегающим на глубине 2 м от поверхности земли, были проанализированы также исходные смешанные образцы промежуточной части толщи пород, а также соответствующие составы растворов, которые получены после взаимодействия образцов пород с растворами. Таким образом создавалась возможность проследить за изменением концентрации растворов в процессе вертикального движения по профилю грунта.

Оказалось, что по мере последовательной обработки образцов почво-грунтов концентрация растворов постепенно возрастала и, например, по одному ключевому участку достигала максимума (20,28 г/л) после обработки наиболее засоленного

образца, взятого с глубины 60–100 см и содержащего 1,511% солей. Но затем в ходе дальнейшего контактирования с незасоленным горизонтом (0,27%) концентрация последующего фильтра несколько снизилась (19,70 г/л), а после взаимодействия с почвой из совсем опресненного горизонта, расположенного на глубине 0–20 см (0,06%), концентрация последнего фильтра еще уменьшилась (19,02 г/л). Если увеличение концентрации модельного солевого раствора объясняется весьма просто – растворением части солей, то опреснение, вероятно, можно объяснить механическим поглощением солей, удерживаемых водной пленкой вокруг частиц ранее сухой почвы.

Наращение концентрации растворов по мере обработки засоленных горизонтов свидетельствовало о существовании связи между степенью засоления грунта, исходной и конечной концентрациями растворов. Чтобы выяснить характер математической связи между названными показателями, был проведен множественный корреляционный, а затем и регрессионный анализы данных последовательных солевых вытяжек для различных почво-грунтов, имеющих засоленность от 0,1 до 2,5% и исходные концентрации растворов в интервале от 4 до 22 г/л. Засоленность почво-грунтов и растворов колебалась от хлоридно-сульфатной до сульфатно-хлоридной.

В выборку вошли материалы 33 опытов, содержащих данные об исходной засоленности образца почво-грунта, исходной и конечной (после обработки почво-грунта) концентрации раствора.

Оказалось, что между исходной и конечной концентрациями растворов существует очень тесная прямая линейная связь. Частный коэффициент корреляции равен  $0,997 \pm 0,03$  при вероятности 0,99. Между исходным засолением почво-грунта (сумма водорастворимых солей) и конечной концентрацией раствора корреляционная прямая линейная связь также существует, но она является средней. Частный коэффициент корреляции в этом случае равен  $0,51 \pm 0,14$  при вероятности 0,99. Более ослабленная связь между последними признаками объясняется тем, что из почво-грунта в раствор переходят не все соли, а только часть их.

Поскольку между рассматриваемыми признаками связь оказалась существенной, то стало возможным получить уравнение регрессии, которое имеет вид:

$$y = 0,41 + 0,96x_1 + 0,97x_2, \quad (5)$$

где  $y$  – конечная концентрация раствора, г/л;

$x_1$  – исходное содержание солей в почво-грунте, %;

$x_2$  – исходная концентрация раствора, *г/л*.

По данному уравнению можно определить прогнозируемую минерализацию (не прибегая к физическому моделированию) для условий, когда величины  $x_1$  находятся в пределах от 0,1 до 2,5%, а  $x_2$  – от 4 до 22 *г/л*.

### Учет влияния инфильтрующихся поливных вод на прогнозируемую минерализацию

На орошаемых участках при каждом поливе часть ирригационной воды не используется растениями, она постепенно передвигается в почве вглубь зоны аэрации (С. Ф. Аверьянов, 1965). Поскольку почво-грунты зоны аэрации содержат большее или меньшее количество солей, то стекающая вода будет выщелачивать эти соли и, дойдя до уровня грунтовых вод, обусловит увеличение запаса солей в них. При избыточных поливах процесс инфильтрации усиливается.

О возможных размерах изменения солевой концентрации растворов, образующихся при медленном (инфильтрационном) просачивании сверху, можно судить по данным нашего опыта с медленной промывкой монолитов почво-грунта из Крымского Присивашья (А.В. Новикова, 1968).

В этом опыте средневзвешенное содержание солей в первом монолите (верхняя часть темно-каштановой слабосолонцеватой почвы) составляло 0,35%, во втором монолите (нижняя часть этой почвы) – 1,03%, в третьем (почвообразующая порода) – 1,22%. Дистиллированную воду подавали на поверхность первого монолита, а затем образующийся фильтрат поступал на поверхность второго монолита, а фильтрат из него – в третий монолит. Воду подавали медленно, каплями.

#### 9. Концентрация инфильтрующихся вод и вынос солей из монолитов \*

Номер монолита	Номера последовательных порций по 4,3 л									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3,12	1,57	1,37	0,87	0,78	0,66	0,59	0,48	0,60	0,54
	10,0	5,03	4,39	2,78	2,49	2,11	1,89	1,53	1,92	1,73
2	8,93	3,17	2,42	1,89	2,07	2,57	2,63	—	—	—
	5,97	1,64	1,08	1,05	1,32	1,96	2,09	—	—	—
3	30,25	12,95	8,68	8,16	—	—	—	—	—	—
	18,59	8,53	5,43	5,46	—	—	—	—	—	—

\* В числителе – в г/л; в знаменателе – в процентах к исходному содержанию в монолитах.

В таблице 9 представлены значения концентрации инфильтратов для объемов 4,3 л, соответствующих величине 1500 м<sup>3</sup>/га, принятой в одной из проектных проработок «Укргипроводхоза» как величину ежегодной инфильтрации оросительной воды.

При анализе материалов, представленных в таблице 9, обращают на себя внимание два обстоятельства. Одно из них заключается в том, что самое сильное увеличение концентрации раствора происходит при первом соприкосновении воды с почво-грунтом. Объясняется это прежде всего тем, что в первую порцию отжимаются почвенные растворы, а также тем, что в нее переходят легко растворимые соли. Второе обстоятельство – это медленный характер выщелачивания солей из почво-грунтов при отсутствии гидростатического напора и малой скорости движения воды. Даже с десятой порцией после прохождения сквозь монолит 14482 м<sup>3</sup>/га воды в раствор перешло все еще 0,54 г/л, что составляло 1,73% от исходного запаса солей в метровом монолите. Медленное удаление оставшегося малого количества солей отмечалось также Л.П. Розовым (1936), В.Р. Волобуевым (1940), П.С.Паниным (1968) и др.

В целом же сильное засоление инфильтрующихся вод можно ожидать лишь в первые годы орошения, в последующем они должны постепенно опресняться по мере выщелачивания солей из пород и в ряде случаев их минерализацией можно пренебрегать, считая инфильтраты пресными.

Определение осолоненности образующихся инфильтратов можно произвести с помощью последовательных солевых вытяжек. В этом случае первой исходной порцией жидкости должна служить оросительная (или дистиллированная) вода, а обрабатывать надо начиная с образцов, взятых с верхних слоев, и кончая образцами из нижних слоев, где ожидается образование уровня грунтовых вод. Полученная минерализация инфильтрата ( $C_u$ ) и принимается в дальнейшем в расчет. Такой способ оценки возможного осолонения оросительных вод был применен М. Ф. Будановым (1958).

Чтобы учесть, как изменится прогнозируемая конечная минерализация грунтовых вод ( $C_n$ ) в зависимости от степени осолонения инфильтратов ( $C_u$ ), необходимо знать долю участия инфильтрационных и грунтовых вод в подъеме уровня последних.

Эту зависимость можно выразить следующим уравнением:

$$C_n = (1 - \alpha) C_u + \alpha C_k, \quad (6)$$

где  $C_n$  – прогнозируемая минерализация грунтовых вод с учетом влияния минерализации инфильтрационных вод, г/л;

$C_k$  – прогнозируемая минерализация грунтовых вод, полученная путем последовательных солевых вытяжек, г/л;

$C_u$  – минерализация инфильтрационных вод, полученная путем последовательной обработки почвы пресной водой, г/л;

$\alpha$  – доля участия бытовых грунтовых вод в подъеме их уровня;

$(1 - \alpha)$  – доля участия инфильтрационных вод в подъеме грунтовых вод.

Очевидно, в том случае, когда инфильтрационные воды будут пресными, первый член правой части уравнения (6) будет равен 0 и тогда

$$C_n = \alpha C_k \quad (7)$$

Если же подъем грунтовых вод полностью будет идти за счет самих грунтовых вод, то

$$C_n = C_k \quad (8)$$

Таким образом, выше были рассмотрены способы прогнозирования минерализации грунтовых вод для случая, когда территория является бессточной и в результате потерь воды из каналов и с полей происходит подъем грунтовых вод, а вместе с тем меняется их минерализация. Показан и путь учета влияния инфильтрующихся вод на изменение минерализации грунтовых вод.

В специальной литературе имеются данные о влиянии скорости оттока грунтовых вод на их минерализацию. Так, Е.И. Здобнов (1959), Г.Ю. Исрафаилов, Е.И. Здобнов и И.Г. Алиев (1961) установили, что минерализация грунтовых вод есть функция скорости потока и глубины залегания его от поверхности земли. Большое значение скорости оттока придает Э.А. Соколенко (1966), который вводит представление о критической скорости бокового движения грунтовых вод, как критерии засоленности почв.

Гидрогеологические материалы по Крыму свидетельствуют о том, что в Присивашье отток грунтовых вод практически отсутствует. Это подтвердилось и нашими проработками при определении степени естественной дренированности территории. Значительная часть Присивашья по условиям скорости движения грунтовых вод относится к бессточной области. По существу это уже не поток грунтовых вод, а их бассейн.

Одна из причин высокой минерализации грунтовых вод Крымского Присивашья как раз и заключается в малой их подвижности. А в этом случае скорость их движения не может сильно сказываться на изменениях минерализации. В этом можно убедиться на основании множественного корреляционного анализа данных о минерализации, глубине и скорости движения грунтовых вод. Был взят ряд точек, по которым имелись данные относительно глубины и минерализации грунтовых вод до орошения. По карте гидроизогипс определен уклон грунтовых вод, а затем с учетом коэффициента фильтрации пород определена скорость движения грунтовых вод. Была составлена выборка ( $n = 96$ ), в которую вошли данные по грунтовым водам со следующей общей характеристикой: глубина залегания (уровень) 0,6–13 м; минерализация 5–34 г/л; скорость движения 0,02–4 м в сутки.

Анализ показал, что в данном районе между минерализацией и скоростью движения грунтовых вод существует обратная линейная зависимость при средней тесноте связи между исследуемыми показателями. Коэффициент частной корреляции  $r \pm m_r$  равен  $0,50 \pm 0,09$ . Он статистически достоверен с вероятностью 0,99.

Между минерализацией и глубиной залегания грунтовых вод существует также обратная зависимость ( $r \pm m_r = - 0,49 \pm 0,09$ ) при вероятности 0,99.

Связь этих трех признаков ( $r = - 0,69 \pm 0,07$ ) для Крымского Присивашья выражается уравнением

$$y = 8,16 + \frac{1,50}{x_1} + \frac{0,34}{x_2}, \quad (9)$$

где  $y$  – минерализация грунтовых вод (от 5 до 34 г/л);

$x_1$  – скорость оттока грунтовых вод (0,02–0,4 м в сутки);

$x_2$  – глубина залегания грунтовых вод (0,6–13 м).

Указанная связь установлена для большей части территории Присивашья, имеющей абсолютные отметки от 1 до 12–15 м, а потому и большие амплитуды глубин, скорости движения и минерализации грунтовых вод. К тому же здесь учитывались бо- гарные условия.

Что касается орошаемых условий, то по данному вопросу еще необходимо собрать и проанализировать соответствующий материал, характерный для поливного земледелия, который и может быть принят во внимание в дальнейших проработках.

Составляя прогноз минерализации грунтовых вод на первое десятилетие начала орошения, можно, по-видимому, не вносить поправку на скорость движения грунтовых вод, т. е. абстра-

гироваться от этого показателя. В пределах одного орошаемого участка, где разница в уровнях грунтовых вод невысока, с началом ирригации скорость их перемещения заметно не изменится (кроме приканальной зоны, а при наличии дрен – и на всем участке).

Слабая естественная дренированность территории участка является причиной возрастания минерализации грунтовых вод, что и имеет место в действительности. Это же подтверждается и данными лаборатории фильтрации «Укргипроводхоза», которая путем моделирования в лабораторных условиях установила (А.Д. Петраш и др., 1967), что в первые 10 лет орошения отток воды от орошаемых участков с зерно-кормовыми севооборотами в сторону неорошаемых не будет иметь места.

Следовательно, возможным изменением минерализации грунтовых вод в зависимости от скорости движения их при прогнозировании на первые 10 лет ирригации, по-видимому, можно пренебречь, поскольку скорость их движения в этот период резко не изменится.

Что касается более отдаленного времени, то, несомненно, в прогнозные расчеты нужно будет вносить поправку на возможное изменение скорости движения грунтовых вод, однако для условий юга УССР, вследствие ограниченности опыта орошения и отсутствия необходимых данных, сделать это пока затруднительно.

### **Расчетный метод прогноза минерализации грунтовых вод**

Расчетный метод прогнозирования минерализации грунтовых вод при их подъеме в толще почво-грунта описан С. Ф. Аверьяновым (1965). Им предложено определять возможное изменение минерализации грунтовых вод путем вычислений, для которых используют полученные с помощью элементарных анализов и несложных расчетов данные по формуле:

$$C_2 = \alpha \times C_1 + \frac{a \times S \times d \times 10}{m} \text{ г/л}, \quad (10)$$

Где:  $C_2$  – прогнозируемая минерализация грунтовых вод, г/л;

$C_1$  – исходная минерализация грунтовых вод, г/л;

$S$  – среднее содержание солей в данном почво-грунте, %;

$a$  – количество солей, переходящих из почво-грунта в грунтовую воду в долях единицы (условно принимается равным 0,5);

$\alpha$  – доля участия грунтовых вод в подъеме их уровня;

$m$  – порозность (в долях единицы);

$d$  — объемный вес почво-грунтов,  $г/см^3$ .

В данной формуле предполагается, что инфильтрующиеся с полей воды являются пресными. В противном случае необходимо учитывать минерализацию инфильтрационных вод и долю их участия в подъеме уровня грунтовых вод, как было показано выше.

Быстрота определения прогнозируемого показателя составляет неоспоримое достоинство этого метода.

Вместе с тем использование приведенной выше формулы встречает определенные трудности, связанные с особенностями солеотдачи, которая при вычислениях условно принимается равной 0,5, т. е. 50%.

Полученные в последние годы данные по солеотдаче (П.С. Панин, 1968) показали большие различия в выносе солей из почв пресной водой. Как оказалось, удельная солеотдача (количество солей, вымываемых за один такт промывки пресной водой, в объеме, равном полевой влагоемкости, выраженное в процентах к исходному запасу их в почве перед каждым тактом промывки) постоянна только для почв, которым присуща стабильность состава солей во времени и в пространстве. Но поскольку в ходе промывок соли выносятся в соответствии с их растворимостью, то состав солей в почве постоянно меняется. Так, по мере выноса хлоридов из хлоридных солончаков состав солей в них меняется от хлоридного к хлоридно-сульфатному, а затем к сульфатному. Поэтому, по данным П.С. Панина, если для хлоридных солончаков удельная солеотдача в начале промывок составляла 55%, то в последующие четыре промывки она снизилась до 40%. В почвах с хлоридно-сульфатным типом засоления в начале промывок она была равна 32%, а затем падает до 23%. Для почв с содово-сульфатным засолением колебания исследуемого показателя по П.С. Панину составляют 31–13% (табл.10).

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости дифференцированного учета солеотдачи почв различного типа засоления. Кроме того, поскольку грунтовые воды в большинстве орошаемых районов отличаются повышенной минерализацией, а способность концентрированных растворов к выщелачиванию солей понижается, что хорошо иллюстрируется вышеприведенными данными, то для прогнозирования необходимо заранее определить солеотдачу из почво-грунтов именно в грунтовые воды или в растворы солей. Лишь в этом случае прогнозирование расчетным путем будет максимально, с наибольшей достоверностью, отражать действительную картину.

Наряду с этим в указанную формулу необходимо ввести поправку на различие в объемах грунтовой воды, воздействующей в разных слоях грунта, по которому она поднимается, т. е. следует определить одновременные изменения минерализации в толще грунта. Как было показано выше (табл. 6), грунтовые воды, поднимаясь вверх, воздействуют на разные слои породы неодинаковым объемом.

10. Количество солей, вымываемых по отдельным тактам промывок объемами пресной воды, равными полевой влагоемкости промываемого слоя ( $\Gamma$ )

Почвы	Объем профильтровавшейся воды в единицах $\Gamma$					
	1	2	3	4	5	6

*Вынесено солей, % к исходному содержанию их перед каждой промывкой (удельная солеотдача)*

Хлоридные солончаки	55	43	41	40	—	—
Почвы с хлоридно-сульфатным засолением	32	30	31	29	23	—
Почвы с содово-сульфатным засолением	31	18	21	13	—	—

*Суммарное количество вынесенных солей по тактам промывок, % к исходному содержанию*

Хлоридные солончаки	55	74	83	86	89	90
Почвы с хлоридно-сульфатным засолением	32	52	67	76	82	88
Почвы с содово-сульфатным засолением	31	42	54	60	65	69

Естественно, что общее количество солей, способных перейти из почвы в грунтовую воду (на какой-то определенный период), будет складываться из суммы солей, перешедших из каждого слоя отдельно. Рассмотрим это на примере. Для удобства расчетов примем, что грунтовые воды весьма слабо минерализованы (0,8 г/л), чтобы иметь возможность пользоваться данными о солеотдаче почв, полученными П.С. Паниным<sup>1</sup> (табл. 11).

Допустим, что грунт содержит 1% солей, преимущественно хлоридов и сульфатов, с равномерным распределением их в толще. Выпишем из таблицы 11 относительные величины возможного выноса солей в процентах к исходному содержанию (предпоследняя строчка) в зависимости от величины  $\Gamma$ . Таблица

<sup>1</sup> В рассматриваемом случае правильнее пользоваться величинами солеотдачи при полной, а не полевой влагоемкости.

заканчивается данными для 6 П, в нашем же случае предусматривается 10 П. Предположим, что, начиная с 7 по 10 П, суммарная величина вынесенных солей равна 90%. Теперь рассчитаем абсолютные количества вынесенных солей по каждому слою в отдельности. Эти данные показаны в предпоследней строке таблицы 11. Получим, что в самых нижних слоях в грунтовую воду перейдет 90% солей, а чем выше расположен слой породы, тем меньше солей он отдает, так как все меньшее взаимодействие грунта с водой. Средневзвешенное количество вынесенных солей составило 0,757 г на 100 г грунта. Если же не учитывать воздействие различных объемов воды и принять величину солеотдачи в 50%, что в долях единицы составляет 0,5, то количество вынесенных солей будет равно всего 0,5 г на 100 г грунта. Следовательно, точность расчетов повысится, если принять во внимание изменения солеотдачи в зависимости от объемов грунтовой воды, которые прошли сквозь данный слой почвы или породы.

11. Общее количество солей, вымываемых грунтовыми водами из слоев почво-грунта – с учетом объемов воды и удельной солеотдачи (исходное содержание солей равно 1 г в 100 г грунта)

Показатели	Элементарные слои метровой призмы, см									
	100— —90	90— —80	80— —70	70— —60	60— —50	50— —40	40— —30	30— —20	20— —10	10— —0
Количество смен фильтрата (в величинах полной влагоемкости)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Суммарное вымывание солей в зависимости от объема фильтрата, % к исходному содержанию	90	90	90	90	88	82	76	67	52	32
Вынос солей из каждого слоя грунта, в г. на 100 г грунта	0,90	0,90	0,90	0,90	0,88	0,82	0,76	0,67	0,52	0,32

Если принять, что доля участия грунтовых вод в их подъеме (а) равна единице, минерализация их равна 0,8 г/л,

объемный вес грунта 1,5, порозность 0,4, средняя величина солеотдачи равна 0,5, то в данном примере прогнозируемая минерализация будет следующей:

$$C_2 = 1 \times 0,8 + \frac{0,5 \times 1 \times 1,5 \times 10}{0,4} = 19,5 \text{ г/л}$$

А если взять средневзвешенную величину солеотдачи, равную 0,757, то прогнозируемая минерализация значительно увеличится:

$$C_2 = 1 \times 0,8 + \frac{0,757 \times 1 \times 1,5 \times 10}{0,4} = 29,2 \text{ г/л}$$

Разница, как видим, весьма значительная.

Из сказанного следует, что предложенный С.Ф. Аверьяновым метод расчета прогнозируемой минерализации грунтовых вод подлежит некоторому уточнению в свете приведенных выше замечаний. Если при этом учесть, что, кроме различной солеотдачи, каждый слой грунта будет содержать еще и различное количество солей, при условии, что объемный вес и порозность во всей исследуемой толще грунта останутся постоянными, то формула примет следующий вид:

$$C_2 = \alpha \times C_1 + \frac{(a_1 S_1 + a_2 S_2 + \dots a_n S_n) \times d \times 10}{m \times n}, \quad (11)$$

где  $C_2$  – прогнозируемая минерализация грунтовых вод, *г/л*;

$C_1$  – исходная минерализация грунтовых вод, *г/л*;

$a_1, a_2, \dots$  суммарная солеотдача для каждого слоя с учетом профильтровавшейся воды (в долях единицы);

$S_1, S_2$  – исходное содержание солей в грунте, %;

$n$  – количество расчетных слоев породы;

$\alpha$  – доля участия грунтовых вод в подъеме их уровня;

$m$  – порозность;

$d$  – объемный вес почво-грунтов, *г/см<sup>3</sup>*.

Таким образом, при пользовании расчетным методом прогнозирования минерализации грунтовых вод необходимо: предварительно определить удельную солеотдачу в грунтовую воду (на величину полной влагоемкости) для характерных почвогрунтов в различные по составу грунтовые воды района орошения; вычислить суммарное вымывание солей в зависимости от объема фильтрата в процентах к исходному содержанию; условно подразделить толщу грунта, в котором должна подняться грунтовая вода, на элементарные слои; установить исходное содержание солей в этих слоях, вычислить вынос солей как в отдельности по слоям, так и в целом для всей толщи и определить

прогнозируемую степень минерализации, воспользовавшись для этого приведенной выше формулой, в которую подставляют соответствующие значения.

### **Методы определения степени накопления солей при вторичном засолении**

#### **Балансовый метод**

Располагая данными о величинах расхода грунтовых вод на испарение (по лизиметрическим данным) и об ожидаемой (прогнозной) их минерализации, можно определить вероятное накопление солей в почве на основе балансовых расчетов.

Исходя из уравнений солевого баланса, предложенных В. А. Ковдой (1946), Д. М. Кацем (1969), солевой баланс почвенного слоя, где солеобмен протекает наиболее интенсивно, может быть выражен следующим равенством:

$$S_K - S_H = \Delta S \quad (12)$$

$$\Delta S = S_{op} + S_{ep} - S_{cb} - S_{yp} - S_{инф}, \quad (13)$$

где  $S_K$  – конечный запас солей в почве;

$S_H$  – начальный запас солей в почве;

$\Delta S$  – разность солевых запасов;

$S_{op}$  – поступление солей с оросительной водой;

$S_{ep}$  – поступление солей в почву из грунтовых вод при физическом испарении и транспирации последних;

$S_{cb}$  – вынос солей со сбросными оросительными водами;

$S_{yp}$  – вынос солей с урожаем растений;

$S_{инф}$  – вынос солей из почвы в грунтовые воды при инфильтрации влаги.

Поскольку вторичное засоление происходит благодаря тому, что расход грунтовых вод на испарение и транспирацию превышает поступление влаги с оросительной водой и осадками, то определение возможного накопления солей в почве следует вести в расчете на вегетационный период – на конец его или отдельные его отрезки.

Однако для представления о динамике солевых запасов в многолетнем плане считаем необходимым производить дополнительные расчеты отдельно для холодного влажного периода года, когда расход влаги на испарение и транспирацию практически прекращается, а водный баланс имеет положительный знак и преобладает вынос солей из почвы.

Учитывая, что оросительная вода Каховского водохранилища пресная, сброс оросительных вод (в отсутствие дренажа)

практически ничтожен, а вынос солей с урожаем в значительной мере компенсируется вносимыми удобрениями, названными статьями солевого баланса можно пренебречь.

Несколько сложнее обстоит дело с учетом выноса солей при инфильтрации влаги из почвы в грунтовые воды при поливах. Выше были показаны возможные размеры такого выноса солей при промывке монолитов пресной водой. Но вместе с тем на примере орошения территорий, имеющих близкий уровень грунтовых вод (ближе 1,5 м) и где уже развивается вторичное засоление, было установлено (А.В. Новикова, 1959), как после очередного полива происходит еще большее повышение уровня грунтовых вод и, благодаря усилившемуся расходу их на испарение, возрастает накопление солей в почве. Поэтому солевой баланс за весь вегетационный период будет определяться расходом грунтовых вод на испарение и транспирацию за минусом инфильтрации влаги. Такую величину можно получить с помощью лизиметрических наблюдений.

Солевой баланс для вегетационного периода можно, таким образом, упростить до выражения:

$$\Delta S_1 = S_{1\text{эп}} - S_{\text{инф}} \quad (14)$$

В холодный и влажный период года, когда практически прекращается расходование влаги на испарение и транспирацию и водный баланс становится положительным (приход влаги преобладает над расходом), из почвы начинается выщелачивание солей. Для этого периода солевой баланс определяют по аналогичному выражению:

$$\Delta S_2 = S_{2\text{эп}} - S_{2\text{инф}}. \quad (15)$$

Однако поскольку отложившиеся из почвенного раствора в осадок соли представлены не только легкорастворимыми соединениями, но и среднерастворимыми, а, кроме того, растворимость некоторых солей понижается при низкой температуре, то в холодный период вымываются инфильтрационными токами не все соли, а какая-то их часть, что должно учитываться при соответствующих расчетах.

Вычисление количества солей, которое может накопиться в почве при вторичном засолении за вегетационный период (А. В. Новикова, 1967), производится по формуле:

$$S_{\text{эп}} = \frac{C_n \times H}{d \times h \times 100}, \quad (16)$$

где  $S_{\text{эп}}$  – количество солей, поступившее в почву из грунтовых вод при их испарении и транспирации, %;

$C_n$  – прогнозируемая минерализация, г/л;

$d$  – объемный вес слоя почвы,  $г/см^3$ ;

$H$  – величина слоя грунтовой воды, расходуемой на испарение и транспирацию,  $мм$ ;

$h$  – мощность верхнего слоя почвы, в котором будут откладываться соли,  $см$ .

Для вычисления солевого баланса в невегетационный период необходимо знать количество солей, которое может выщелачиваться атмосферными осадками в этот период года. В условиях Крымского Присивашья, по наблюдениям автора (А.В. Новикова, 1962), осенне-зимними и ранневесенними осадками выносятся 40–60, а иногда и 80% солей из верхнего слоя почв. Примерно такое же количество солей выносятся из почв других районов страны, в частности, из почв тяжелого механического состава долины Вахша – 43–52% (О.А. Грабовская, 1961).

Вычтя из величины, характеризующей накопление солей в вегетационный период, ту ее часть, которая может быть выщелочена в невегетационный период, можно получить данные о засолении на начало следующего вегетационного периода. Затем путем соответствующих расчетов по каждому последующему году (отдельно от вегетационного и невегетационного периодов) можно определить ожидаемое вторичное засоление на любой срок.

В качестве примера расчета количества солей, поступивших в почву из грунтовых вод при их испарении и транспирации ( $S_{сп}$ ), приведем данные прогноза по одному из ключевых участков в зоне Северо-Крымского канала. Прогнозируемая минерализация ( $C_{п}$ ) с учетом разбавления пресными инфильтрационными водами (на  $1/4$ ) составила 7,4  $г/л$ ; величина слоя грунтовой воды ( $H$ ), расходуемой на испарение и транспирацию при глубине залегания грунтовых вод на 1 м от поверхности и транспирацию озимой пшеницы, по аналогии с другими районами составила 230 мм за вегетационный период (Д.М. Кац, 1969); мощность верхнего слоя почвы, на который произведен расчет ( $h$ ), равна 20 см при объемном весе ( $d$ ) 1,3  $г/см^3$ .

Вторичное засоление данного слоя почвы в первый год (первый вегетационный период) выразится такой величиной:

$$S_{сп} = \frac{7,4 \times 230}{1,3 \times 20 \times 100} = 0,65\%$$

Вынос солей атмосферными осадками в первый невегетационный период ( $S_{инф}$ ) примем равным 60%, что составит 0,39%.

Солевой баланс за невегетационный период (и, таким образом, в целом за первый год) будет равен:

$$\Delta S_2 = S_{2\text{эп}} - S_{2\text{инф}} = 0,65 - 0,39 = 0,26\%$$

Следовательно, к началу второго вегетационного периода в верхнем слое почв сохранится 0,26% солей. Во второй вегетационный период снова накопится 0,65% солей, что вместе с остатком (0,26%) даст 0,91% солей.

Аналогичный расчет на последующие годы показывает, что дальнейшее возрастание содержания солей в почве будет происходить до шестого года. Затем, вследствие того, что количество накапливаемых за один вегетационный период солей будет равно количеству вымываемых солей за невегетационный период, соленакопление стабилизируется, составляя 1,08% в конце вегетационного периода.

Так, используя балансовый метод, можно прогнозировать величину вторичного засоления почв при условии, что оросительная вода пресная. В противном случае нужно учесть и поступление солей с оросительной водой, исходя из вышеприведенной формулы, а также учитывая предложения Сабольч, Дараб, Варалляи (1971) и др.

### **Метод прогноза солевого режима, основанный на учете механизма конвективной диффузии**

Выше отмечалось, что в последние годы широкое распространение получили аналитические методы прогноза, основанные на теории физико-химической гидродинамики пористых сред, в частности, учитывающие механизм конвективной диффузии.

С.Ф. Аверьянов (1965) предложил использовать для прогноза такое уравнение:

$$\frac{d_n}{d_t} = D^* \frac{d^{2n}}{dx^2} - V \frac{dn}{dx} + \beta(n_M - n) , \quad (17)$$

где  $n$  – концентрация почвенного раствора,  $г/л$ ;

$t$  – время;

$x$  – расстояние,  $м$ ;

$V$  – фактическая скорость движения воды в порах грунта, равная

$$V = \frac{V_0}{m}$$

где  $V_0$  – скорость фильтрации,  $м$  в сутки;

$m$  – порозность,

$n_M$  – предельная концентрация насыщения;  
 $\beta$  – коэффициент растворения, 1/сутки;  
 $D^*$  – коэффициент конвективной (фильтрационной) диффузии,  $m^2$  в сутки.

Из уравнения следует, что изменение во времени концентрации солей в какой-либо точке зависит от поступления солей в результате разности концентрации почвенного раствора (диффузионный член, первый), переноса солей движущейся водой (конвективный, фильтрационный член, второй) и растворения твердой фазы солей, а также поступления их в раствор.

В зависимости от начальных и граничных условий и способов решения этого уравнения могут быть выделены различные аналитические методы прогноза солевого режима, первые и основные из которых предложены С.Ф. Аверьяновым. Им же предложена и методика определения физико-химических параметров, входящих в указанное уравнение, в частности, коэффициента конвективной диффузии.

По методу С.Ф. Аверьянова вначале составляют прогноз водного режима и определяют скорость ежегодного подъема уровня грунтовых вод. При этом учитывают, в какой мере подъем грунтовых вод вызван потерей воды из каналов, а в какой – потеями воды на полях. Рассчитывают величину прогнозируемой минерализации грунтовых вод. Определяют среднее устойчивое положение грунтовых вод, при котором они, превысив критическую глубину, начнут стабилизироваться вследствие того, что приток грунтовых вод снизу будет равен расходу их на испарение: Определяют коэффициент конвективной диффузии. Расчет количества солей, накопившихся в почве при установившемся солевом режиме за счет расхода грунтовых вод на физическое испарение, ведут по следующей формуле:

$$C = -\frac{C_2 \times V_2}{V_1 - V_2} + \left( C_1 + \frac{C_2 \times V_2}{V_1 - V_2} \right) \times e^{\frac{(x_1 - x_2) \times (V_1 - V_2)}{m \times D^*}}$$

где  $C_2$  – минерализация оросительных вод, г/л;

$C_1$  – минерализация грунтовых вод, г/л;

$x_1$  – глубина стабилизации грунтовых вод, м;

$V_2$ , – среднегодовая интенсивность поступления воды на поверхность почвы, м в сутки;

$V_1$  – среднегодовая интенсивность расходования воды на испарение, м в сутки;

$D^*$  – коэффициент конвективной диффузии,  $m^2$  в сутки;

$m$  – активная пористость;

$x$  – расстояние от поверхности земли,  $m$ .

Время ( $t$ ), в течение которого произойдет стабилизация в накоплении солей, определяют по формуле

$$t = \frac{D^*}{V_2},$$

где  $V = \frac{V_1 - V_2}{m}$  – конвективная скорость перемещения солей.

Для учета расхода воды растениями на транспирацию из всего почвенного слоя предлагается другой способ расчета (здесь он не приведен).

### **Результаты разработки прогноза вторичного засоления почв на юге Украины**

Начав в 1962 г. разработку метода солевого прогноза и совершенствуя его в последующие годы, автор на разных этапах исследований применял два метода. По первому – балансовому – прогноз составляли на основании гидрогеологического прогноза, выполненного Днепропетровским госуниверситетом (В.Д. Филимонов, В.Д. Кращенко и др.) и «Укргипроводхозом» (А.Д. Петраш, В.П. Ивахненко и др.), а также по данным полевых исследований автора с сотрудниками и моделирования процессов передвижения влаги и солей в почвах. Результаты прогноза оформляли на картах масштабов 1:50000, 1:200000, которые составляли на несколько сроков от начала орошения (5; 10; 20 лет и др.) для совхоза «Память Ильича» в зоне Краснознаменной системы и для ряда участков предстоящего орошения Северо-Крымской оросительной системы.

Преимущество оформления данных прогноза на картах состоит в том, что по ним легко определить участки, нуждающиеся в первоочередном строительстве дренажа (участки, где по прогнозу ожидается вторичное засоление) Все эти материалы передавали проектирующей организации, которая использовала их при уточнении проекта.

С появлением метода С.Ф. Аверьянова автор выполнил повторную проработку прогноза вторичного засоления по его методу в сочетании с методом прогноза минерализации грунтовых вод, предложенным автором данной книги. Прогноз составлен для 22 основных ключевых участков в пределах степного Крыма, где до начала орошения велись специальные исследования, отбирались пробы почво-грунтов и грунтовых вод, велось моделирование и т. д. Ключевые участки закладывали на неорошаемых

землях с учетом геоморфологии, геологии и гидрогеологии на отдельных почвенных видах, что позволило разработать солевой прогноз с учетом механического состава и основных водно-физических показателей для следующих почв, расположенных ныне на уже орошаемых участках: темно-каштановых слабосолонцеватых, лугово-каштановых солонцеватых, солонцов, черноземно-луговых и аллювиально-луговых.

В пределах Краснознаменского канала прогноз разработан для лугово-каштановых супесчано-легкосуглинистых и лугово-черноземных легко- и среднесуглинистых почв совхоза «Память Ильича» (терминология почв дается по условиям до ввода в орошение).

Поскольку на каждом ключевом участке (с каким-то одним видом почв) образцы отбирали в 3–6-кратной повторности, а на некоторых в еще большей повторности, то это позволило вести прогнозирование при доверительной вероятности 0,7–0,8.

Для составления прогноза принимали во внимание следующие параметры и условия расчета.

Коэффициент конвективной диффузии  $D^*$  определяли по полевым наблюдениям в лизиметрах и на стационарных площадках, используя для условий установившегося солевого режима метод С.Ф. Аверьянова и для неустановившегося – Л.М. Рекса.

В первом случае для солонцовых почв Крыма по данным лизиметрических наблюдений сопоставляли средние за два года значения содержания солей (плотного остатка и отдельно иона хлора), во втором – сопоставляли данные весны и осени 1966 г., осени 1965 и осени 1966 г.

Расчет по формулам С.Ф. Аверьянова (1965) дал следующие значения  $D^*$  ( $m^2$  в сутки): по плотному остатку 0,00076 и 0,00099; по иону хлора 0,00084 и 0,00111.

Коэффициент конвективной диффузии по неустановившемуся режиму с решением основного уравнения, предложенного Л.М. Рексом (1969) для условий неравномерного начального распределения солей, рассчитывали на ЭВМ «Минск-22» по специально составленной программе (С.Г. Цыгуткин, 1971).

Величина  $D^*$  при сопоставлении сроков весны и осени 1966 г. оказалась равной 0,00037  $m^2$  в сутки, для сроков осень 1965 и осень 1966 – 0,00110  $m^2$  в сутки.

---

\* В последнее время предложены и другие методы определения  $D^*$  (Д.Ф. Шульгин, Р.М. Машарипов, 1973).

Поскольку эти данные оказались близкими к полученным первым способом, они были суммированы и получен средний из шести определений коэффициент конвективной диффузии для солонцовых почв Присивашья, равный  $0,00086 \text{ м}^2$  в сутки ( $8,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  в сутки).

Для западной приморской части террасы-дельты Днепра величину  $D^*$  определяли по двум видам почв — каштаново-луговой супесчаной и черноземно-луговой легкосуглинистой. Вычисления производили по формулам для неустановившегося режима на основании данных динамики солей в период осени 1966 и весны 1967 г. Величина  $D^*$  для каштаново-луговой супесчаной почвы оказалась равной  $0,0038$ , для черноземно-луговой легкосуглинистой почвы —  $0,0020 \text{ м}^2$  в сутки.

Таким образом, для последующих расчетов были приняты следующие значения  $D^*$  ( $\text{м}^2$  в сутки): для тяжелых почв Крымского Присивашья —  $0,00086$ , для почв средне- и легкосуглинистых юга Причерноморья —  $0,0020$ , для почв супесчаных юга Причерноморья —  $0,0038$ .

Опираясь на данные полевых наблюдений Крымской опорной гидрогеологической экспедиции (О.А. Федосеева), «Укргипроводхоза» (В.С. Ставицкий, Ю.А. Чирва и др.), автора и других, мы произвели расчет величины стабилизации уровня грунтовых вод в Крымском Присивашье при следующих исходных данных. Ежегодный подъем уровня грунтовых вод  $1 \text{ м}$ , соотношение потерь из каналов и с полей  $1/2 : 1/2$ , активная пористость в зоне полного водонасыщения  $34\%$  (в объемных величинах), или  $m = 0,34$ ; испаряемость —  $850 \text{ мм}$ ; критическая глубина —  $2 \text{ м}$ .

Скорость подъема грунтовых вод  $V_1 = \frac{1}{365} = 0,00274 \text{ м}$  в сутки.

Поскольку половина этой величины вызвана инфильтрацией с полей, то скорость поступления воды на поля составит  $V_2 = 1/2 V_1 = 1/2 \cdot 0,00274 = 0,00137 \text{ м}$  в сутки. Высота слоя инфильтрующейся воды составит  $V_2 = 0,00137 \cdot 0,34 = 171 \text{ мм/год}$ . Скорость притока воды снизу за счет только инфильтрации из каналов равна  $V_1 - V_2 = 0,00274 - 0,00137 = 0,00137 \text{ м}$  в сутки, а величина слоя воды  $(V_1 - V_2) - m = 0,00137 - 0,34 = 171 \text{ мм/год}$ .

Считая, что стабилизация наступит, когда величина притока  $171 \text{ мм}$  будет равной расходу на испарение, то, используя предложение С.Ф. Аверьянова (1965) по определению этой величины, получим, что она равна  $132 \text{ см}$ .

Итак, после подъема грунтовых вод и принятия относительно устойчивого положения их на глубине  $132 \text{ см}$ , перемещение со-

лей в почве будет зависеть от соотношения скоростей просачивания  $V_2$  и восходящего тока от грунтовых вод – подпитывания грунтовыми водами ( $V_1 - V_2$ ).

Для расчета водного баланса принимали во внимание климатические показатели и рекомендуемые «Укргипроводхозом» нормы и сроки поливов основных сельскохозяйственных культур.

Исходя из того, что на орошаемых полях выращивают различные культуры, расчет водного баланса (водо-поступления и расхода на суммарное испарение) был выполнен по нескольким культурам, а также в целом для поля севооборота (осредненный водный баланс). В последнем случае был принят следующий севооборот, рекомендуемый «Укргипроводхозом» в качестве примерного для степного Крыма: 1–2 поля – многолетние травы; 3– озимая пшеница, пожнивно – кукуруза на зеленый корм; 4– овощные; 5– кукуруза на силос; 6– озимая пшеница, пожнивно – горохово-овсяная смесь; 7– кормовые корнеплоды; 8– яровые зерновые с подсевом многолетних трав. Суммарное испарение рассчитывали по методике А.М. Алпатьева (1954), уточненной для условий юга Украины С.М. Алпатьевым (1965). При этом для поля, занятого разными культурами, вначале вычисляли процент культуры в севообороте, а затем с учетом биологического коэффициента каждой культуры определяли усредненный биологический коэффициент за каждую декаду вегетационного периода. Необходимые для расчетов климатические показатели принимались для года 75%-ной обеспеченности (за теплый и холодный периоды года) по метеостанции Клепинино.

Расчет водного баланса вели для трех его значений: отрицательного, когда на орошаемое поле подают воды меньше, чем необходимо для растений, а потому имеет место подпитывание поверхности почвы грунтовыми водами и величина подпитывания –  $V_1 - V_2 > 0$ ; нулевого (компенсационного) водного баланса, когда количество подаваемой воды соответствует расходу на испарение и транспирацию; и, наконец, положительного, когда на поле подают больше воды, чем необходимо для транспирации и испарения, а потому подпитывание грунтовыми водами поверхности почвы не только не имеет места, но даже  $V_1 - V_2 < 0$ .

Вариант отрицательного водного баланса получен при расчете его показателей для осредненного поля севооборота. Суммарное испарение за год составило 814,9 мм. Оросительная норма (с влагозарядкой) – 4200 м<sup>3</sup>/га, или 420 мм (рекомендована «Укргипроводхозом» для осредненного поля се-

вооборота); количество осадков за год 296,1 мм. Общее водопоступление оказалось равным 716,1 мм. Годовой водный баланс (водопоступление минус расход влаги на испарение) составил  $716,1 - 814,9 \approx -99$  мм, т. е. отрицательный. Величина подпитывания грунтовыми водами ( $V_1 - V_2$ ) равна 0,000271 м в сутки.

Второй вариант водного баланса (нулевой) был получен для поля озимой пшеницы. Результаты расчета таковы: осадки 296,1 мм, оросительная норма 180 мм, влагозарядка 100 мм, общее водопоступление за год 576,1 мм. Расход на испарение составил 579,2 мм. Годовой водный баланс равен  $576,1 - 579,2 = -3,1$  мм, т. е. практически близкий к нулевому. Величина подпитывания грунтовыми водами ( $V_1 - V_2$ ) при данных условиях оказалась равной 0,0000082 м в сутки.

Третий вариант водного баланса (положительный или промывной) получен для такого же поля озимой пшеницы при условии увеличения водопоступления на 20% сверх необходимой величины. В этом случае величина водопоступления оказалась равной 692,1 мм, расход на испарение 579,2 мм, водный баланс  $692,1 - 579,2 = 112,9$  мм или, с округлением, 113 мм. Подпитывание грунтовыми водами поверхности почвы отсутствует, а величина, выражающая подпитывание, имеет отрицательный знак:  $V_1 - V_2 = -0,00031$  м в сутки.

Кроме трех условий различного водного баланса, учитывали три варианта по величине конечной (прогнозируемой) минерализации грунтовых вод. Первый вариант соответствует тому условию, когда грунтовые воды поднимаются на орошаемом участке исключительно за счет потерь воды из каналов и гидростатического отжимания фильтрующимися водами естественных грунтовых вод. В этом случае инфильтрация с полей отсутствует (случай идеального орошения). Грунтовые воды при подъеме осолоняются в той или иной мере вследствие перехода в них солей из почво-грунтов, опреснение (разбавление) инфильтрации не происходит. Соотношение потерь из каналов к потерям с полей равно 1 : 0. Такому варианту соответствует состав грунтовых вод, полученный непосредственно после физического моделирования последовательными солевыми вытяжками.

Второй и третий варианты относятся к случаю, когда подъем уровня грунтовых вод совершается по двум причинам – вследствие потерь воды из каналов и потерь воды с полей. Выше было показано, что при инфильтрации воды на полях вначале происходит заметный вынос солей из грунтов в грунтовые воды, но затем количество выносимых солей резко уменьшается и им практически можно пренебречь.

Учитывая, что прогноз разрабатывается в многолетнем плане, мы приняли условие, что инфильтраты с полей будут пресными (возможность влияния соленых инфильтратов на изменение минерализации грунтовых вод показана нами выше). В этом случае часть воды, теряющаяся на полях и способствующая подъему грунтовых вод, будет вызывать опреснение (разбавление) поднимающихся грунтовых вод. Для расчетов приняты два возможных случая опреснения, один – когда соотношение потерь из каналов к потерям с полей выражается как  $\frac{3}{4} : \frac{1}{4}$ , т. е. происходит разбавление на  $\frac{1}{4}$  объема поднявшихся грунтовых вод, и другой – при соотношении, равном  $\frac{1}{2} : \frac{1}{2}$  т. е. разбавление солевых грунтовых вод совершается наполовину.

Вводя три названные варианта по степени минерализации грунтовых вод, автор стремился отразить возможные случаи, наблюдаемые при ирригации, когда на одном и том же поле встречаются воды разной минерализации.

В качестве примера вычисления степени засоления и распределения солей в темно-каштановой почве после подъема уровня грунтовых вод и их стабилизации на глубине около 1,3 м приведем данные прогноза для орошаемого участка в совхозе «Таврический» (табл. 12).

Здесь показано распределение солей в почве при расходе грунтовых вод на физическое испарение в случае отрицательного, практически нулевого и положительного водного баланса, а в пределах каждого водного баланса — по три варианта с различной степенью минерализации грунтовых вод. Кроме того, для условий отрицательного баланса сделан расчет, при котором учитывался расход влаги только на транспирацию. В целом получилось 12 вариантов солевого прогноза.

Анализ полученных данных позволяет прийти к следующим заключениям. Для осредненного поля севооборота приведенная оросительная норма ( $4200 \text{ м}^3/\text{га}$ ) является недостаточной, поскольку в этом случае складывается отрицательный водный баланс, который в условиях близкого залегания уровня минерализованных грунтовых вод и покрытия дефицита водного баланса расходом грунтовых вод на испарение ведет к аккумуляции солей. Максимальное засоление имеет место при расходе грунтовых вод на физическое испарение с наибольшим засолением поверхностного слоя почвы от 0,54% (при разбавленных наполовину грунтовых водах) до 0,97% (при неизменном после их подъема составе). Накопление солей в таких пределах должно завершиться, как показал расчет, примерно за четыре года.

В случае расхода грунтовых вод только на транспирацию корнями растений из всего корнеобитаемого слоя (в данном случае около 1 м) накопление солей, в соответствии с общими

представлениями, оказывается значительно меньшим – от 0,16 до 0,29% на поверхности почвы. Максимальная аккумуляция солей отмечается на глубине 1 м.

В действительности следует ожидать какую-то среднюю картину засоления, поскольку грунтовые воды будут расходоваться и на транспирацию, и на физическое испарение.

12. Данные прогноза распределения солей по профилю темно-каштановой почвы после подъема уровня грунтовых вод и их стабилизации

Вариант	Культура	Водный баланс	Величина подпитывания грунтовыми водами $V_1 - V_2$	Условия расхода грунтовых вод	Разбавление грунтовых вод пресными инфильтрациями	Пронизываемая минерализация грунтовых вод, г/л	Содержание солей в почве, %, на глубине, м				
							0	0,2	0,5	1,0	1,2
1	Кукуруза, озимая пшеница или другая культура (осредненные данные для поля севооборота)	Отрицательный	+0,000271	Физическое испарение	0	9,9	0,97	0,80	0,64	0,38	0,32
2	»	»	+0,000271	»	¼	7,4	0,77	0,64	0,51	0,30	0,25
3	»	»	+0,000271	»	½	4,9	0,54	0,44	0,36	0,21	0,17
4	»	»	+0,000271	Транспирация	0	9,9	0,29	0,31	0,34	0,36	0,34
5	»	»	+0,000271	»	¼	7,4	0,23	0,25	0,27	0,29	0,27
6	»	»	+0,000271	»	½	4,9	0,16	0,17	0,19	0,20	0,19
7	Озимая пшеница	Практически нулевой	+0,0000082	Физическое испарение	0	9,9	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29
8	»	»	+0,0000082	»	¼	7,4	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23
9	»	»	0,0000082	»	½	4,9	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
10	»	Положительный (промывной)	-0,00031	»	0	9,9	0,07	0,09	0,14	0,21	0,29
11	»	»	-0,00031	»	¼	7,4	0,06	0,07	0,11	0,17	0,23
12	»	»	-0,00031	»	½	4,9	0,04	0,05	0,08	0,12	0,16

При практически нулевом водном балансе (варианты 7–9 с озимой пшеницей), когда подпитыванием грунтовых вод практически можно пренебречь, в почве все-таки происходит некоторое накопление солей.

И, наконец, в том случае, когда подается оросительная норма, на 20% превышающая суммарное испарение (варианты 10–12), и при этом предполагается, что имеется искусственный отток в дрены, поскольку иначе поданная вода должна просто оказаться на поверхности (рассматриваются условия близкого – 1,3 м – залегания грунтовых вод), то в почве будет происходить опреснение. Как показало обследование орошаемого участка в совхозе «Таврический», такое распределение солей свойственно избыточно орошаемым почвам, в которых уровень грунтовых вод находится ниже 1,5–2 м, а воды оттекают по потоку вниз.

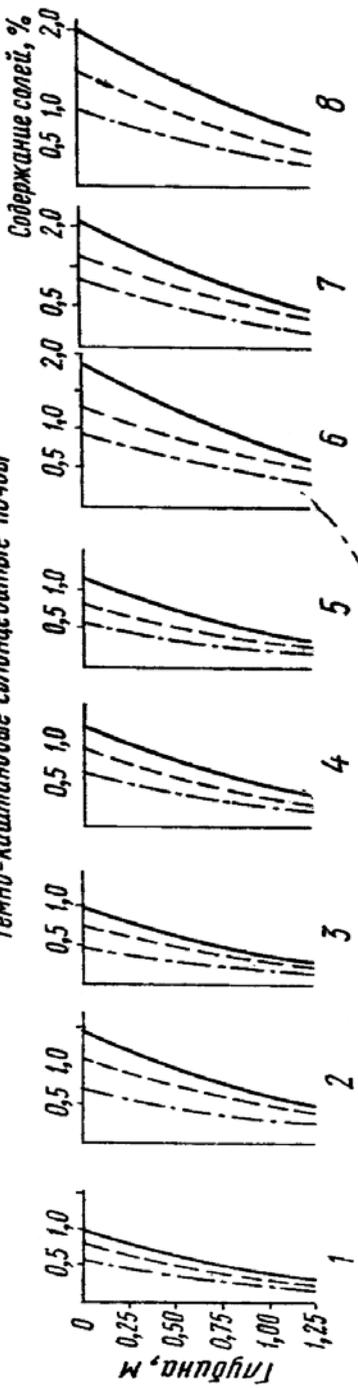
Таким образом, последний из рассматриваемых вариантов может быть примером водно-солевого режима промывного типа, когда при этом имеется отток грунтовых вод (в дрена или понижения рельефа).

Возникает вопрос, в какой мере для целей составления прогнозов можно пользоваться описанным аналитическим методом, основанным на учете механизма конвективной диффузии, поскольку такой механизм имеет место в водонасыщенной среде. Нам представляется, что в условиях близкого залегания грунтовых вод (около 1,3 м) и орошения почва практически является водонасыщенной, особенно после полива. Поэтому имеется определенное основание применять систему расчетов для данного случая вторичного засоления почв.

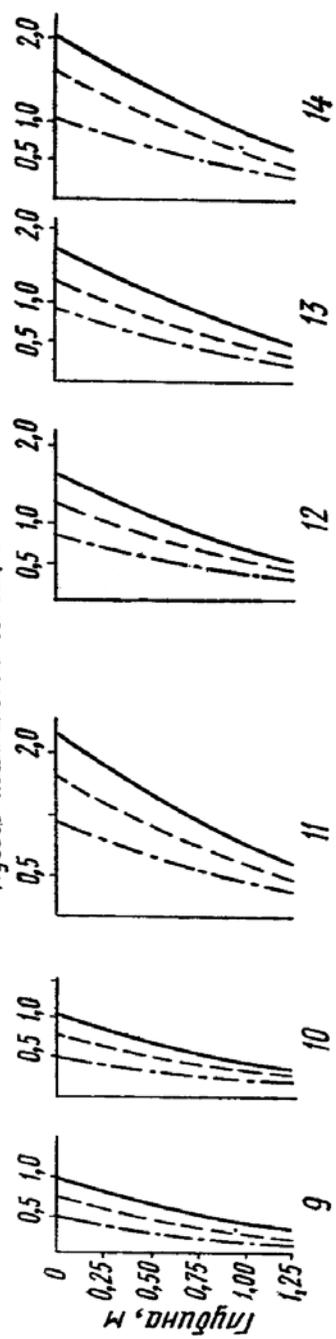
Второй вопрос, связанный с применением данного метода, касается условий, при которых рассматривался этот метод, когда в почве перемещаются только легкорастворимые соли, находящиеся в поровом растворе. Такие условия соблюдаются при составлении солевого прогноза для темно-каштановых, лугово-каштановых почв, черноземов и других, в которых солевой горизонт, содержащий также и среднерастворимые соли (гипс и другие), находится глубже 1,3–1,5 м. Поэтому для большей части почвенного покрова орошаемой территории юга Украины применение этого метода вполне целесообразно, что не исключает возможности проведения соответствующих расчетов по другим аналитическим решениям (Н.Н. Веригин, 1953; В.А. Барон, и др., 1967; В.И. Пеньковский, 1971 и др.).

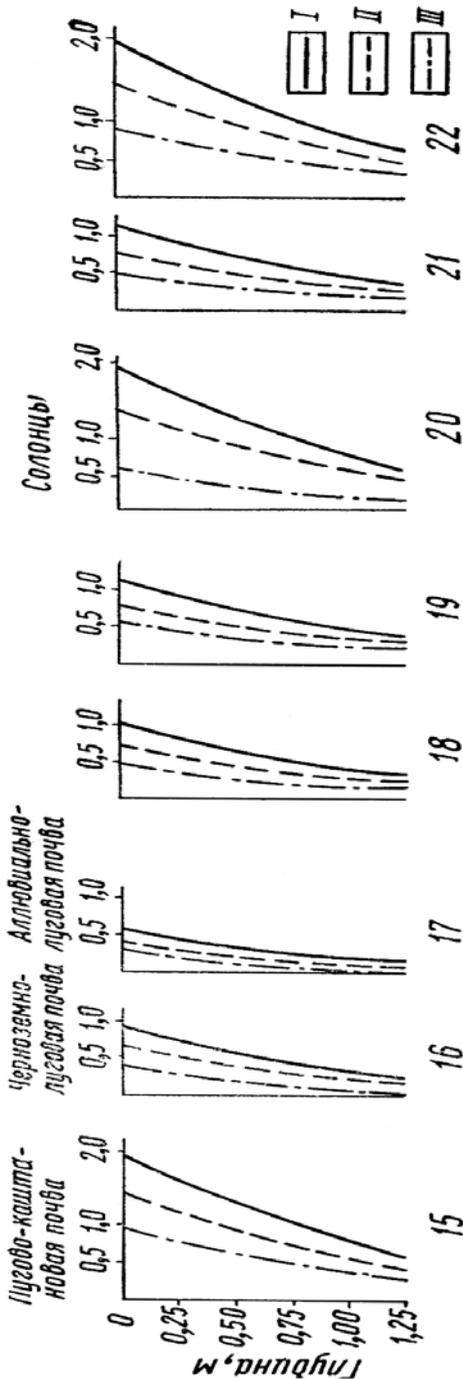
Результаты произведенных расчетов солевого прогноза представлены в виде эпюр распределения солей в различных почвах на 22 ключевых участках степного Крыма (рис. 6)

*Темно-каштановые солонцеватые почвы*



*Лугово-каштановые солонцеватые почвы*





**Рис. 6.** Прогноз вторичного засоления почв в зоне орошения Северо-Крымского канала при отрицательном водном балансе ( $V_1 - Y_2 = 0,00027$  м в сутки; грунтовые воды расходятся на испарение:  $D^* = 0,00086$  м<sup>2</sup> в сутки). Варианты прогноза: I — грунтовые воды не разбавлены; II — грунтовые воды разбавлены на  $1/4$ ; III — грунтовые воды разбавлены на  $1/2$ . Номера ключевых участков от 1 до 22, их местоположение:

а) северо-западное Присивашье, Красноперекопский район; 1 — от с. Пятихатки 3 км на юго-запад; 8 — от с. Кураевка 0,4 км на запад; 20 — от с. Кураевка 0,2 км на север; б) — западное Присивашье, Раздольненский район; 3 — от с. Максимовка 3 км на север; 4 — от с. Червоное 1,5 км на северо-запад; 9 — от с. Ручьи-2 км на восток; 10 — от с. Новое 0,5 км на северо-запад; 11 — от с. Воронцовка 2 км на север; 18 — от с. Ручьи 1,5 км на запад; 19 — от с. Кропоткино 0,6 км на восток; 21 — от с. Новое 0,4 км на северо-запад; в) центральное Присивашье, Красноперекопский (частично) и Джанкойский районы; 2 — от с. Вишневка 7 км на юг; 5 — от с. Лобаново 1,5 км на запад; 6 — от с. Колоски 1 км на юг; 12 — от с. Ермаково 1,5 км на юг; 13 — от с. Боброво 1 км на запад; 14 — от с. Новомихайловка 0,6 км на юго-восток; восточное Присивашье — Джанкойский (б. Азовский) и Нижнегорский районы; 7 — от с. Новосельцево 1,3 км на восток; 16 — от с. Чкалово 1 км на северо-запад; 16 — от с. Лиственное 1 км на северо-восток; 17 — от с. Лиственное 0,5 км на юго-восток; 22 — от с. Велнкоселье 2,5 км на юго-запад.

Прогноз показывает следующее. Если на орошаемом поле поддерживается такой режим орошения, при котором испарение превышает водопоступление (отрицательный водный баланс) и дренаж отсутствует, в почвах всех рассматриваемых ключевых участков может начаться вторичное засоление (в большей или меньшей степени) через четыре года после начала орошения. За этот срок грунтовые воды поднимутся и займут стабильное положение на глубине около 1,3 м.

Интенсивность проявления вторичного засоления будет зависеть от степени минерализации грунтовых вод (о влиянии водно-физических свойств было сказано ранее). Если грунтовые воды будут иметь прогнозируемую минерализацию, соответствующую результатам физического моделирования, то ожидаемое вторичное засоление будет максимальным и составит в большинстве почв 1–2% (в их верхних слоях). Лишь в аллювиально-луговых почвах степень возможного засоления будет слабее – 0,5%.

Если же минерализация грунтовых вод будет меньше на  $\frac{1}{4}$  от предыдущей, то в большинстве почв ключевых участков ожидаемое вторичное засоление будет находиться в пределах 0,7–1,7%.

При условии еще большего разбавления грунтовых вод пресными инфильтратами (на  $\frac{1}{2}$ ) размеры вторичного засоления будут меньше. Прежде всего это относится к почвам речных долин (ключевые участки № 16 и 17), где величина засоления составит всего 0,3–0,4%. Несколько выше (0,4–0,5%) оно будет в темно-каштановых и лугово-каштановых почвах Раздольненского района Крымской области (западное Присивашье) на ключевых участках № 3 и 9. Еще сильнее – 0,5 и 0,7% – засоление охватит темно-каштановые почвы и степные солонцы других районов Присивашья. И самое большое для всего данного варианта водного баланса и условий минерализации грунтовых вод засоление будет в лугово-каштановых солонцеватых почвах и солонцах лугово-степных в связи с более повышенной минерализацией грунтовых вод в этих почвах по сравнению с другими.

В рассматриваемом случае отрицательного водного баланса соли должны распределяться в почвенном профиле таким образом, что максимум их будет находиться на поверхности.

Результаты прогноза по второму варианту водного баланса – практически нулевому, когда приход влаги и расход ее

весьма близки, значительно отличаются от результатов прогноза для условий отрицательного водного баланса.

Прежде всего количество солей, которое может находиться в почвах, оказывается весьма небольшим даже при условиях, когда грунтовые воды не разбавлены пресными инфильтратами.

Ожидаемое содержание солей в почвах речных долин (ключевые участки № 16 и 17), а также в темно-каштановых, лугово-каштановых почвах и солонцах Присивашья (ключевые участки № 8, 9 и 10) таково (0,2 – 0,3%), что почвы можно отнести к незасоленным.

В большинстве ключевых участков с темно-каштановыми почвами других территорий ожидаемое засоление также невелико – 0,3–0,5, увеличиваясь до 0,6–0,7% в лугово-каштановых солонцеватых почвах. Наличие солей в почвах соответствует концентрации грунтовых вод. Распределение солей по почвенному профилю практически равномерное.

В случае, если грунтовые воды опреснить на  $\frac{1}{4}$ , по сравнению с результатами моделирования, прогноз становится еще более благоприятным. Почвы речных долин, темно-каштановые почвы основной части ключевых участков, а также лугово-каштановые и солонцы западного Присивашья оказываются практически незаселенными (0,2–0,3% солей). Лишь в лугово-каштановых почвах ряда ключевых участков (№ 8, 11, 13, 14, 15) ожидаемое содержание солей может составлять 0,4 – 0,5%. И наконец, при значительном разбавлении грунтовых вод (наполовину) во всех почвах Присивашья вторичное засоление не должно наступить.

При третьем варианте водного баланса орошаемой территории, когда водопоступление превышает расход на испарении на 20% и имеется дренаж, обеспечивающий сохранение грунтовых вод на одном уровне (около 1,3 м), создается наиболее оптимальный солевой режим, при котором не происходит вторичное засоление почв. Соли распределяются по профилю почв в этом случае таким образом, что максимум их приходится на нижнюю часть, вблизи уровня грунтовых вод. Такой профиль свидетельствует об интенсивном отжимании солей вниз, рассоления.

Прогноз засоления почв в условиях, когда грунтовые воды расходуются только на транспирацию, при отрицательном водном балансе является положительным. Лишь для лугово-

каштановых почв при отсутствии разбавления грунтовых вод возможна заметная аккумуляция солей с образованием максимума на глубине около 1 м (размеры ожидаемого засоления в верхних горизонтах 0,5–0,6%).

В случае разбавления грунтовых вод на  $1/2$  засоления не должно произойти.

Солевой прогноз для Краснознаменной оросительной системы был составлен нами только для одного хозяйства – совхоза «Память Ильича», поскольку в этой системе орошение ведется уже в течение 10 лет и данные прогноза не представляют такого интереса, как для массивов, где орошение еще только проектируется или начинается.

Прогноз по методу С.Ф. Аверьянова иллюстрируется в данной работе по одному варианту баланса (отрицательному) для двух видов почв: каштаново-луговой супесчаной и черноземно-луговой легкосуглинистой при двух значениях прогнозируемой минерализации грунтовых вод – 4 и 6 г/л. Результаты прогноза показаны в таблице 13.

13. Прогнозируемое содержание солей, %, в почвах совхоза «Память Ильича» Скадовского района Херсонской области (условия прогнозных расчетов: водный баланс отрицательный,  $V_1 - V_2 = 0,000271$  м в сутки, грунтовые воды расходуются на испарение)

Минерализация грунтовых вод, г/л	Глубина от поверхности, м				
	0	0,2	0,5	1,0	1,3
<i>Каштаново-луговая супесчаная почва, <math>D^* = 0,0038</math> м<sup>2</sup> в сутки</i>					
4,0	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
6,0	0,17	0,16	0,15	0,13	0,11
<i>Черноземно-луговая легкосуглинистая почва, <math>D^* = 0,002</math> м<sup>2</sup> в сутки</i>					
4,0	0,19	0,17	0,15	0,12	0,10
6,0	0,27	0,25	0,22	0,17	0,15

Как видно из этих данных, возможное вторичное засоление невелико по сравнению с таковым в почвах Северо-Крымского орошаемого массива. При минерализации грунтовых вод 4 г/л в верхнем горизонте каштаново-луговой супесчаной почвы может накопиться всего 0,13% солей, в черноземно-луговой легкосуглинистой – около 0,2% (т. е. в пределах слабого

засоления при хлоридном составе солей). При более высокой минерализации грунтовых вод – 6 г/л вторичное накопление солей возрастает до 0,17% в супесчаной и до 0,3% в легкосуглинистой почве.

Меньшие размеры вторичного засоления по сравнению с возможным засолением почв Крымского Присивашья объясняются легким механическим составом, большой величиной коэффициента конвективной диффузии ( $D^*$ ), исходной опресненностью почв и слабой минерализацией грунтовых вод.

В заключение можно отметить, что прогноз вторичного засоления оказался более благоприятным (в количественном отношении) для почв легкого механического состава, имеющих меньшую засоленность и небольшую минерализацию грунтовых вод (терраса-дельта Днепра, особенно ее западная часть, древние террасы р. Салгир и др.).

По степени усиления возможного засоления после этих почв на втором месте стоят почвы более тяжелого механического состава западного Присивашья, на третьем — почвы высокого Присивашья (северо-западная, центральная и восточная его части) и на четвертом — почвы среднепониженного Присивашья (те же его части).

Разработка прогноза вторичного засоления почв по нескольким вариантам позволила получить разностороннюю информацию о возможном направлении солевого режима в разных условиях орошения. Это особенно важно для почв Северо-Крымской оросительной системы, где орошение в ряде районов только начинается. Можно заблаговременно оценить возможное влияние тех или иных вариантов режима орошения (конечным проявлением которых является водный баланс) и выбрать те из них, которые не будут вызывать вторичное засоление, а при высокой исходной засоленности почво-грунтов и грунтовых вод – подобрать режим, способствующий опреснению почв.

Опираясь на данные прогноза, можно сделать в этом плане заключение о том, что при орошении почв речных долин (р. Салгир и др.) можно поддерживать такой режим орошения, при котором водный баланс будет нулевым, т. е. поступление влаги для полива (плюс осадки) будет компенсироваться расходом ее на испарение и транспирацию.

Такой же режим можно применять и на территории высокого Присивашья (в его северо-западном, западном и восточном районах), где развиваются степные почвы и комплексы, а также

на среднепониженной части западного Присивашья с лугово-каштановыми почвами. По аналогии с темно-каштановыми почвами, и учитывая еще меньшую засоленность пород и грунтовых вод, такой же режим орошения будет целесообразен и на остальной более высокой части равнинного Крыма с черноземными почвами.

Разумеется, необходимо устройство дренажа с тем, чтобы не допустить подъема уровня грунтовых вод выше критического.

Иначе обстоит дело с территорией среднепониженного Присивашья в северо-западной, центральной и восточной его частях, где развиваются лугово-степные комплексы (лугово-каштановые почвы и солонцы). Здесь в связи с повышенной засоленностью почв, пород и грунтовых вод необходимо поддерживать такой режим орошения, который бы способствовал выносу солей из почвы, т. е. режим, при котором водный баланс является положительным (поступление влаги превышает расход на испарение и транспирацию) в условиях дренажа.

### **Сопоставление прогнозируемого и фактического засоления почв**

Проверка прогноза осуществлялась нами в зоне Краснознаменского канала на территории совхозов «Память Ильича» и «Приморский» и в зоне Северо-Крымского канала — совхозов «Таврический», «Днепровский» и «Орловский».

Теоретические и фактические данные для почв с прогнозируемой (или близкой к ней) глубиной грунтовых вод приведены в таблицах 14 и 15.

Как видно из приведенных данных, прогноз вторичного засоления в целом оправдался. Во всех приводимых разрезах в верхнем слое наблюдалось максимальное содержание солей, превышающее токсические пределы и характерное для современного активного соленакопления. По ряду разрезов отмечено даже появление солевой корки на поверхности почв (эти данные более подробно приведены в главе IV).

Сравнив между собой результаты прогноза, полученные с помощью разных методов, необходимо констатировать, что в целом они показывают одинаковую направленность процесса соленакопления.

Следует еще раз подчеркнуть, что прогноз солевого режима является весьма важной проблемой, решение которой находится в стадии становления. Поэтому, наряду с примененными нами методами, используют и другие.

Необходимо вести дальнейшие исследования в этой области знаний, накапливать фактический материал по характеристике исходных параметров, применяемых в расчетах, ибо от них зависит обоснованность прогноза, совершенствовать методику определения этих параметров.

В целом же прогноз вторичного засоления можно рассматривать как научное обоснование необходимости, во-первых, применяемого режима орошения и, во-вторых, планирования и учета мероприятий по предупреждению подъема уровня грунтовых вод и вторичного засоления, а в целом для более глубокой оценки пригодности территории для орошения.

14. Теоретически ожидаемое на конец вегетационного периода через 3–5 лет после начала орошения и фактическое распределение солей, %, на тот же период в орошаемых почвах в зоне Северо-Крымской оросительной системы

Глубина, см	Балансовый метод	Метод Аверьянова	Глубина, см	Совхозы						
				„Таврический“ „Днепровский“ „Орловский“						
				Разрезы						
			542	550	534	529	1	2	1	
Ожидаемое распределение солей			Фактическое распределение солей							
0	1,07	0,77	2–20	1,12	0,75	0,26	0,30	0,35	0,33	1,33
20		0,64	20–50	1,26	0,32	0,24	0,29	0,37	0,35	0,80
50		0,51	50–70	0,99	1,01	—	0,29	0,44	0,34	0,78
100		0,30	70–100	—	0,46	—	0,29	—	0,41	0,35
120		0,25								
Прогнозируемая глубина грунтовых вод, м			Фактическая глубина грунтовых вод, м							
	1,0	1,3	—	0,90	0,84	1,0	1,14	1,0	1,4	0,8
Прогнозируемая минерализация грунтовых вод, г/л			Фактическая минерализация грунтовых вод, г/л							
	7,4	7,4	—	8,1	—	7,5	10,4	11,2	18,8	13,5

Примечание. Расчет по Аверьянову выполнен для следующих условий: осредненное поле севооборота при отсутствии дренажа, водный баланс отрицательный,  $V_1 - V_2 = 0,000271$  м в сутки; грунтовые воды разбавлены на  $1/4$  пресными инфильтратами и расходуются только на испарение; почвы тяжелосуглинистого и легкосуглинистого механического состава.

15. Теоретически ожидаемое на конец вегетационного периода через 3–5 лет после начала орошения и фактическое распределение солей, %, на тот же период в орошаемых почвах в зоне Краснознаменной оросительной системы

Глубина, см	Балансовый метод	Метод Аверьянова	Глубина, см	Совхозы							
				„Память Ильича“, октябрь, 1965 г.					„Приморский“, август, 1971 г.		
				5	7	9	11	21	3	1	
Ожидаемое распределение солей			Фактическое распределение солей								
0	0,40	0,19	5—20	0,07	0,69	0,28	0,19	0,65	0,10	1,09	
20		0,17	20—50	0,10	0,38	0,21	0,15	0,48	0,10	0,80	
50		0,15	50—100	0,07	0,36	0,18	0,25	0,20	0,07	0,47	
100		0,12	100—150	0,09	0,23	0,15	0,21	—	—	—	
120		0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	
Прогнозируемая глубина грунтовых вод, м			Фактическая глубина грунтовых вод, м								
	1,0	1,3	—	1,10	0,93	1,0	1,8	1,11	0,80	0,90	
Прогнозируемая минерализация грунтовых вод, г/л			Фактическая минерализация грунтовых вод, г/л								
	4,0	4,0	—	1,68	4,9	4,0	6,3	3,2	1,3	28,0	

**Примечание.** Расчет по Аверьянову выполнен для следующих условий: осредненное поле севооборота при отсутствии дренажа, водный баланс отрицательный,  $V_1 - V_2 = 0,00271$  м в сутки.  $D^* = 0,002$  м<sup>2</sup> в сутки; грунтовые воды не разбавлены пресными инфильтратами и расходуются только на испарение; почвы легкосуглинистого механического состава. При расчете по балансовому методу осенне-зимнее выщелачивание солей принималось равным 70%.

## Выводы

1. Оценка пригодности любого региона под орошение должна осуществляться не только на основании данных об исходном его состоянии (первый этап оценки), но и с учетом предполагаемых изменений под влиянием будущей ирригации, т. е. с учетом прогноза мелиоративной обстановки (второй этап оценки).

На первом этапе (оценка исходного состояния территории) должны учитываться такие общепринятые показатели, как геоморфологические условия, геологическое строение, состав и фильтрационные свойства почвообразующих и подстилающих пород, гид-

рогеологические условия (в частности глубина грунтовых и пластовых вод, их взаимосвязь, минерализация и химический состав), климатические условия, особенности почвенного покрова – его структура, состав и свойства почв, в том числе фильтрационные, солонцеватость и т. д.

Кроме них, необходимо использовать и другие показатели: степень естественной дренированности территории по количественным данным; характеристика засоленности пород (до регионального водоупора) и почв по массовым данным, обработанным методами математической статистики; характеристика засоленности по двум показателям вместо общепринятого одного – по общему содержанию солей и по токсичным солям; оценка исходных запасов солей по так называемому «критическому» содержанию солей, под которым предлагается понимать средневзвешенное содержание токсичных солей, превышающее порог токсичности.

Второй этап оценки должен основываться на данных о предполагаемых изменениях рассматриваемой территории под влиянием орошения, которые необходимо определить при специальном исследовании по прогнозированию мелиоративной обстановки (прогноз гидрогеологический, прогноз солевого режима и т. д.). Для разработки прогноза солевого режима можно воспользоваться методическими предложениями автора книги (прогноз минерализации грунтовых вод путем физического моделирования, использование полученных данных для расчетов возможного изменения содержания солей в почвах по балансовому методу или расчетному, основанному на механизме конвективной диффузии, применение поливариантной системы расчетов и т. д.). Основанием для рекомендации использования метода автора служит удовлетворительная сходимости прогнозируемых и фактически полученных значений засоленности почв на некоторых орошаемых участках почв Украины.

Суммарная оценка пригодности территории (по исходным и прогнозным данным) получает отражение в мелиоративном районировании изучаемого региона.

2. Для предупреждения дальнейшего ухудшения мелиоративной обстановки на юге Украины и повышения плодородия орошаемых почв необходимо осуществить ряд мероприятий, к числу которых относятся следующие: строгое водопользование – высокая техника поливов; систематическая очистка существующих земляных каналов от сорной растительности; облицовка каналов водонепроницаемым экраном; посевы многолетних трав, особенно люцерны; устройство лесных полос вдоль каналов;

мульчирование поверхности земли для предохранения от испарения; дренаж для предупреждения подъема уровня грунтовых вод и регулирования водно-солевого режима; агротехнические мероприятия.

3. Наблюдения за фактическим изменением мелиоративной обстановки на отдельных орошаемых участках зон Краснознаменской и Северо-Крымской оросительных систем в первое десятилетие ирригационной эксплуатации дали возможность выявить закономерности:

а) под влиянием потерь воды из Каховского водохранилища, магистральных, межхозяйственных и внутрихозяйственных каналов, а также непосредственно на полях происходит повсеместный подъем уровня грунтовых вод, особенно значительный в зоне Краснознаменской оросительной системы;

б) там, где грунтовые воды хотя и поднимаются, но залегают пока глубже 2 м, происходит опреснение почв. В местах, где грунтовые воды при орошении поднялись выше 2–1 м, появилось вторичное засоление.

# СОДОПРОЯВЛЕНИЕ И ОЩЕЛАЧИВАНИЕ В БОГАРНЫХ И ОРОШАЕМЫХ ПОЧВАХ ЮГА УКРАИНЫ <sup>1</sup>

А.В. Новикова, Н.Е. Гаврилович

## Введение

В почвенном покрове Украины значительную часть (до 40 %) занимают почвы степной зоны (южной и сухой степи). Это чернозёмы и тёмно-каштановые, каштановые и другие почвы. Весь регион представляет собой основную житницу страны. Климатические условия в целом благоприятствуют земледелию, но периодически имеют место засушливые явления, приводящие к резкому снижению урожая сельскохозяйственных культур, а иногда и к полной его гибели. Преодолеть засуху можно лишь путём применения орошения.

В 50-е годы XX столетия на юге Украины было введено орошение в степной зоне благодаря сооружению каскада водохранилищ на Днестре и строительству крупных государственных оросительных систем (Краснознаменская, Северо-Крымская и другие). К началу 1982 года орошаемая площадь достигла более двух миллионов гектаров.

Основная цель орошения – получать высокие и стабильные урожаи сельскохозяйственных культур, в основном была достигнута, что обеспечило относительную экономическую независимость республики от природной стихии. Но уже на первых этапах строительства оросительных систем были допущены ошибки, которые объяснялись отсутствием соответствующего опыта проектирования и строительства крупных гидросооружений. Каналы не были покрыты надёжной гидроизоляцией, не строилась коллекторно-дренажная сеть, имели место и другие упущения. Поэтому в первые же годы орошения появились признаки подтопления и вторичного засоления, а также осолонцевания орошаемых почв. Потребовалось мелиоративное переустройство оросительных систем, которое в значительной степени позволило улучшить мелиоративную обстановку.

Если такие последствия орошения, как подтопление, вторичное засоление и осолонцевание, не явились неожиданными, то совершенно новым оказалось проявление процессов ощела-

---

<sup>1</sup> Монография А.В. Новиковой и Н.Е. Гаврилович с таким же названием опубликовано под научной редакцией член-корр. УААН проф. С.А. Балюка. Харьков, 2007, 80 с.

чивания и содопроявления в незасоленных и глубокозасоленных нейтральными солями орошаемых почвах – чернозёмах, тёмно-каштановых и др.

Содопроявление обнаружилось также и за пределами Украины: на Северном Кавказе (Бобков, 1976, Буйлов, 1982), в Нижнем Поволжье (Зимовец, 1975).

Поскольку содовое засоление является наиболее токсичным для растений (Ковда, 1965, Мигунова, 1985), то оно грозило гибелью или резким снижением урожая сельскохозяйственных культур на орошаемых землях. Поэтому в 80-90 годы почвоведомы Национального научного центра «Институт почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского» совместно с гидрогеологами системы Министерства мелиорации и водного хозяйства Украины были организованы комплексные исследования, позволившие определить, прежде всего, географические границы распространения содопроявления в почвах при их орошении на юге Украины, а также его глубину по профилю и интенсивность. Были составлены региональные карты и генерализованная карта содопроявления при орошении. Кроме того, дополнительно изучались причины появления соды при орошении и разрабатывались меры его предупреждения и борьбы с ним.

В настоящее время вопрос охраны почв от деграционных явлений в земледелии остается по-прежнему важным для Украины. В связи с этим возникла необходимость в обобщении и публикации результатов научных исследований по содопроявлению и ощелачиванию почв юга Украины в богарных и орошаемых условиях для широкого практического использования их как в нашей стране, так и за её пределами.

Необходимость публикации данных материалов диктуется также тем, что в последние годы в Украине стала сокращаться гидромелиорация: оросительные каналы и дренажная сеть не имеют надлежащего технического ухода, приходят в негодность, дождевальная техника исчезает с полей, площадь орошаемых земель сокращается. Причиной является низкий уровень экономики, недостаток средств как следствие трудностей при переходе государства к рыночным отношениям.

Упадок в развитии оросительной мелиорации по времени совпал с усилением глобального потепления климата на планете, его аридизацией, вызванной парниковым эффектом.

Особенно резкое потепление климата произошло весной 2007 года, когда из-за засухи погиб урожай озимых культур во многих южных областях Украины. Стало очевидным, что без восстановления оросительной мелиорации невозможно обеспе-

чить население продуктами питания. Необходимо не только восстановить орошаемое земледелие на юге Украины, но и провести химическую мелиорацию солонцовых почв и тех, в которых обнаружилось содопроявление и ощелачивание. В работе предложены приемы повышения эффективности использования орошаемых земель.

### **Содопроявление в неорошаемых почвах юга Украины**

На земном шаре содовое засоление почв довольно широко распространено. Оно отмечается в Австралии, Индии, Иране, Китае, южной Америке и других странах. На территории России оно обнаружено в верховьях Дона и Западной Сибири (Ковда, 1965).

В Украине содовое засоление почв встречается широко в тех местах, где близко к поверхности залегают грунтовые воды, содержащие соду. Это отдельные регионы Полесья и Лесостепи, а также небольшой участок Степи (терраса-дельта Днепра). Как отмечает Г.С. Гринь, 1969, в зоне Полесья сода встречается только в южной левобережной его части – Черниговском Полесье, которое расположено в пределах Днепроовско-Донецкой впадины. В поймах и на низких террасах этого района близко к поверхности залегают грунтовые воды, содержащие соду, что является причиной засоления почв.

В Лесостепи содовое засоление широко встречается в левобережной низменной части (среднее Приднепровье), приуроченной также к Днепроовско-Донецкой впадине. Грунтовые воды содового химизма также находятся близко к поверхности и засоляют содой почвы – лугово-чернозёмные солонцеватые, солонцы и др.

В центральной Степи, где в автоморфных условиях при глукбоком залегании грунтовых вод развиваются чернозёмы обыкновенные и южные, сода в горизонте максимального накопления солей отсутствует. Химизм солей нейтральный. Распределение солей по профилю позволяет отнести почвы к остаточноккумулятивному типу (Г.С. Гринь, 1969). Верхняя часть почв незасолена и содержит небольшое количество гидрокарбонатов кальция и магния. Но нередки случаи, когда в самой нижней опреснённой части появляется бикарбонат или даже карбонат натрия. Еще ниже располагается солевой горизонт сульфатного, хлоридно-сульфатного или сульфатно-хлоридного типа.

Появление соды Г.С. Гринь объясняет рассолонцеванием почвы, испытавшей некогда засоление и осолонцевание.

Такая же специфика распределения водорастворимых солей отмечается и в автоморфных почвах сухой Степи.

С приближением грунтовых вод к поверхности солевой горизонт в почвах повышается, образуя солевой профиль аккумулятивного или активно-аккумулятивного хлоридносульфатного типа, а при содовом химизме грунтовых вод – активно-аккумулятивного хлоридно-сульфатно-содового типа. Таковы основные закономерности распространения почв содового засоления на Украине в зонах Лесостепи и Полесья, а также в степных почвах северного Причерноморья.

В южной части Причерноморья (Северо-Крымская или Привисашская низменность), как показали исследования А.В. Новиковой (1959, 1962) на низком побережье Сиваша и в районе морских водоёмов, где грунтовые воды залегают очень близко к поверхности (1 – 1,5 и 2 м), почвы испытывают капиллярно-грунтовое увлажнение и сезонно необратимый режим засоления. Химизм солей в первом горизонте их аккумуляции преимущественно хлоридный и сульфатно-хлоридный. Это – солончаки приморские и солончаковые почвы.

Несколько выше по гипсометрическому уровню и дальше от берега моря и Сиваша грунтовые воды залегают в пределах 3–6 м от поверхности. В таких почвах устанавливается пленочно-капиллярное увлажнение с сезонно обратимым (пульсирующим) режимом засоления-рассоления. В первом горизонте характер аккумуляции солей свидетельствует о преимущественно хлоридно-сульфатном натриевом и кальциевом засолении. Подобный солевой режим испытывают полугидроморфные и частично гидроморфные почвы – лугово-степные солонцы, лугово-каштановые солонцеватые и другие почвы.

И, наконец, в высокой части Крымской Степи, где грунтовые воды залегают глубже 8 м, формируются почвы элювиального типа водного режима (непромывного), где сезонная солевая динамика направлена в сторону рассоления. Химизм первого горизонта солевой аккумуляции преимущественно сульфатно-кальциевый. Это автоморфные комплексы солонцов степных с тёмно-каштановыми солонцеватыми почвами, тёмно-каштановые остаточносолонцеватые и чернозёмы южные.

В соответствии с водно-солевым режимом в разных почвах происходит неодинаковое распределение водорастворимых солей хлоридного или сульфатно-хлоридного химизма. В почвах с сезонно обратимым процессом засоления уже с самой поверхности (0–5 см) обнаруживается максимальное накопление солей. В почвах с сезонно обратимым процессом засоления-

рассоления верхняя их часть (в пределах верхнего полуметра или метра) опреснена, а под ней залегает горизонт солевой аккумуляции хлоридно-сульфатного или сульфатного типа засоления. В почвах с сезонно необратимым режимом рассоления большая часть профиля (до 1,5–2 м) оказывается опреснённой.

В целом для большинства почв характерно наличие двух частей почвенного профиля: сверху незасоленная, а ниже засоленная. Что касается химического состава солей первого горизонта их аккумуляции, то он, как отмечено выше, заметно меняется в разных почвах – от хлоридного и сульфатно-хлоридного до хлоридно-сульфатного и сульфатного. Поэтому прослеживается чёткая геохимическая зональность, получившая отражение на карте типов засоления почв степного Крыма (Новикова, 1959).

В опреснённой же части почвенного профиля состав водорастворимых солей преимущественно бикарбонатно-кальциевый и бикарбонатно-магниевый. Вместе с тем весьма часто обнаруживается, что по мере приближения к горизонту аккумуляции солей в их составе появляются бикарбонат натрия, а иногда и нормальная сода. Общее содержание солей в такой части профиля сохраняется небольшим (0,1–0,2, реже 0,3%).

В качестве примера рассмотрим данные водных вытяжек в некоторых почвах степного Крыма (табл. 1). Но прежде отметим, что выделение горизонтов почв с содопроявлением осуществлялось нами, как это рекомендуется (Базилевич, Панкова, 1969) по соотношению катионов и анионов в водных вытяжках. Дополнительно учитывалось отношение содержания иона  $\text{HCO}_3$  к сумме Ca и Mg (коэффициент содопроявления  $K_c$ , или коэффициент содовости по Е.В. Посохову (1969). Если величина коэффициента содопроявления превышает 1, можно считать, что в почве присутствует сода (Бобков, 1976; Посохов, 1969).

$$K_c = \frac{\text{HCO}_3}{\text{Ca} + \text{Mg}}$$

Как видно из таблицы 1, величина  $K_c$  сильно колеблется в разных горизонтах почв степного Крыма. Так, в солончаке (р. 121) она меньше единицы по всему профилю, что свидетельствует об отсутствии в нем соды. В горизонтах аккумуляции солей других почв ее тоже нет.

Во всех других приведенных разрезах почв сода обнаруживается, но с разной интенсивностью. В солонце луговом (р. 124) величина  $K_c$  наиболее высокая – 4,2. Она приходится на верхний иллювиальный и переходный иллювиально-карбонатный горизонты. В солонце лугово-степном (р. 117) и

степном (р. 128) этот показатель снижается до 3. В тёмно-каштановой почве (р. 126) и южном чернозёме (р. 6) **Кс** уменьшается до 1,9–1,5.

Таблица 1. Данные анализов водных вытяжек из неорошаемых почв степного Крыма и интенсивность содопроявления в них (Новикова А.В., 1962)

Номер разреза, почва	Глубина, см	Сухой остаток, %	мг-экв на 100 г почвы						K <sub>c</sub>
			HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	
р.121 Солончак приморский	0-4	3,38	0,52	18,87	7,87	1,95	18,67	36,64	<1
	4-12	2,53	0,80	34,14	6,25	1,10	7,58	31,51	<1
	15-25	3,79	0,49	33,11	26,02	11,40	14,25	33,92	<1
р. 124 Солонец солончаковатый луговой	0,10	0,06	0,54	0,03	0,35	0,25	0,25	0,42	1,0
	25-35	0,10	0,79	0,03	0,52	0,30	0,25	0,79	1,4
	45-55	0,10	1,29	0,03	0,27	0,20	0,33	1,05	2,4
	60-70	0,16	1,77	0,03	0,27	0,25	0,17	1,65	4,2
75-85	0,86	0,49	0,11	11,94	5,30	2,25	4,99	<1	
р.117 Солонец солончаковатый лугово-степной	0-17	0,06	0,51	0,03	0,31	0,25	0,25	0,35	1,0
	20-30	0,07	0,69	0,03	0,23	0,20	0,17	0,58	1,8
	45-55	0,13	1,28	0,53	0,25	0,30	0,08	1,68	3,3
	60-70	0,23	1,08	1,35	1,00	0,25	0,50	2,68	1,4
	70-80	0,33	0,87	2,14	2,31	0,55	0,75	4,02	<1
80-90	1,10	0,46	2,73	13,60	5,95	4,50	6,34	<1	
р. 128 Солонец глубоко-солончаковатый степной	0-10	0,07	0,33	0,05	0,27	*	*	*	*
	45-55	0,12	1,28	0,34	0,35	0,25	0,17	1,55	3,0
	65-75	0,16	1,33	0,39	0,56	0,25	0,17	1,86	3,1
	105-115	0,53	0,65	2,10	5,44	0,90	1,67	5,63	<1
р.126 Тёмно-каштановая почва	0-10	0,05	0,41	0,11	0,10	0,35	0,17	0,14	<1
	35-45	0,05	0,57	0,08	0,12	0,35	0,17	0,25	1,0
	50-60	0,06	0,80	0,11	0,14	0,55	0,25	0,25	1,1
	70-80	0,07	1,03	0,11	0,08	0,40	0,25	0,57	1,5
	140-150	0,32	1,05	1,43	2,52	0,35	0,50	1,15	1,2
200-210	1,81	0,43	2,78	23,17	13,30	6,63	6,36	<1	
р. 6 Чернозем южный	0-10	0,07	0,27	0,10	0,56	0,51	0,14	0,30	<1
	30-40	0,10	0,54	0,06	следы	0,30	0,20	0,12	1,0
	90-100	0,09	1,02	0,06	следы	0,30	0,22	0,56	1,9
	190-200	0,28	0,77	0,06	3,12	0,80	0,79	2,36	<1

Примечание: \* не определяли.

Таким образом, на примере изученных разрезов можно убедиться, что в незаселенных горизонтах солонцовых почв и южном чернозёме обнаруживается сода. В соответствии с классификацией Базилевич и Панковой, (1969) тип засоления этих горизонтов является содово-хлоридным или содово-сульфатным натриевым.

Для подтверждения этого вывода требовалось изучить состав водных вытяжек на более представительном массовом материале, с применением статистического анализа. Для этого нами (А.В. Новикова, В.Н. Калиниченко, 1988) были использованы собственные данные, а также результаты, полученные Крымской почвенной партией института Укрземпроект и другими исследователями.

Прежде всего, необходимо было убедиться, во всех ли разрезах отмечается содопроявление. Как видно из данных таблицы 2, в некоторых горизонтах отдельных почв сода не всегда встречается. Даже в солонцах она обнаружена лишь в 64–71 % случаев.

В тёмно-каштановых средне- и сильносолонцеватых почвах содопроявление отмечается более часто – в 77 % случаев, а в тёмно-каштановых слабосолонцеватых почвах – в 57 % случаев. Следует обратить внимание на некоторое возрастание встречаемости содопроявления в южных чернозёмах. Различие в частоте появления соды в разных почвах можно объяснить прежде всего неодинаковой степенью засоления и солонцеватости почв, химизмом солей ниже расположенного солевого горизонта, различной степенью атмосферного увлажнения по формам мезо-, микро- и нанорельефа и другими причинами.

Таблица 2. Частота встречаемости содопроявления в почвах степного Крыма

Номер п/п	Почва	Общее кол-во разрезов	Кол-во разрезов с содопроявлением	% от общего количества разрезов
1	Солонец луговой	14	9	64
2	Солонец лугово-степной	21	15	71
3	Солонец степной	19	13	68
4	Лугово-каштановая солонцеватая	19	17	89
5	Темно-каштановая средне- и сильно-солонцеватая	58	45	77
6	Темно-каштановая слабосолонцеватая	35	20	57
7	Чернозем южный	17	14	82

Как видно из данных таблицы 3, содопроявление в почвах отмечается на разной глубине. Ближе всего к поверхности такие горизонты расположены в солонцах (25–29 см), более глубоко – в темно-каштановых (74 см) и южных чернозёмах (103 см). Величина общей щелочности в горизонтах, где *Kc* превышает единицу, значительно колеблется. В солонцах она достигает 1,1–1,34 мг-экв, в темно-каштановых солонцеватых почвах снижается до 1,01–1,03 и в южных чернозёмах равна 1,03 мг-экв на 100 г почвы.

Чтобы оценить полученные величины щелочности, напомним, что токсичный порог по показателю общей щелочности равен 1,4 мг-экв на 100 г почвы, а щелочности, связанной с натрием и магнием, – 0,8 мг-экв на 100 г почвы.

По величине общей щелочности её значение в солонцах следует отнести к токсичной. Если же учесть, что во всех горизонтах содопроявления преобладают соли натрия и магния, то тогда величины щелочности следует сравнивать с порогом токсичности, равным 0,8 мг-экв на 100 г почвы. Таким образом, щелочность рассматриваемых почв выше порога токсичности.

Таблица 3. Глубина содопроявления по величине Кс и общая щелочность в почвах Крымского Присивашья и Таверической равнины до орошения

Номер п/п	Почва	Кол-во разрезов	Глубина содопроявления, см			Содержание общей щелочности, мг-экв на 100 г почвы		
			$\bar{X}$	Д	V	$\bar{x}$	Д	V
1	Солонец луговой	9	26	18-34	39	1,11	0,87-1,35	28
2	Солонец лугово-степной	15	29	24-34	35	1,34	1,16-1,52	25
3	Солонец степной	13	25	19-31	36	1,12	0,98-1,26	20
4	Лугово-каштановая солонцеватая	17	44	34-54	40	1,14	1,03-1,52	20
5	Тёмно-каштановая средне- и сильно-солонцеватая	45	52	43-61	55	1,03	0,96-1,10	22
6	Тёмно-каштановая слабосолонцеватая	20	74	53-95	59	1,01	0,91-1,11	20
7	Чернозем южный	14	103	82-124	35	1,03	0,92-1,14	18

Примечание:  $\bar{x}$  – средняя арифметическая величина;

Д – доверительный интервал средней при вероятности 0,95;

V – вариационный коэффициент.

Помимо горизонтов с максимальным содовым засолением, охарактеризованных выше, содопроявление обнаруживается и в других горизонтах. О вероятности появления соды на разных глубинах свидетельствуют данные таблицы 4.

Наибольшее число случаев появления соды отмечается в солонцах, где она обнаруживается чаще всего на глубине 20–30 см и 30–50 см. Вариация обусловлена глубиной иллювиального и переходного иллювиально-карбонатного горизонтов. В тёмно-каштановых почвах наблюдается снижение глубины содопроявления в сравнении с солонцами. Это отмечается чаще всего на глубине 50–100 см и реже в пределах 100–200 см. В чернозёмах южных содопроявление отмечается в 57 % случаев на глубине 50–100 см и в 43 % случаев на глубине 100–200 см.

Таблица 4. Встречаемость содового засоления на разных глубинах в почвах степного Крыма

Почва	Кол-во разрезов (n)	0-20 см		20-30 см		30-50 см		50-100 см		100-200 см	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Солонец луговой	9	2	22	3	33	4	45	-	-	-	-
Солонец лугово-степной	15	1	7	6	40	6	40	2	13	-	-
Солонец степной	13	2	16	7	54	4	50	-	-	-	-
Лугово-каштановая солонцеватая	17	1	6	3	18	6	35	7	41	-	-
Темно-каштановая средне- и сильно-солонцеватая	45	-	-	8	18	12	27	20	44	5	11
Темно-каштановая слабосолонцеватая	20	-	-	-	-	6	30	9	45	5	25
Чернозем южный	14	-	-	-	-	-	-	8	57	6	43

Возникает вопрос о том, какие же соли содержатся в горизонтах, где обнаружена сода? С этой целью нами был определен гипотетический состав солей в этих горизонтах по общепринятой методике (Базилевич, Панкова, 1969). Данные анализов приведены в таблице 5.

Как свидетельствуют данные таблицы 5, в почвенных горизонтах с признаками содового засоления присутствует одна и та же группа солей, в числе которых бикарбонаты натрия, магния и кальция, а также сульфаты и хлориды натрия. По величине средних значений содержание бикарбонатов натрия достигает в солонцах около 50 %, а на долю бикарбонатов магния и кальция приходится лишь 11–16 %. В лугово-каштановых почвах содержание бикарбоната натрия снижается до 31 %, в темно-каштановых средне- и сильносолонцеватых – до 23 %, а в слабосолонцеватых до 15 %. В южных чернозёмах оно несколько возрастает (до 25 %).

Таблица 5. Гипотетический состав солей в горизонтах почв с повышенной щелочностью ( $\text{HCO}_3^- > \text{Ca} + \text{Mg}$ )

Почва	Номер разреза	Глубина, см	Содержание солей, % от суммы				
			$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{NaHCO}_3$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{NaCl}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Солонец	124	45-55	14	4	64	12	6
	19	26-48	14	5	57	18	6
	22	30-60	12	7	64	13	4
	29	25-42	17	17	35	3	28
	71	42-55	23	23	43	10	1
Средняя для почвы			16	11	48	12	13
Лугово-каштановая солонцеватая	162	70-80	49	13	30	-	8
	163	50-60	25	20	30	-	24
	179	60-70	9	6	32	28	25
Средняя для почвы			28	13	31	9	19

1	2	3	4	5	6	7	8
Темно-каштановая средне- и сильносолонцеватая	80	55-100	12	12	60	-	16
	5	60-80	6	26	25	43	-
	6	50-65	46	26	15	11	2
	29	17-31	58	32	3	2	-
	71	35-48	40	28	8	10	14
	220	43-53	24	9	39	14	14
	23	17-31	58	32	8	-	2
Средняя для почвы			35	24	28	12	7
Темно-каштановая солонцеватая	1	65-75	23	20	14	23	20
	35	100-150	52	27	-	1	20
	144	55-65	34	7	29	18	12
	3	62-72	20	13	34	32	1
	119	37-47	46	19	11	19	5
	126	140-150	7	10	4	50	29
	20	79-100	17	42	2	-	39
Средняя для почвы			28	20	15	20	17
Чернозем южный	6	90-100	28	20	46	-	6
	7	65-75	55	22	14	-	9
	7/2	70-80	29	17	28	26	-
	430	150-160	44	14	14	28	-
Средняя для почвы			39	18	25	14	4

В.В. Егоров (1975), изучая гипотетический состав солей в разных почвах, установил, что, независимо от количества двууглекислой соды, приведенная выше группа солей является типичной для почв, испытавших значительное рассоление. Это подтверждается как нашими материалами, так и данными других исследователей (Гринь, 1969; Иванов, 1969). Таким образом, почвы, в

которых обнаруживается содопроявление, испытывают не только рассоление, но и рассолонцевание (т. е. ион кальция карбоната вытесняет поглощенный Na и образуется бикарбонат натрия  $\text{NaHCO}_3$ ).

Немаловажным является вопрос о степени интенсивности содопроявления в неорошаемых почвах степного Крыма. На наш взгляд, целесообразно определять интенсивность содопроявления по величине коэффициента  $K_c$  с учётом значений величин  $\text{HCO}_3$  и  $\text{NaHCO}_3$ .

Исходя из конкретных значений этих показателей (они приведены выше в таблицах и представлены в обобщённом виде в таблице 6), можно выделить такие группы почв по интенсивности содопроявления: а) содопроявление отсутствует,  $K_c$  меньше единицы; б) содопроявление слабое –  $K_c = 1,1-2$ ; в) содопроявление среднее –  $K_c = 2-4$ ; г) содопроявление сильное –  $K_c$  более 4.

Согласно таблице 6, к почвам со слабым содопроявлением относятся темно-каштановые разной степени солонцеватости и южные чернозёмы. Величина коэффициента  $K_c$  в этих почвах колеблется в пределах 1,4–2,0,  $\text{HCO}_3$  – 1,03–1,08 мг-экв на 100 г почвы, бикарбоната натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ) – 16–25%.

*Таблица 6. Интенсивность содопроявления по величине  $K_c$  с учётом содержания общей щёлочности в горизонтах содопроявления в неорошаемых почвах степного Крыма*

Почва	$K_c$	Интенсивность содопроявления по $K_c$	Статистические показатели $\text{HCO}_3$ , мг-экв на 100 г почвы		$\text{NaHCO}_3$ , % от суммы солей
			$\bar{x}$	Д	
Солонец луговой	3,2	средняя	1,11	0,87-1,35	50
Солонец лугово-степной	2,9	средняя	1,34	1,16-1,52	60
Солонец степной	2,6	средняя	1,12	0,98-1,26	50
Лугово-каштановая солонцеватая	2,6	средняя	1,14	1,03-1,26	30
Темно-каштановая средне- и сильно-солонцеватая	2,0	слабая	1,03	0,96-1,10	23
Темно-каштановая слабосолонцеватая	1,4	слабая	1,08	0,91-1,11	16
Чернозем южный	1,9	слабая	1,03	0,92-1,14	25

*Примечание:*  $K_c$  – коэффициент содопроявления.

$\bar{x}$  – средняя арифметическая

Д – доверительный интервал

К почвам со средней интенсивностью содопроявления относятся солонцы луговые, лугово-степные и степные, лугово-каштановые солонцеватые почвы. Величина  $K_c$  колеблется в них от 2,6 до 3,2,  $\text{HCO}_3^-$  – 1,11–1,34 мг-экв на 100 г почвы, а количество бикарбоната натрия возрастает до 50–60 % от суммы солей.

В степном Крыму имеются почвы, в которых вовсе отсутствует содовое засоление ( $K_c$  меньше единицы). Это солончаки приморские с хлоридным или сульфатно-хлоридным засолением, солончаковые почвы, осолоделые лугово-каштановые почвы, аллювиальные почвы речных долин (незасоленные и несолонцеватые), а также черноземы, образующиеся на выходах известняков (Тарханкутский полуостров).

Таковы особенности содопроявления в естественно развивающихся почвах юга Украины на примере степного Крыма.

## **Содопроявление и ощелачивание на орошаемых землях юга Украины**

### ***Содопроявление и ощелачивание в ирригационно-грунтовых и оросительных водах***

Как отмечено выше, подземные воды содержатся в геологических отложениях разного возраста. В соответствии с уклоном северного и южного бортов Причерноморской впадины, поток грунтовых вод направлен в континентальной части впадины с севера на юг, а на Крымском полуострове – с юга на север. По мере продвижения потока к осевой части впадины глубина их значительно уменьшается – от 20–15 м до 0,5–1 м. Разгрузка совершается в море, частично за счет испарения на низменных участках побережья. В естественных условиях состав грунтовых вод до орошения на преобладающей части Причерноморья был представлен нейтральными солями, а на террасе-дельте Днепра – содой и смешанным составом.

После строительства водохранилищ и каналов, а также введения широкого орошения, на юге Украины образовались ирригационно-грунтовые воды. Они поднялись, особенно вдоль каналов, где образовались подканальные купола. В первые годы орошения ежегодный подъем ирригационно-грунтовых вод составлял 0,5–1 м. В последующем их уровень на большинстве систем в известной мере стабилизировался. В целом же ирригационно-грунтовые воды на орошаемых землях залегают значи-

тельно ближе, чем до начала орошения (Кукоба, Балюк, 1982, Чирва, 1971 и др.).

При общей закономерности, заключающейся в более близком залегании ирригационно-грунтовых вод вдоль каналов и на понижениях рельефа (0–3 м), с постепенным углублением их до 5 м и ниже по мере удаления от источников орошения, наблюдаются и некоторые региональные особенности. Так, в связи с лучшей естественной дренированностью земель юго-западной части Причерноморья ирригационно-грунтовые воды залегают несколько глубже, чем в практически бессточной или слабо дренированной южной приосевой части Причерноморья. На последней территории этому способствует также более широкое развитие рисосеяния в Крымском Присивашье и Херсонском Причерноморье. В силу этих и других причин наибольшая площадь с близким залеганием грунтовых вод приходится на Краснознаменскую и Северо-Крымскую оросительные системы. Широкое строительство вертикального и горизонтального дренажа способствует некоторому улучшению мелиоративных условий.

Обработка данных анализов грунтовых вод специалистами гидромелиоративных экспедиций Госводхоза Украины и Национального научного центра «Институт почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского» позволила выявить следующие особенности содопроявления. В ирригационно-грунтовых водах оросительных систем, расположенных в Одесской области, установлено содовое засоление: в северной части Червоноярской, на преобладающей части Татарбунарской систем, на локальных участках Нижне-Днестровской, Шкодогорской систем. Однако в целом содопроявление в ирригационно-грунтовых водах этой более дренированной юго-западной части Причерноморья выражено не очень широко.

Иное наблюдается в южных и юго-восточных районах Причерноморья. Так, на террасе-дельте Днепра, к северу от Краснознаменского канала, на неорошаемой территории, охватывающей боровую и часть второй террасы, где грунтовые воды залегают на глубине 5–10 метров и глубже, содовое засоление встречается на довольно значительной площади. Уместно напомнить, что именно на боровой террасе еще до орошения отмечались случаи содового засоления в водах некоторых мелких озер. Генезис соды увязывался Г.Н. Самбуром (1963) с прохождением этой террасой пойменно-дельтового режима, с широким развитием сульфат-редукционных процессов.

В южной части террасы-дельты Днепра, где сосредоточена наибольшая часть Краснознаменной оросительной системы, а грунтовые воды залегают более близко к поверхности (1–3–5 м), в грунтовых водах как орошаемых, так и неорошаемых участков весьма часто встречается гидрокарбонатно-натриевое засоление, часто с участием карбонатной щелочности (нормальной соды). В целом в ирригационно-грунтовых водах террасы-дельты Днепра содопроявление в настоящее время выражено в наибольшей степени.

В зоне Каховской оросительной системы, расположенной на плиоценовой террасе, содовое засоление в ирригационно-грунтовых водах обнаружено главным образом в подах – как в орошаемых, так и в богарных условиях.

На массиве Северо-Крымской оросительной системы, размещенной на плиоценовой террасе, ирригационно-грунтовые воды северной ее части залегают довольно близко к поверхности, чему способствует как общая бессточность территории, так и подтопление, вызванное широким развитием рисосеяния. Построенный на большой площади (150 тыс. га) горизонтальный дренаж способствует улучшению мелиоративной обстановки, однако ирригационно-грунтовые воды залегают здесь всё-таки близко, в пределах 3–5 м.

До орошения грунтовые воды в Крымском Присивашье были засолены нейтральными солями, сода отсутствовала. С развитием ирригации сода появилась в ирригационно-грунтовых водах, причем она обнаруживается не повсеместно, а спорадически.

Таким образом, можно прийти к следующему заключению: хотя сода в ирригационно-грунтовых водах появилась не на каждом орошаемом массиве, а встречается спорадически, в целом она свойственна для всего Причерноморья, чего до широкого развития ирригации не было.

Вопрос о путях появления соды в грунтовых водах Причерноморья изучен очень слабо. Поэтому можно лишь высказать предположения по этому вопросу и выделить, по крайней мере, три наиболее вероятные пути появления соды в грунтовых водах.

Один из них связан с влиянием напорных подземных вод. Как уже отмечено выше, в приосевой части артезианского бассейна подземные воды заключены в отложениях разного возраста. Обычно водоносные слои изолированы друг от друга плотными водонепроницаемыми отложениями, что при незначительном их уклоне к центральной осевой части бассейна создает

напор. Местами водонепроницаемые отложения размыты и заполнены более крупнозернистыми осадками, поэтому образуются своеобразные «окна», по которым напорные воды сообщаются с грунтовыми (Макаренко, 1939).

Воды некоторых водоносных горизонтов (понта, меотиса и др.) при небольшой их минерализации часто бывают щелочными и содержат соду, которая и поступает в грунтовые воды. Поэтому один из путей появления соды в грунтовых водах обусловлен влиянием напорных подземных вод, что имеет место на второй террасе Днепра.

Второй путь связан с процессами сульфат-редукции. На террасе-дельте Днепра интенсивно развивались пойменно-дельтовые процессы, т. е. периодически преобладали анаэробные условия при луговом почвообразовании. Они проявляются и сейчас, прежде всего в подах, где развиваются богатые органикой лугово-черноземные почвы. Поэтому во многих подах грунтовые воды имеют щелочную реакцию и часто содержат соду.

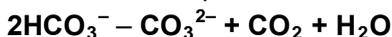
Третий путь появления соды в грунтовых водах связан с реакцией обменного поглощения между натрием поглощающего комплекса почв, ранее испытывавших засоление и осолонцевание (ново-евксинская и другие эпохи четвертичного периода), и кальцием бикарбоната кальция пород или оросительной воды. Таковы основные факторы появления соды в грунтовых водах плиоценовых террас и частично второй террасы-дельты, сложенной тяжелосуглинистыми и глинистыми лессовидными отложениями.

В целом этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении. Однако и на данном этапе исследований есть основания выделения двух типов территорий, где сода в грунтовых водах может быть причиной современного активного содопроявления в почвах (напорные воды, сульфат-редукция) и где она образуется лишь как стадия рассоления и рассолонцевания (по реакции Гедройца). К числу первых территорий относится терраса-дельта Днепра, к числу вторых – плиоценовые террасы, участки плато.

Важной причиной появления соды в почвах могут быть и оросительные воды. Основным источником орошения на юге, Украины являются воды Днепра. Многолетние исследования Украинского НИИ гидробиологии АН УССР показало (Денисова, 1979), что вода всех днепровских водохранилищ относится к гидрокарбонатно-кальциевой второго типа (по классификации О.А. Алекина). Минерализация воды небольшая – 0,3–0,4 г/л. Преобладающим катионом является кальций – 28–37 %, а анионом –  $\text{HCO}_3$  (32–

41%). Наблюдаются значительные колебания в содержании иона  $\text{HCO}_3$  в связи с изменением количества углекислоты, появляющейся при окислении органических веществ. Уменьшение содержания углекислоты происходит при фотосинтезе и повышении температуры, с выделением газообразного  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

При интенсивном фотосинтезе, когда наблюдается полное потребление газообразной двуокиси углерода и сдвиг карбонатного равновесия, углекислота может быть выделена из ионов  $\text{HCO}_3$ , с образованием иона  $\text{CO}_3$  по реакции:



Концентрация ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  (выведенная из уравнения второй степени диссоциации) находится в обратной зависимости от концентрации ионов водорода или в прямой – с рН. С увеличением в воде ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  уменьшается количество ионов  $\text{H}^+$  и увеличивается рН. Поэтому летом на поверхности, где величина  $\text{CO}_2$  равна нулю, количество  $\text{CO}_3^{2-}$  достигает 50 г/л, а рН – 9,7.

В нижних слоях водохранилища, наоборот, величина  $\text{CO}_2$  достигает 2,5 мг/л,  $\text{CO}_3^{2-}$  равна нулю, а рН – 7,8. Вследствие этого в Кременчугском, Киевском, Каховском водохранилищах величина рН воды летом иногда достигает 9,7–10. Такая поливная вода может вызвать ощелачивание верхних горизонтов почв и ухудшить их водно-физические свойства.

Наблюдения других исследователей за составом поливной воды также показали, что при пресном гидрокарбонатно-кальциевом составе вод Днепра в водах оросительных каналов часто обнаруживается ион  $\text{CO}_3$  (Баер, 1989; Кукоба, Балюк, 1982; Новикова, 1975).

В пределах Краснознаменной системы орошения минерализация поливной воды колеблется от 0,3 до 0,7 г/л, при этом натрий составляет 15–30 % от суммы катионов.

В Одесской области состав поливной воды более разнообразен, минерализация воды на разных оросительных системах колеблется от 0,3 до 1,7 г/л. Относительное содержание натрия от суммы катионов здесь выше, чем в воде Каховского водохранилища и часто составляет 40–50 %, а в озере Сасык – 60 %. Более значительна здесь и щелочность, рН не-редко достигает 8–8,5 (озера Сасык и Кагул).

Наблюдениями И.Н. Гоголева и Т.Б. Хохленко (1970) установлено, что в поливной воде периодически появляется  $\text{CO}_3^{2-}$ , и при этом возрастает величина рН. Такая же тенденция отмечается и в водной вытяжке из верхних горизонтов почв.

Так, в колхозе им. Мичурина Килийского района Одесской области в 6 часов утра температура воды была равна 22°C, рН – 7,6, ион  $\text{CO}_3^{2-}$  отсутствовал,  $\text{HCO}_3^- = 3,3$  мг-экв в литре. В 17 часов температура воды повысилась до 28°C, возросла величина рН до 8,7, появился ион  $\text{CO}_3^{2-} = 0,40$  мг-экв, величина  $\text{HCO}_3^-$  несколько снизилась – 3,05 мг-экв. в литре.

Следовательно подтверждается вывод гидробиологов о резком подщелачивании среды при сдвиге карбонатно-кальциевого равновесия в жаркий период дня.

### ***Содопроявление и ощелачивание в орошаемых почвах***

С развитием широкого орошения на юге Украины содопроявление стало обнаруживаться местами уже непосредственно в почвах. Однако сведения об этом на первом этапе были единичны, и не было представления об истинных масштабах этого явления.

В связи с этим Министерство мелиорации и водного хозяйства Украины поручило Украинскому НИИ почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского совместно с гидрогеологами гидрогеолого-мелиоративных экспедиций и партий изучить проблему содопроявления, и, прежде всего, определить масштабы этого явления.

Методика работ состояла в следующем. По данным анализов водных вытяжек из образцов почв, отобранных при солевых съемках на орошаемых массивах, выделяли горизонты, имеющие содовый химизм засоления на основе коэффициента содопроявления  $K_c$  (отношения содержания ионов  $\text{HCO}_3^-$  к сумме Са и Mg (Посохов, 1969). Вероятный состав солей определяли, применяя общепринятую последовательность связывания катионов и анионов с учётом растворимости солей.

Точки опробования наносили на карту, отмечая глубину появления содового засоления и его интенсивность. Сначала изготовили крупномасштабные карты по каждой оросительной системе отдельно (авторы Б.В. Лютаев, В.И. Лазукин, В.И. Галаган, Г.В. Покутнев), затем путем генерализации контуров – обзорную карту (А.В. Новикова, В.Н. Калиниченко). Пос представлена ниже в виде картосхем на рис. 1 и 2.

Для почв разных оросительных систем вычисляли значения глубины залегания почвенных горизонтов с содопроявлением, величины  $\text{HCO}_3^-$  и рН. Эти данные обрабатывались статистическими методами. В преобладающем большинстве мате-

риалы исследований весьма представительны, количество точек опробования составляет 400–1100.

Особенности содопроявления изучали в почвах крупных оросительных систем (ОС): в Одесской области – на Татарбунарской, Дунай-Днестровской и др.; в Херсонской – на Краснознаменной ОС; в Николаевской – на Ингулецкой ОС; в Днепропетровской – на Фрунзенской ОС; в системе канала Днепр-Кривой Рог и на Северо-Крымской ОС.

Главным источником орошения являются воды Днепра (Каховское водохранилище), в Одесской области – воды рек Дуная и Днестра.

Качество поливной воды в целом хорошее, но на некоторых системах вследствие сброса промышленных стоков (Ингулецкий канал) или при использовании в качестве водохранилищ акваторий морских лиманов (озеро Сасык и др. в Одесской области) минерализация воды в отдельные периоды повышается, при этом возрастает соотношение натрия кальция, а иногда и рН (до 8–8,2).

Как сказано выше, ирригационно-грунтовые воды на орошаемых участках залегают преимущественно на глубине 5–10, 3–5 м, а иногда еще ближе. Они засолены в основном нейтральными солями, но на ряде систем местами встречается содовое засоление (Татарбунарская, Краснознаменная, Северо-Крымская и др.). Однако оно распространено не сплошь, а спорадически. Отмечена большая динамичность количества соды во времени.

В результате по почвам каждой оросительной системы (для удобства они сведены по административным областям) получены среднеарифметические значения и доверительные интервалы для названных показателей.

Рассмотрим особенности содопроявления – химизм, интенсивность, глубину и частоту встречаемости в почвах.

**Химизм и интенсивность содопроявления в орошаемых почвах.** По химизму солей в горизонтах содопроявления были выделены почвы гидрокарбонатно-натриевого засоления ( $K_c > 1$ ) и такого же засоления с участием карбонатной щелочности (нормальной соды), когда в водной вытяжке, помимо соблюдения неравенства  $\text{НСО}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$ , содержался ион  $\text{СО}_3$  в количестве  $> 0,03$  мг-экв в 100 г почвы. В соответствии с классификацией Базилевич и Панковой химизм солей преимущественно содово-хлоридный или содово-сульфатный натриевый.

Что касается интенсивности щелочности, то, как известно, в почвоведении принято выражать щелочность по суммарному содержанию щелочей, по величине титровальной щелочности или по показателю рН раствора или водной вытяжки. При этом по значениям рН выделяют такие градации почв: нейтральные (рН 6,5–7), слабощелочные (рН 7,2–7,5), щелочные (рН 7,6–8,5) и сильнощелочные (рН > 8,5).

Учитывая, что величина рН в орошаемых почвах, где  $K_c > 1$ , колеблется в пределах от 7,6 до 9, мы выделили на карте следующие градации почв по степени щелочности (табл. 7, рис. 1.)

Таблица 7. Интенсивность содопроявления по величине общей щелочности в орошаемых почвах юга Украины

Химизм засоления и интенсивность щелочности	HCO <sub>3</sub> , мг-экв/100 г почвы	
	$\bar{x}$	Д
Гидрокарбонатно-натриевый:		
Весьма слабощелочные	0,5	0,3-0,7
Слабощелочные	0,7	0,4-1,0
Среднещелочные	1,1	0,9-1,3
Гидрокарбонатно-натриевый с участием нормальной соды:		
Весьма слабощелочные, слабо- и среднещелочные	0,95	0,4-1,5

Примечание:  $\bar{x}$  – средняя арифметическая величина;

Д – доверительный интервал средней при вероятности 0,95.

Важно подчеркнуть, что хотя величины общей щелочности могут быть небольшими, но они в значительной мере связаны с натрием. Как показали расчеты, в водной вытяжке горизонтов, где  $K_c > 1$ , кальций составляет в среднем 0,2–

0,3 мг-экв/100 г почвы, магний примерно столько же, а натрий – в 2–4 раза больше.

Рассмотрим особенности изменения величин щелочности в почвах отдельных систем на примере Одесской области (табл. 8).

Данные таблицы 8 показывают, что в почвах разных оросительных систем Одесской области имеются определенные колебания, как по глубине, так и по величине щелочности. Так, глубина содопроявления колеблется в пределах от 0,2 до 0,4 м, на рисовых участках 0,1–0,4 м. Величина щелочности в целом небольшая, с колебаниями от 0,4 до 0,7 мг-экв на 100 г почвы, рН везде близок к 8.

Таблица 8. Средние показатели глубины появления содового засоления, величины  $\text{HCO}_3^-$  и pH в орошаемых почвах Одесской области

Оросительная система	Кол-во точек	Средние значения		
		Глубина, м	$\text{HCO}_3^-$ , мг-экв на 100 г почвы	pH
Татарбунарская*	163	0,27	0,54	8,0
Суворовская*	56	0,30	0,54	7,8
Дунай-Днестровская*	74	0,35	0,42	7,9
Васильевская*	33	0,36	0,74	8,2
Червоноярская*	19	0,21	0,51	7,7
Шкодогорская*	21	0,37	0,57	8,0
Нижне-Днестровская*	21	0,40	0,56	8,2
Придунайские рисовые ОС				
Килийская, к-з "Дружба"***	19	0,35	0,58	8,3
Килийская, к-з "Путь Ленина"***	30	0,20	0,76	8,0
Кислицкая**	15	0,10	0,27	7,5
Килийско-Маякская**	20	0,14	0,45	7,6
Мичуринская**	25	0,49	0,63	8,6
Лисховская**	44	0,15	0,54	7,8
В среднем	540	0,28	0,54	8,0

Примечание. Почвенный покров представлен преимущественно:

- черноземами южными;
- \*\* – лугово-черноземными почвами.

На рисовых участках намечается тенденция к повышению щелочности, хотя и не всегда. В целом все-таки различия по системам не очень резкие, поэтому не будет большой ошибкой характеризовать содопроявление почв Одесской области по средним значениям.

Рассмотрим данные по содопроявлению почв в условиях разных оросительных систем (табл. 9). Анализ данных позволяет прийти к заключению, что общая щелочность постепенно возрастает по мере продвижения от юго-запада Причерноморья (Одесская, Николаевская области) к приосевой части (Херсонская и Крымская области). Так, в Одесской и Николаевской областях преобладают южные черноземы, преимущественно на плато. Общая щелочность в тех горизонтах, где  $\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$ , наиболее низкая – 0,5–0,6 мг-экв на 100 г почвы (весьма слабо щелочные почвы). Величина рН в них находится в щелочном интервале.

К востоку и югу, в Запорожской и Херсонской областях, где распространены южные черноземы (в северных районах) и темно-каштановые почвы (районы террасы-дельты и плиоценовой террасы), общая щелочность возрастает до 0,7 мг-экв/100 г почвы (слабощелочные почвы), величина рН колеблется от 7,6 до 8,6.

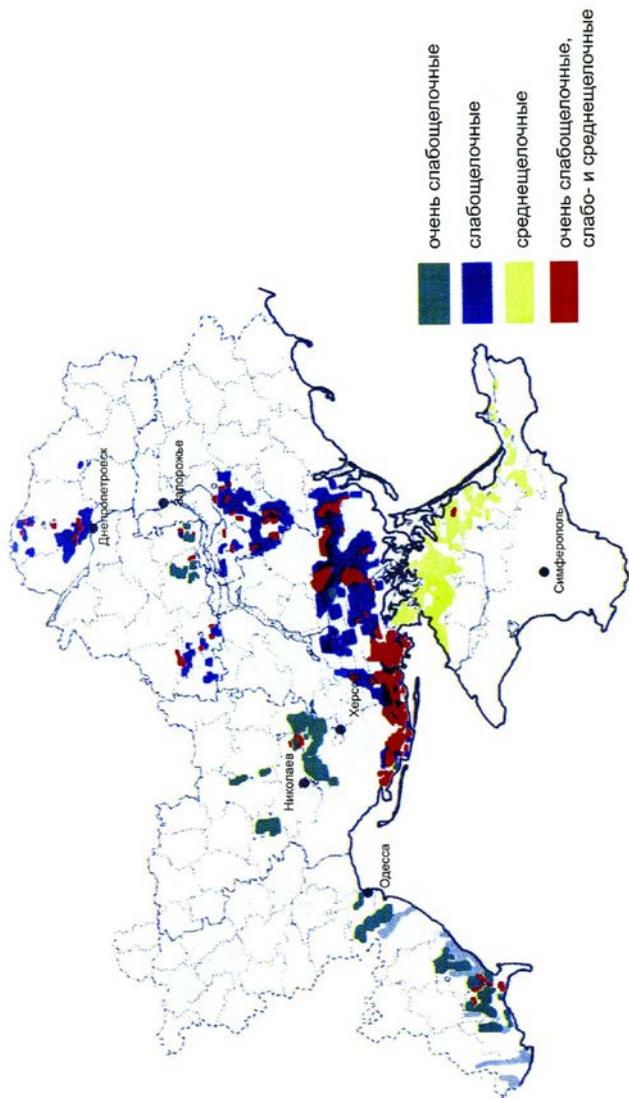
Максимальная величина щелочности 1,1 мг-экв/100 г почвы обнаружена в почвах Крымского Присивашья на плиоценовой террасе, где развиваются темно-каштановые слабо, средне и сильносолонцеватые почвы и солонцы, вторично каштаново-луговые солонцеватые почвы. Возрастание щелочности является вполне закономерным и обусловлено наиболее высокой степенью солонцеватости, тяжелосуглинистым и глинистым гранулометрическим составом.

Следовательно, наименьшее ощелачивание наблюдается в почвах более дренированных территорий – плато, где отсутствуют резко выраженные признаки солонцеватости. Невысокое ощелачивание характерно для почв легкого гранулометрического состава (терраса-дельта Днепра). Максимально оно выражено на недренированной плиоценовой террасе, в почвах тяжелого гранулометрического состава и обладающих высокой степенью солонцеватости по сравнению с другими почвами юга Украины.

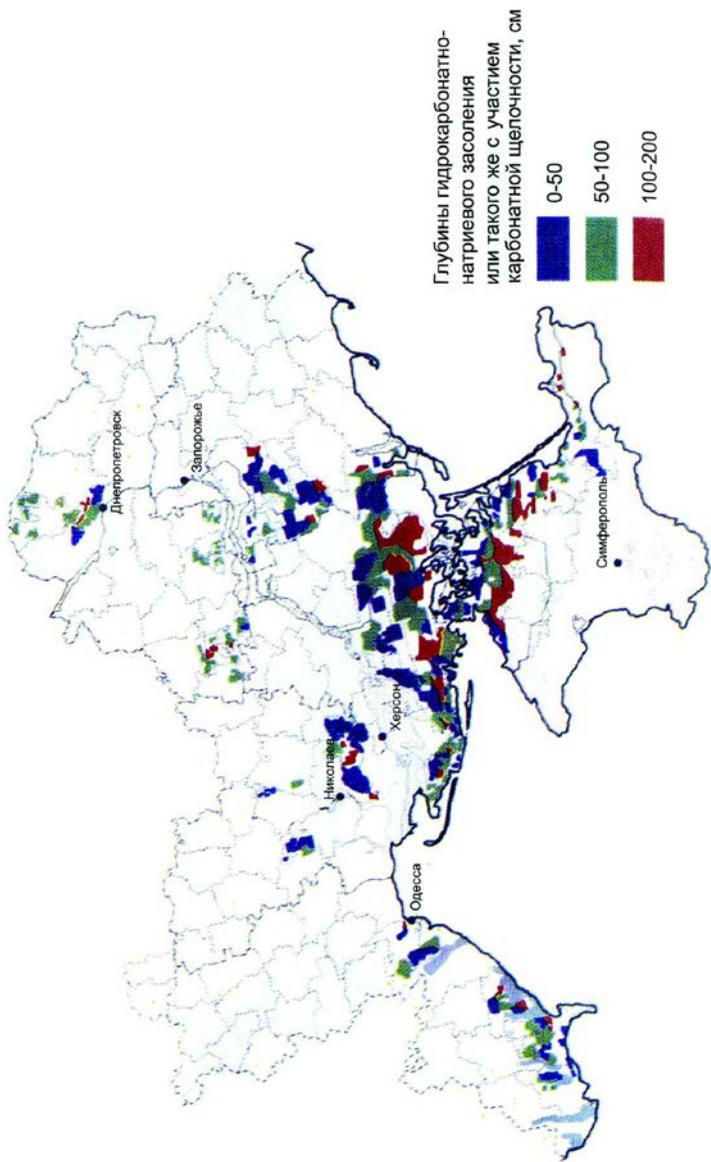
Таблица 9. Статистический анализ глубины появления содового засоления, величин  $\text{HCO}_3$  и pH на данной глубине (по выборочным данным)

Почвы	Оросительные системы, административные области	Кол-во точек	Глубина, см		$\text{HCO}_3$ , мг-экв на 100 г почвы		pH			
			$\bar{x}$	V	$\bar{x}$	V	$\bar{x}$	V		
Чернозёмы южные, лугово-чернозёмные	Татарбунарская и др., Одесская обл.	540	0,3	0,1-0,7	0,5	0,4-0,7	25	8,0	7,8-8,4	4
Чернозёмы южные, реже тёмно-каштановые	Ингулецкая, Николаевская обл.	437	0,7	0,3-1,2	0,6	0,4-0,8	28	-	-	-
Чернозёмы обыкновенные, чернозёмы южные, лугово-чернозёмные почвы	Днепр-Кривой Рог, Фрунзенская ОС, Днепропетровская область	597	0,6	0,2-1,0	0,8	0,6-1,0	22	8,0	7,6-8,4	7
Чернозёмы обыкновенные, чернозёмы южные	Васильевская, Михайловская и др., Запорожская обл.	138	1,1	0,6-1,7	0,7	0,6-0,8	14	7,8	7,6-8,0	3
Тёмно-каштановые солонцеватые, лугово-каштановые	Краснознаменская, Херсонская обл.	443	0,8	0,2-1,3	0,7	0,4-1,0	43	7,8	7,5-8,6	7
Тёмно-каштановые солонцеватые	Северо-Крымская, Крымская обл.	1123	0,7	0,3-1,1	1,1	0,7-1,5	36	8,7	8,1-9,3	6

Примечание:  $\bar{x}$  - средняя арифметическая; D - доверительный интервал при вероятности 0,95;  
V - вариационный коэффициент



**Рис. 1 – Картограмма содопроявления в почвах юга Украины при орошении**



**Рис. 2** – Картограмма глубин засоления соды в почвах юга Украины при орошении

Если оценивать величины общей щелочности с точки зрения токсичности для растений и принять за порог величину 1,4 мг-экв/100 г почвы (по Н.И. Базилевич и Е.И. Панковой), то можно прийти к заключению, что только в почвах Крымского Присивашья этот показатель приближается к токсичному пределу. Если же в качестве порога токсичности взять величину 0,8 мг-экв/100 г почвы, которая, согласно В.А. Ковде (1965), вызывает снижение плодородия почв до уровня 60–70 % относительно нещелочных почв, то следует признать, что в большинстве почв юга Украины щелочность имеет именно такое значение (с учетом доверительных интервалов и максимальных значений). Следовательно, почвы нуждаются в погашении излишней щелочности, в восполнении дефицита кальция.

**Глубина содового засоления.** Из табл. 9 и рис. 2 следует, что сода при орошении обнаруживается в почвах на разной глубине. Наиболее близко к поверхности она встречается на юго-западе Причерноморья: в Одесской области (южные черноземы) – средняя глубина 0,3 м, в Днепропетровской области (южные черноземы) – 0,6 м. В остальных областях (Херсонская, Николаевская, Крымская) сода в почвах отмечается более глубоко – в среднем на уровне 0,7–0,8 м и наиболее глубоко в Запорожской области.

На картосхеме содопроявления (рис. 2) показаны три интервала глубин: 0–0,5; 0,5–1,0 и 1,0–2,0 м. Что касается причин неодинаковой глубины появления соды, то они обусловлены, главным образом, источниками содового засоления. Когда это связано с поливом оросительной водой, содержащей соду или капиллярным подтягиванием растворов от грунтовых вод, то содовое засоление проявляется ближе к поверхности. Когда же причиной является рассолонцевание на карбонатном фоне, то содопроявление приурочено к средней и нижней частям почвенного профиля.

В целом же с учетом средних величин можно считать, что содопроявление в большинстве случаев отмечается во втором и третьем полуметровом слоях от поверхности (в Одесской области – в первом полуметровом слое).

**Частота встречаемости в пространстве содового засоления.** Анализ данных водных вытяжек показывает, что сода обнаруживается далеко не во всех апробированных точках. Это характерно и для неорошаемых почв степного Крыма, что указывает в основном на спорадический характер содопроявления на юге Украины. Некоторое исключение могут составлять вторично засоленные почвы террасы-дельты Днепра, где сода

возникает из грунтовых вод при их подъеме. На них сода отмечается в преобладающем большинстве разрезов.

Выделены следующие градации по частоте встречаемости содового засоления: а) весьма частая встречаемость соды (> 50%), б) частая встречаемость (25–50%), в) ограниченная встречаемость (10–25%), г) единичная встречаемость (< 10%).

Непостоянство появления соды в пространстве хорошо увязывается большой динамичностью ее во времени и зависит от колебания температуры, содержания углекислоты в почвенном воздухе, а в целом от динамики карбонатно-кальциевого равновесия и многих других причин. Этот факт отмечают абсолютно все исследователи, занимающиеся содопроявлением в почвах сухостепной зоны.

### **Возможные пути появления содового засоления и ощелачивания в орошаемых почвах юга Украины**

Причины возникновения естественного и ирригационного содового засоления и ощелачивания различны и зависят от природных и антропогенных условий. В литературе представлен ряд теорий, объясняющих образование и накопление соды:

- образование соды при выветривании кристаллических и осадочных пород;
- образование соды путем реакции обменного разложения нейтральных солей натрия и карбонатов щелочных земель;
- биохимическое образование соды;
- образование соды при минерализации органических остатков;
- геологические источники соды;
- коллоидно-химический путь образования соды по К.К. Гедройцу.

Перечисленные концепции весьма неравнозначны по универсальности, по теоретической обоснованности и практическому значению. До настоящего времени имеются существенные разногласия в их оценке.

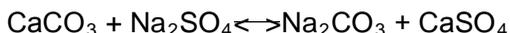
Рассмотрим все точки зрения применительно к условиям юга Украины:

**Образование соды при выветривании кристаллических и осадочных пород.** Странниками этой теории являются многие исследователи (Герасимов, Иванова, 1932 и др.). На земном шаре 80–85 % горных пород представлены алюмосиликатами, часть которых содержит натрий (полевые шпаты, нефелины и др.). Выветривание последних ведет к накоплению

натрия и образованию соды. Особенно широко такой процесс распространен в горных местностях, где изливаются лавы, образуются туфы и базальты.

Применительно к Украине такое образование соды возможно в северном Приднестровье, где среди пород имеются меловые и третичные отложения, богатые глауконитом. В результате их выветривания может образоваться сода (Самбур, 1963). Однако комплексных исследований по влиянию выветривания пород на образование соды в условиях юга Украины не проводилось.

**Образование соды путем реакции обменного разложения нейтральных солей натрия и карбонатов щелочных земель.** Эта теория образования соды при действии на карбонатную почву восходящего раствора минерализованной грунтовой воды с сернокислым натрием известна в литературе как образование соды по Гильгарду. Реакция, которая при этом протекает, описывается следующим образом:



Реакция может идти в правую сторону лишь при условии перехода труднорастворимого  $\text{CaCO}_3$  в растворимую соль  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  при давлении углекислоты около 1 атмосферы, т.е. большого содержания углекислоты, что в природе встречается редко. Кроме того, такой процесс должен идти при вторичном засолении (при подъеме соленых грунтовых вод, не содержащих соду). В условиях юга Украины не отмечено образование соды при вторичном засолении, кроме случаев, когда поднимаются грунтовые воды, в составе которых имеется сода. Поэтому следует прийти к заключению, что образование соды по реакции Гильгарда в целом на юге Украины исключено, а если и совершается в особых условиях, то на небольших участках.

**Биохимическое образование соды.** По этой теории в анаэробной среде при отсутствии кислорода воздуха и наличии органического вещества и восстанавливающих микроорганизмов развиваются процессы десульфирования или сульфат-редукции:



При этом образуется сода, сероводород и сернистые соединения тяжелых ( $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ ) и легких металлов ( $\text{CaS}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ ). Такие условия создаются в болотных почвах, на дне мелководных озер, морей, а также в закрытых месторождениях нефти, битумов.

И.Н. Антипов-Каратаев (1953) считал такой путь образования соды самым распространенным. Действительно, гидрогеологами давно замечено, что в нефтяных водах накапливаются карбонаты щелочей и исчезают сульфаты. Однако В.А. Ковда (1965) отмечает, что строгое соблюдение анаэробных условий в поверхностных слоях суши затруднительно, поскольку в почвах попеременно чередуются восстановительные и окислительные режимы, в результате происходит подкисление среды и разрушение накопленных карбонатов натрия. Подобное изменение окислительно-восстановительных процессов было отмечено на юге Украины в почвах рисовых участков (Кириенко, 1985; Решетняк, 1974).

По данным Т.Н. Кириенко, на подовых участках Херсонской области, покрытых целинной растительностью, в каштаново-луговых почвах, развивающихся при близком залегании грунтовых вод, обнаруживается заметное количество сульфатредуцирующих микроорганизмов – до 1–2 *тыс.* в 100 г почвы.

При организации на них орошения и возделывании риса затоплением количество сульфатредуцирующих микроорганизмов резко возрастает – до 11 *тыс.* в 100 г почвы. Вместе с тем увеличивается содержание восстановленных соединений и соды. Летом, после сброса воды из чеков, происходит уменьшение численности сульфат-редукторов, но оно бывает значительно большее, чем весной. Окисление почвы происходит медленно в связи с затрудненным поступлением кислорода в сильно уплотненную и обесструктуренную почву. Поэтому заметного подкисления среды не отмечается.

По этой причине на почвах, занятых рисовыми участками, обнаруживается более высокое повышение щелочности, чем на участках обычного орошения. Следовательно, образование соды в почвах рисовых участков за счет сульфат-редукции не вызывает никакого сомнения. По-видимому, это один из основных путей появления соды в почвах при рисосеянии.

**Образование соды за счет минерализации органического вещества некоторых растений.** Ряд растений (некоторые галофиты, подсолнечник) в процессе жизнедеятельности накапливают натрий и калий. При минерализации остатков таких растений, действии влаги и углекислоты воздуха образуется сода, поташ. Однако такой путь образования соды не имеет широкого распространения.

**Геологические источники соды.** Важным геологическим источником соды в почвах являются напорные воды. Как было отмечено выше, в приморской части Причерноморья гидро-

геологами установлено локальное подпитывание грунтовых вод напорными плиоценовыми водами (понт-меотическими) водами (Макаренко, 1939). Связь между грунтовыми и плиоценовыми водами на приморской части Краснознаменной оросительной системы была подтверждена последующими наблюдениями.

Так, по данным Ю.А. Чирвы, (1971), на территории опытно-дренажного участка в совхозе «Память Ильича» Скадовского района Херсонской области выявлены следующие особенности грунтовых и подземных плиоценовых вод: на глубине от 4 до 10 м грунтовые воды заключены в четвертичных отложениях, а на глубине 25 м – в плиоценовых песках (табл. 10).

*Таблица 10. Минерализация и состав грунтовых и подземных вод на опытно-дренажном участке (Ю.А. Чирва, 1971)*

Глубина, м	Дата отбора	Плотный остаток, г/л	Содержание ионов, г/л						
			CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> и K <sup>+</sup>
4	22.X.1969	4,48	нет	0,01	2,81	нет	0,22	0,15	1,29
5	22.X.1969	5,24	нет	0,01	2,99	0,28	0,18	0,12	1,66
6	22.X.1969	2,10	0,07	0,33	0,97	0,03	0,02	0,13	0,55
7	22.X.1969	1,95	0,06	0,55	0,73	0,02	0,04	0,15	0,40
8	22.X.1969	0,97	0,05	0,24	0,37	0,01	0,01	0,09	0,20
9	15.VI.1969	0,86	нет	0,23	0,33	0,01	0,06	0,03	0,20
9	22.X.1969	0,96	0,01	0,22	0,42	0,001	0,03	0,06	0,22
10	22.X.1969	0,61	0,02	0,22	0,19	0,001	0,03	0,06	0,09
25	23.V.1969	0,56	0,01	0,17	0,08	0,14	0,02	0,04	0,10
25	15.VI.1969	0,40	нет	0,18	0,09	0,02	0,02	0,06	0,06
25	22.X.1969	0,35	нет	0,18	0,13	0,001	0,03	0,05	0,01

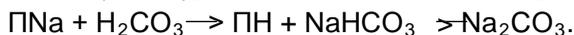
Согласно данным таблицы 10, подземные плиоценовые воды содержат солей всего 0,3–0,4 г/л и имеют гидрокарбонатно-натриевый состав, весною – с участием нормальной соды. Грунтовые воды в нижней части водоносного слоя являются пресными – 0,6 г/л, а выше по профилю их минерализация увеличивается, достигая на глубине 4м – 4–5 г/л. При этом меняется и их состав – от хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого до

хлоридно-натриевого. Судя по минерализации и составу, можно считать, что плиоценовые воды подпитывают грунтовые воды.

Исследования В.Я. Ладных (1971), А.В. Новиковой (1975), проведенные в этом же хозяйстве, показали, что с подъемом грунтовых вод после начала орошения в некоторых почвах, на критической глубине, началось вторичное засоление. При этом в самом верхнем слое почв накопились преимущественно хлориды натрия и магния, а с глубины 20 см и до уровня грунтовых вод появилось гидрокарбонатно-натриевое засоление с участием соды.

Такой характер засоления отмечался также и в других хозяйствах, в частности в совхозе «Знамя коммунизма» Цюрупинского района Херсонской области и др. Все это позволяет прийти к заключению о том, что в приморской части террасы-дельты Днепра (Краснознаменская оросительная система) содопроявление вызвано влиянием напорных подземных плиоценовых вод, содержащих гидрокарбонат натрия.

**Коллоидно-химическая обменная теория образования соды по К.К. Гедройцу.** Образование соды доказано на основе тщательных опытов К.К. Гедройца (1955) и подтверждено многочисленными экспериментами других исследователей, которые пришли к выводу, что процесс рассоления солончака сопровождается вытеснением поглощенного натрия кальцием раствора или ионом водорода с образованием бикарбоната натрия по следующим реакциям:



В первом случае почва в процессе эволюции постепенно превращается в зональную, во втором – в осолоделую. Подтверждением этой теории являются наблюдения, проведенные нами (Новикова и др., 1973) в совхозе «Таврический» Красноперекопского района Крымской области, где впервые после пятилетнего орошения в почвах было обнаружено содовое засоление.

До орошения почвенный покров данного стационара был представлен темно-каштановыми солонцеватыми, лугово-каштановыми солонцеватыми почвами в комплексе с солонцами (10–20 %). Грунтовые воды залегают на глубине 4–10 м.

Профиль темно-каштановых почв до глубины 130–150 см был значительно опреснен. В водной вытяжке верхних горизонтов почв преобладали гидрокарбонаты кальция. Солевой максимум состоял из сульфатов кальция и магния.

В лугово-каштановых солонцеватых почвах опресненной являлась меньшая часть почвенного профиля (до 90–100 см), ниже

находился аккумулятивный горизонт. Состав водорастворимых солей в пахотном и подпахотном горизонтах был гидрокарбонатно-кальциевый, ниже – гидрокарбонатно-натриевый и в солевом горизонте – сульфатно-кальциевый и натриевый.

После пятилетнего орошения грунтовые воды резко поднялись и установились на глубине 0,5–2,4 м. При этом вдоль межхозяйственного распределителя в полосе шириной 10–30 м произошло сильное заболачивание почв. Несколько дальше от канала, на полосе шириной 100–300 м, появилось вторичное засоление с выцветами солей на поверхности.

Во вторичном солончаке с залеганием грунтовых вод 70 см в составе водорастворимых солей преобладали сернокислый натрий, магний и кальций, сода отсутствовала.

Несколько дальше от канала, в пониженной части участка с глубиной грунтовых вод более 1 м, наблюдалось очень ослабленное вторичное засоление. Присутствие в составе водорастворимых солей соды в почве также не отмечалось.

На несколько более дренированной части участка, с большей глубиной грунтовых вод (1,7–2,4 м), наблюдалось присутствие двууглекислой соды по всему почвенному профилю с максимумом (84% от суммы солей) на глубине 50–100 см.

Однако динамические наблюдения за солевым режимом почв показывают, что содовое засоление сохраняется в почве лишь при небольшом содержании солей, не выше 0,2–0,3%. С возрастанием их до 0,4–0,6 % сода исчезает. Об этом убедительно свидетельствуют данные наблюдений П.И. Кукобы и С.А. Балюка (1982) на опытно-дренажном стационаре в совхозе «Днепроровский» (табл. 11).

Согласно данным таблицы 11, в первом горизонте содопроявления (60–80 см) в течение первых лет орошения наблюдается увеличение щелочности от 0,5 до 0,7 мг-экв на 100 г почвы. В сезонном отношении количество общей щелочности возрастало к осени, а иногда весной. Нормальная сода постоянно присутствовала весной, однако осенью нередко исчезала. Величина pH колебалась в пределах 8,3–8,6.

В последующие три года (1972–1974) при содержании солей 0,1–0,2 % величина  $\text{HCO}_3$  стала увеличиваться до 0,9–1,4 мг-экв на 100 г почвы, достигая токсичного предела. Возросло содержание нормальной соды, pH в пределах 7,9–8,0.

Впоследствии, при дальнейшем подъеме грунтовых вод и среднем засолении почв (0,6%), нормальная сода исчезла, а со-

держание общей щелочности снизилось до 0,6 мг-экв на 100 г почвы.

Таблица 11. Динамика щелочности в темно-каштановой слабосолонцеватой почве при орошении в совхозе «Днепровский» (П.И. Кукоба, С.А. Балюк, 1982)

Годы наблюдения	Весна				Осень			
	Сумма солей, %	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	рН	Сумма солей, %	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	рН
		мг-экв на 100 г почвы				мг-экв на 100 г почвы		
Глубина 60-80 см								
1969	0,05	0,02	0,54	*	0,06	-	0,59	*
1970	0,07	-	0,64	8,3	0,04	-	0,57	8,6
1971	0,09	0,03	0,66	*	0,09	0,03	0,75	*
1972	0,29	0,05	1,14	8,6	0,15	-	1,03	8,0
1973	0,12	0,17	0,87	7,9	0,11	-	1,16	8,6
1974	0,14	-	1,4	8,2	*	*	*	*
1976	0,65	-	0,60	8,3	0,66	-	0,69	7,2
Глубина 140-150 см								
1969	0,08	0,03	0,74	*	0,08	0,07	0,88	*
1970	0,11	0,17	1,11	8,8	0,11	-	1,08	9,0
1971	0,16	0,23	1,16	*	0,16	0,33	1,24	*
1972	0,20	-	0,88	8,3	0,20	0,15	1,08	9,0
1973	0,24	0,03	0,64	7,8	0,25	0,11	1,1	8,7
1974	0,42	-	1,4	8,2	*	*	*	*
1976	0,53	-	0,60	8,4	0,81	-	0,56	7,7

*Примечание:* \* – не определяли

В более глубокой части почвенного профиля, на глубине максимального содопроявления (140–150 см), также отмечается прохождение трех этапов по степени засоления, только они наступали несколько раньше, поскольку грунтовые воды вначале достигали только нижних горизонтов почво-грунта.

Так, на глубине максимального содопроявления (140–150 см) на первом этапе орошения отмечалось увеличение общей щелочности от 0,7 до 1,2 мг-экв на 100 г почвы, с тенденцией сезонного возрастания к осени. Нормальная сода присутствовала постоянно, количество ее превышало токсический порог во много раз. Величина pH колебалась в пределах 8,8–9,0. На втором этапе при общем содержании солей до 0,25 % наметилась тенденция некоторого уменьшения величины общей щелочности до 0,6–0,9 мг-экв/100 г почвы весной и 1,1 мг-экв/100 г почвы осенью. Нормальная сода присутствовала не всегда, количество ее несколько уменьшалось, величина pH колебалась в пределах 7,8–9,0.

Наконец, на третьем этапе величина общей щелочности резко уменьшилась до 0,5–0,6 мг-экв/100 г почвы (исключая весну 1974 г.), нормальная сода исчезла, величина pH снизилась до 7,7–8,4.

Следовательно, максимум содопроявления отмечается в периоды четко проявленного опреснения почвы, с содержанием водорастворимых солей в пределах 0,1–0,2 % (реже 0,3 %). Как только начинается накопление солей, количество двууглекислой и нормальной соды снижается, а при среднем и сильном засолении она исчезает.

Определение обменного натрия в различных почвах, где отмечено содовое засоление, показало, что его количество колеблется в широких пределах, с тенденцией возрастания в солонцовых иллювиальных и иллювиально-карбонатных горизонтах. Однако содопроявление отмечается и в нижней части профиля, на глубине 60–70 см и даже ниже (100–200 см), т. е. в породе. Количество поглощенного натрия в этом случае невысокое (табл. 12).

На основании выше приведенных данных можно сделать вывод, что появление соды при орошении на значительной территории Причерноморья вызвано процессом десорбции натрия при рассолении почв и ее рассолонцевании.

Возникает вопрос о том, имеется ли статистически достоверная связь между величиной щелочности и количеством погло-

щенного натрия. Для его разрешения нами (А.В. Новикова, И.Г. Златина) был проведен модельный опыт.

*Таблица 12. Содержание обменного натрия в нижних горизонтах некоторых почво-грунтов юга Украины*

Местонахождение	Номер разреза	Глубина, см	Поглощенный натрий	
			мг-экв на 100 г почвы	% емкости обмена
Херсонская обл., с-з "Каланчакский"	116	60-70	0,3	1,6
Херсонская обл., к-з "Грузия"	163	60-70	0,7	3,0
Херсонская обл., к-з им. Ладычука	4	60-70	0,4	2,0
Крымская обл., к-з им. Тимирязева	6	100-120	0,6	2,0
Крымская обл., с-з "Молодая Гвардия"	151	55-65	0,8	3,2

Образцы почвы брали из верхнего горизонта темно-каштановой тяжелосуглинистой почвы, а также из верхнего горизонта каштаново-луговой легкосуглинистой почвы и лессовидной глины. Насыщали их поглощенным натрием до уровня слабой и средней степени солонцеватости. Одну половину образцов помещали на воронки, в другую часть образцов добавили  $\text{CaCO}_3$ , в количестве 10% на 100 г, а затем их также помещали на воронки. Для имитации полива с промывным режимом и получения инфильтратов, на воронки подавалась дистиллированная вода и вода, предварительно насыщенная углекислотой воздуха. В каждый условный полив (промывку) подавали по 300 мл воды, вес навески почв – 300 г. Было проведено шесть таких поливов. Полученные фильтраты анализировали с определением щелочности, вызываемой двууглекислыми щелочно-земельными и отдельно – щелочными катионами (по методике Гедройца). Усредненные за 6 поливов данные приведены в таблице 13.

Как показывают данные табл. 13, величина щелочности, вызванной двууглекислыми щелочноземельными катионами, не

зависит от содержания поглощенного натрия и связана с  $\text{CaCO}_3$ . Однако связь величины щелочности с количеством поглощенного натрия наблюдается. Более отчетливо это проявляется в образцах с повышенным содержанием в почве  $\text{CaCO}_3$ , стимулирующим процесс вытеснения из поглощающего комплекса натрия, что и находит отражение в появлении большего количества двууглекислой соды.

Таблица 13. Содержание  $\text{CaCO}_3$ , поглощенного натрия в исходных почвах и щелочности ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ) в фильтратах после их промывки

Объекты опыта	В исходной почве		В фильтрате*)	
	$\text{CaCO}_3$ , %	Обменный натрий, мг-экв на 100 г почвы	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , мг-экв/л	$\text{NaHCO}_3$ , мг-экв/л
Темно-каштановая тяжелосуглинистая почва	0,7	1,7	0,18	0,33
- // -	0,7	3,5	0,11	0,42
- // -	10,0	1,7	0,99	0,62
- // -	10,0	3,5	0,96	0,89
Каштаново-луговая легкосуглинистая почва	0,86	0,2	0,39	0,47
- // -	0,86	1,4	0,33	0,64
- // -	10,0	0,2	1,37	0,44
- // -	10,0	1,4	1,09	0,71
Лессовидная глина	22,8	0,4	1,08	0,46
- // -	31,7	0,7	1,22	0,57
- // -	33,4	2,2	0,80	0,77

Примечание: \*) Кроме  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , присутствует  $\text{MgHCO}_3$ , кроме  $\text{NaHCO}_3$ , –  $\text{KHCO}_3$ .

Что же касается математически достоверной связи между поглощенным натрием исходной почвы и величиной, образующейся при промывках щелочности в фильтрах, то достоверные коэффициенты корреляции были получены в опыте не на всех почвах, а лишь по каштаново-луговой почве и лессовидной глине.

Корреляция оказалась прямолинейной и средней:  $r = 0,6$ . В этом случае величину ожидаемой токсичной щелочности можно было определить по содержанию поглощенного натрия в исходной почве, пользуясь следующими уравнениями:

- для каштаново-луговой легкоглинистой почвы:  $y = 0,39 + 0,23x$ ;
- для лессовидной глины:  $y = 0,42 + 14x$ ,

где  $y$  – величина токсической щелочности, в мг-экв на 1 л фильтра;

$x$  – содержание поглощенного натрия, в мг-экв на 100 г почвы.

Полученные математические модели могут быть использованы для прогнозирования появления двууглекислой соды в орошаемых почвах в результате замещения поглощенного натрия на кальций раствора (по реакции Гедройца).

Необходимо отметить, что ощелачивание рассоляющихся почв усиливается еще и гидролизом карбоната магния, поскольку в состав карбонатов большинства почв входит не только  $\text{CaCO}_3$  (65–95 %), но и  $\text{MgCO}_3$  (1–35 %) (табл. 14). Карбонат магния лучше растворим в воде и при гидролизе сильно подщелачивает раствор. Так, в водной вытяжке из  $\text{CaCO}_3$ , по данным К.К. Гедройца, рН составляет 7,2, а из  $\text{MgCO}_3$  – 9,0. Поэтому повышение щелочности можно объяснить и влиянием гидролиза карбонатов магния.

Таким образом, можно сделать вывод, что на юге Украины сода в почвах образуется такими путями:

а) на значительной (преобладающей) части территории (плиоценовые террасы, частично терраса-дельта Днестра и участки плато) за счет вытеснения обменного натрия кальцием карбонатов (этот путь следует рассматривать как естественную стадию рассоления и рассолонцевания);

б) за счет непосредственного поступления соды из напорных вод в грунтовые воды и далее в почвы (терраса-дельта Днестра);

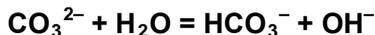
в) в результате процессов сульфат-редукции: на рисовых участках, в подообразных понижениях; в связи с применением для орошения вод неблагоприятного химического состава (Ингулецкая, Дунай-Днестровская и другие оросительные системы).

Таблица 14. Состав карбонатов в почвах юга Украины

Местоположение разрезов (район, область)	Почвы	Глубина карбонатного горизонта, см	Содержание карбонатов, %	Состав карбонатов, % от суммы	
				CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>
Очаковский Одесской обл.	Чернозем южный	60-90	15,5	91	9
Очаковский Одесской обл.	Темно-каштановые слабосолонцеватые	40-80	12,0	87	13
Скадовский Херсонской обл.	Темно-каштановые слабосолонцеватые	100-110	9,7	86	14
Скадовский Херсонской обл.	Солонец луговой содово засоленный	60-80	2,3	65	35
Мелитопольский Запорожской обл.	Темно-каштановые слабосолонцеватые	50-60	10,9	88	12
Генический Херсонской обл.	Темно-каштановые слабосолонцеватые	50-60	10,3	90	10
Генический Херсонской обл.	Солонец степной	45-55	15,4	87	13
Красноперекопский Крымской обл.	Солонец луговой	30-50	10,0	69	31
Красноперекопский Крымской обл.	Темно-каштановые солонцеватые	40-50	13,0	90	10
Красноперекопский Крымской обл.	Солонец степной	30-40	12,0	87	13

Однако в орошаемых почвах щелочность может повышаться не только за счет собственно содового засоления, но и в результате сдвига карбонатно-кальциевого равновесия без участия натрия. Это происходит вследствие удаления CO<sub>2</sub> из воды в воздух или поглощения фитопланктоном двуокиси углерода. Образуется ион CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> и ион OH<sup>-</sup>, при этом возрастает pH.

В последние годы химики (Dicson, 1981; Воробьева, Замана, 1984), опираясь на теорию Бренстеда-Лоури, установили, что на повышение щелочности влияют не только карбонат-ионы, но и другие соединения, являющиеся основаниями и способные присоединять протон при взаимодействии с кислотой при определении щелочности. Например, карбонат-ион  $\text{CO}_3^{2-}$  при взаимодействии с водой присоединяет протон и превращается в гидрокарбонат – ион  $\text{HCO}_3^-$ , а вода, отдавая протон, переходит в  $\text{OH}^-$ , поэтому раствор приобретает щелочную реакцию:



Так происходит и с рядом соединений, которые относят к основаниям:  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3$  и другие.

А.А. Воробьева и С.П. Замана (1984) предложили метод определения компонентного состава общей щелочности: карбонатная щелочность, обусловленная гидролитически щелочными солями производных угольной кислоты ( $\text{Щ}_{\text{карб}}$ ), щелочность, обусловленная ионами органических кислот ( $\text{Щ}_{\text{орг}}$ ), сульфидами ( $\text{Щ}_{\text{с}}$ ), боратами ( $\text{Щ}_{\text{б}}$ ) и алюминием. Мы использовали указанный метод для получения данных о компонентном составе щелочности в некоторых орошаемых почвах юга Украины, где обнаружено содовое засоление.

Результаты исследований (табл. 15) показывают, что щелочность водных вытяжек исследуемых почв имеет сложный состав. Основную роль в ее формировании и проявлении играют карбонатные ионы  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ . Они присутствуют во всех почвах, и доля карбонатной щелочности составляет 40–83 % от общей щелочности. Вместе с тем значительную долю (35–68 %) в составе соединений, обуславливающих общую щелочность, занимают анионы органических кислот, которые формируют так называемую органическую щелочность. Наибольшее ее количество отмечается в горизонтах почв, где выражены процессы естественного и вторичного осолонцевания, обусловленного влиянием щелочных оросительных вод. Это позволяет утверждать, что источником органической щелочности являются гуматы натрия. Последние в растворе ведут себя по типу соли слабой кислоты и сильного основания, сообщая раствору щелочную реакцию:



Повышение щелочности за счет гидролиза гуматов натрия отмечалось и в солонцах Заволжья (Зимовец, 1975).

Обращает на себя внимание наличие щелочности, обусловленной анионами органических кислот на глубине 80–100 см. Это можно объяснить миграцией органических веществ вниз в условиях ирригации.

Таким образом, щелочность в горизонтах содопроявления имеет сложный компонентный состав и обусловлена карбонатами, органическими соединениями и в незначительном количестве боратами и сульфидами.

Таблица 15. Компонентный состав щелочности в почвах Украины

Место отбора образца	Почвы	Глубина, см	Виды щелочности (Щ, % от общей)			
			Щ <sub>карб</sub>	Щ <sub>орг</sub>	Щ <sub>б</sub>	Щ <sub>с</sub>
Одесская обл., Татарбунарский р-н, к-з им. Суворова	Чернозем южный орошаемый	0-10	50,5	49,5	-	-
		20-50	34,0	66,6	следы	-
		50-70	44,3	55,7	следы	-
		100-150	77,0	22,6	0,4	-
Одесская обл., Килийский район, к-з "Украина"	Черноземно-луговая орошаемая	0-20	82,6	17,2	0,2	-
		40-60	76,2	23,6	0,2	-
		60-80	76,0	20,1	0,2	3,7
		100-150	81,4	17,2	0,3	1,1
		150-200	84,0	13,9	0,1	2,0
Крымская обл., Джанкойский р-н с. Предместное	Солонец степной, целина	20-30	35,0	67,9	1,4	4,0
Крымская обл., Красноперкопский район, с-з Новопавловский	Темно-каштановая солонцеватая	60-70	52,0	30,0	4,4	4,4
Херсонская обл., Цюрюпинский р-н, с-з "Знамя коммунизма"	Солонец луговой	80-100	82,7	1,5	3,5	-

Исследованные почвы по показателям щелочности условно можно разделить на две группы. Первая группа объединяет черноземы южные, темно-каштановые солонцеватые почвы, солонцы. Основным компонентом щелочности верхних горизонтов этих почв является органическая щелочность, доля кото-

рой составляет 44–68 % от общей щелочности. В водной вытяжке из нижних горизонтов этих почв (100–150 см) преобладает карбонатная щелочность, в то время как органическая составляет 15–20 % от общей щелочности.

Вторая группа орошаемых почв включает лугово-каштановые и лугово-черноземные почвы. Щелочность этих почв на 67–83 % связана с карбонатными ионами, а доля органической щелочности не превышает 12–30 % от общей щелочности. Причем общая и карбонатная щелочность выше суммарной концентрации ионов кальция и магния, что подтверждает содовую природу щелочности этих почв.

В заключение этого вопроса отметим главное. Первопричиной содопроявления почв наиболее распространенных автономных и подчиненно-транзитных геохимических ландшафтов являются геологические изменения, когда такие территории подвергались тектоническому опусканию с засолением и осолонцеванием почв. В современную геологическую эпоху совершается подъем территории, рассоление почво-грунтов и их рассолонцевание.

В подчиненно-аккумулятивных геохимических ландшафтах, где в настоящий период близко к поверхности залегают минерализованные грунтовые воды, обеспечивающие интенсивное засоление почв нейтральными солями, содопроявление не обнаруживается. Исключением являются гидроморфные и полугидроморфные почвы, в которые сода поступает непосредственно из содовозасоленных грунтовых вод (терраса-дельта Днепра). Такая же закономерность содопроявления отмечается не только в Причерноморье, но и в Прикаспийской низменности и низменных районах Северного Кавказа (Бобков, 1976; Буйлов, 1982; Зимовец, 1975).

### **Основные методы борьбы с содопроявлением при орошении почв юга Украины**

Как говорилось выше, содовое засоление является наиболее токсичным для сельскохозяйственных растений. Это связано в первую очередь с сильным подщелачивающим действием соды, вследствие которого рН почвенного раствора достигает 9–9,5 и более. При такой щелочности начинается процесс ослизления и разрушения растительных тканей.

При меньших значениях рН (8–9) вредное влияние соды носит опосредованный характер. В этом случае большинство элементов питания, особенно фосфор, переходя в труднора-

творимые соединения, становятся недоступными или труднодоступными для растений.

Хорошо известно и сильное осолонцовывающее влияние соды на почвы, когда происходит внедрение натрия в поглощающий комплекс и ухудшаются их водно-физические свойства. Приведенные выше данные по содопроявлению в орошаемых почвах юга Украины показывают, что в горизонтах, где появляется двууглекислая и даже нормальная сода, величина общей щелочности (по среднеарифметическим значениям) колеблется в пределах от 0,5 до 1,5 мг-экв на 100 г почвы, что позволяет отнести почвы к слабо- и среднещелочным.

Возникает вопрос о пороге токсичности величин щелочности для растений. Вообще этот вопрос разработан не только недостаточно, но и рассматривается неоднозначно исследователями. По Н.И. Базилевич и Е.И. Панковой (1969), порог токсичности общей щелочности равен 1,3–1,4 мг-экв на 100 г почвы. В.А. Ковда (1965) считает, что плодородие почв снижается и при более низком значении щелочности. Так, щелочность более 0,04% (0,8 мг-экв/100 г почвы) снижает урожай на 25–40%, а щелочность выше 0,08% (1,3 мг-экв/100 г почвы) – на 70–80%. В.А. Зимовец (1975) установил, что для условий Заволжья токсичной является щелочность, связанная с натрием и магнием, в количестве более 0,7 мг-экв/100 г почвы.

Для почвенно-климатических условий Украины изучено влияние соды на древесные культуры (Е.С. Мигунова, (1985).

Нами были проведены микровегетационный и микрополевой опыты. Микровегетационный опыт проводился в стеклянных банках емкостью 500 см<sup>3</sup>. В качестве субстрата служили два объекта: гумусовый горизонт темно-каштановой почвы и песок. В почву вносили раствор соды различной концентрации, после чего высеяли ячмень и ежедневно поливали дистиллированной водой. После окончания опыта определяли вес зеленой массы ячменя и состав водной вытяжки из почв вегетационных сосудов.

В этом микровегетационном опыте было установлено снижение урожая ячменя на 20% при величине общей щелочности 1,2 мг-экв/100г почвы и рН 8,1. С увеличением общей щелочности до 2–3 мг-экв/100г почвы и при наличии соды в количестве 0,1–0,2 мг-экв/ 100г почвы потеря урожая достигла 50–60%.

В опыте с песком пороговое значение токсичности содового засоления оказалось более низким. Так, при общей щелочности 1,2 мг-экв/100 г почвы и в присутствии двууглекислой соды в количестве 0,2 мг-экв/100 г почвы урожай ячменя снизился

на 75–80 %. При pH 9,3 и содержании соды в количестве 0,4–0,5 мг-экв/100г почвы и общей щелочности 2–3 мг-экв/100 г наблюдалась гибель всех растений.

Микрополевым опытом был заложен на темно-каштановой почве на микроплощадках размером 1 м<sup>2</sup>. Анализ данных показал следующее. Общая щелочность в количестве 0,4–0,5 мг-экв/100 г почвы, обусловленная в основном гидрокарбонатами кальция, не оказывает токсического влияния на растения (озимую пшеницу). В случае, когда общая щелочность составляет 0,5–0,7 мг-экв/100г почвы, а pH 8–8,2 и присутствует гидрокарбонат натрия, наблюдается снижение урожая на 10–15%. При дальнейшем увеличении щелочности до 1,0–1,2 мг-экв/100г почвы, а также увеличении pH до 8,4 и в присутствии соды на глубине 60–80 см урожай снижается на 35 %.

Полученные результаты позволяют прийти к заключению, что в почвенно-климатических условиях юга Украины токсичное действие общей щелочности (с участием гидрокарбонатов натрия) начинает проявляться уже при величине 0,5–0,7 мг-экв/100 г почвы, что приводит к снижению урожая на 10–15%. При содержании около 1,2 мг-экв/100 г почвы оно еще более усиливается: урожай падает на 20–30%, а на песках – до 75–80%. Дальнейшее ощелачивание снижает урожай на 50–60%, а на песках вызывает полную гибель растений.

Результаты еще одного вегетационного многофакторного опыта показали, что степень токсичности соды возможно значительно уменьшить, если вносить минеральные удобрения и фосфогипс. Урожай возрастает вдвое.

Следовательно, величина общей щелочности в значительной мере определяет уровень плодородия почв. Вместе с тем степень токсичности щелочности зависит еще и от гранулометрического состава почв, емкости обмена, а также от состава содержащихся в них других водорастворимых солей. Все эти показатели влияют на буферность почвы (Трускавецкий, 2009) и ее содоустойчивость.

Предложенный В.П. Бобковым (1968) метод определения совокупных защитных свойств почв (содоустойчивости) позволяет установить, насколько почво-грунт устойчив к содовому засолению и в какой степени возможно прогнозировать ее появление. Мерой содоустойчивости является количество соды, обезвреживаемое почвой. Чем большей содоустойчивостью обладает почва, тем позже может наступить содовое засоление почв, даже при одинаковых условиях.

Результаты проведенного нами определения содоустойчивости в некоторых почвах юга Украины представлены в таблице 16.

Содоустойчивость почв оказалась неодинаковой, она сильно колебалась от 6 до 45 мг-экв на 100 г почвы. Наиболее слабая содоустойчивость отмечена в почве более легкого гранулометрического состава, испытывающей вторичное засоление содового химизма (разрезы 1, 30, 32)

В каштановых и темно-каштановых почвах, а также солонцах Херсонской и Крымской областей, где почвы развиваются на морских плиоценовых террасах (разрезы 150, 116, 101, 118), содоустойчивость несколько повышается, но остается в пределах слабой и средней.

Таблица 16. Содоустойчивость некоторых почв юга Украины

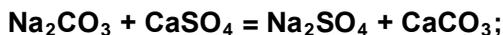
Номер разреза	Глубина, см	Почва	Место отбора образцов	Содоустойчивость, мг-экв на 100 г почвы	Степень содоустойчивости	
1	2	3	4	5	6	
Николаевская область, водораздельное плато						
44	0-20	Темно-каштановая слабосолонцеватая	Березанский р-н, с-з им.Петровского	41,3	средняя	
	30-40			35,7	средняя	
	190-200			48,2	средняя	
42	0-20	Чернозем южный остаточносолонцеватый		42,8	средняя	
	35-45			44,8	средняя	
	50-100			30,7	слабая	
	150-160			28,3	слабая	
Херсонская область, плиоценовая терраса						
101	0-10	Солонец солончакковый	Каланчакский р-н, с-з Каланчакский	27,2	слабая	
	20-36			26,5	слабая	
	40-50			38,4	средняя	
116	0-10	Темно-каштановая солонцеватая		27,3	слабая	
	25-35			35,7	средняя	
	40-50			30,7	слабая	
150	0-20	Каштановая солонцеватая		с-з "Грузия"	39,8	средняя
	30-40				39,8	средняя
	50-60		28,9		слабая	
	60-70		24,9		слабая	

1	2	3	4	5	6
Херсонская область, терраса-дельта Днепра					
1	40-60	Солонец вторично содово- засоленный	Цюрюпинский р-н, к-з "Знамя коммунизма"	6,2	очень слабая
	60-80			4,8	очень слабая
30	35-45	Темно-каштановая солонцеватая вторично луговая	Голопристанский район, к-з "Россия"	21,2	слабая
	75-85			19,4	очень слабая
32	27-37	Солонец каштаново- луговой солончако- ватый		16,9	очень слабая
	60-80			21,6	слабая
Крымская область, плиоценовая терраса					
118	0-10	Темно- каштановая	Джанкойский р-н, к-з "Завет Ленина"	33,9	слабая
	20-30			34,9	слабая
	30-40			35,9	средняя
	60-70			24,9	слабая

Наибольшей содоустойчивостью (до 40–44 %) обладают черноземы южные (разрез 42) и темно-каштановые почвы (разрез 44), формирующиеся в условиях плато (Николаевская область). По-видимому, это связано с высокой насыщенностью почв поглощенным кальцием.

Относительно низкий уровень содоустойчивости почв юга Украины, особенно солонцеватых их разновидностей и почв, засоляющихся содой из грунтовых вод, свидетельствует о необходимости применения мер по ослаблению содового засоления. Их разработка должна осуществляться с учетом следующих процессов, способствующих погашению содового засоления:

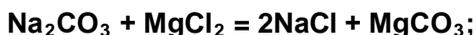
взаимодействие соды с гипсом по реакции:



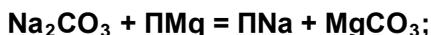
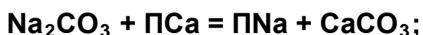
взаимодействие соды с кислотами по реакции:



взаимодействие соды с солями магния по реакции:



взаимодействие соды с поглощающим комплексом почв:



Что касается комплекса мер по борьбе с содовым засолением в конкретных местных условиях, то их разработка возможна лишь на основе многолетних полевых опытов, заложенных на почвах с разными источниками появления соды.

В данной работе приводятся материалы модельного опыта в лаборатории и мелкоделяночных полевых опытов.

Задача модельного опыта состояла в выявлении действия различных химических веществ на величину pH и общую щелочность почвы после кратковременного (трехдневного) их воздействия.

В качестве объекта исследования был взят иллювиальный горизонт солонца, одинаковые навески которого насыщались раствором соды концентрацией от 0,2 до 0,8 мг-экв/100 г почвы. Навески весом в 40 г почвы с различной степенью содового засоления помещали в колбы и вносили химические мелиоранты:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , пиритные огарки и фосфогипс. Затем в колбы вливали дистиллированную воду (имитация полива) до величины наименьшей влагоёмкости почвы. Образовавшаяся суспензия выдерживалась в течение трех суток, после чего определяли pH и активность иона натрия. Затем почва высушивалась, растиралась, просеивалась через сито диаметром 1 мм. Из отобранных навесок приготавливали водные вытяжки и проводили анализ. Результаты модельного опыта представлены в таблице 17.

Оказалось, что под влиянием мелиорантов (за исключением пиритных огарков) происходит полная нейтрализация щелочности от нормальных карбонатов и снижение величины общей щелочности. В наибольшей степени эти процессы выражены при внесении фосфогипса, серной кислоты и сернокислого железа.

Полевые мелкоделяночные опыты проводили в Крымском Присивашье (совхоз «Новопавловский» Красноперекопского района) и в Херсонской области на второй террасе Днепра (колхоз им. Ладычука).

Почвенный покров опытного участка в совхозе «Новопавловский» представлен темно-каштановыми почвами разной сте-

пени солонцеватости. Гранулометрический состав легкоглинистый. Обменный натрий в гумусовом горизонте составляет всего 0,6 мг-экв/100 г почвы, в переходном – 1,2 мг-экв/ 100 г почвы. Содержание водорастворимых солей в верхнем 0-50 см слое незначительно (до 0,1 %), но в составе солей присутствует бикарбонат натрия, а на глубине 50–70 см – нормальная сода в количестве 0,02-0,1 мг-экв/100 г почвы.

Таблица 17. Влияние мелиорантов на изменение pH и общей щелочности в почве (модельный опыт)

Варианты опыта	pH	Щелочность водной вытяжки, мг-экв/100 г почвы	
		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Контроль	8,95	0,8	4,4
Фосфогипс	7,98	нет	1,1
FeSO <sub>4</sub>	7,6	нет	1,0
Пиритные огарки	8,6	0,8	3,6
Смесь фосфогипса с пиритными огарками	8,3	—	1,7
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,7	нет	1,8
HNO <sub>3</sub>	8,3	нет	2,5
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	8,2	нет	1,4
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	8,3	нет	2,0

На другом опытном участке в колхозе им. Ладычука почвенный покров представлен комплексом темно-каштановых солонцеватых вторично луговых почв с солонцами каштановыми вторично-луговыми (до 10%). Гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Содержание поглощенного натрия в солонцовом горизонте составляет 5,7 мг-экв/100 г почвы. Количество водорастворимых

солей в почве до глубины 50 см небольшое, до 0,15 %. С глубины 70 см и ниже появляется нормальная сода, которая присутствует также в грунтовой воде.

Микрополевые опыты на первом участке заложены на темно-каштановой почве, а на втором – на крупном пятне солонца. В опытах изучалось действие на почвы и растения фосфогипса, сернокислого железа, серной кислоты, смеси фосфогипса и сернокислого железа.

Результаты исследования показывают, что внесение мелиорантов вызвало значительное изменение состава и свойств почв (табл. 18).

Таблица 18. Физико-химические показатели солонца после внесения различных мелиорантов

Варианты опыта	Глубина, см	Обменный натрий, мг-экв/100 г почвы	pH	a Na, мг-экв/л	$\frac{aNa}{\sqrt{aCa}}$
Контроль	0-20	1,87	7,2	15,14	6,82
	20-40	5,72	7,5	39,81	20,42
Фосфогипс	0-20	0,62	6,6	9,12	2,45
	20-40	1,87	6,9	22,39	7,15
Сернокислое железо	0-20	0,57	5,45	10,72	3,55
	20-40	3,13	6,7	35,48	13,65
Смесь фосфогипса и сернокислого железа	0-20	0,51	6,2	10,0	3,24
	20-40	1,08	7,0	28,18	11,23
Серная кислота	0-20	0,41	6,6	5,85	1,82
	20-40	2,34	7,5	21,82	7,76

Приведенные данные свидетельствуют, что под влиянием мелиорантов произошло понижение щелочности почвенного раствора, величина pH с 7,2–7,5 уменьшилась до 5–6. Заметно изменилась активность ионов натрия и кальция в почвенном

растворе. При внесении фосфогипса активность ионов натрия уменьшилась с 15,1 до 9,1 *мг-экв/л*, при действии сернокислого железа – до 10,7 и серной кислоты – до 5,85 *мг-экв/л*. Активность ионов кальция возросла, и отношение активности иона натрия к кальцию в пахотном слое снизилась в три раза по сравнению с контролем, а при внесении сернокислого железа – в два раза. Уменьшение величины активности ионов натрия по отношению к активности ионов кальция свидетельствует о том, что в почве происходит рассолонцевание. Доказательством этому служат данные о содержании поглощенных оснований. Так, если до мелиорации (на контрольном участке) в иллювиальном горизонте солонца (20–30 см) содержание поглощенного натрия достигало 5,72 *мг-экв/100 г* почвы, то под влиянием мелиорантов оно уменьшилось до 1,1–2,3 *мг-экв/100 г* почвы. Наибольшее рассолонцевание произошло после внесения фосфогипса, серной кислоты и сернокислого железа. Таким образом, под влиянием мелиорантов в почвах произошло не только снижение щелочности, но и рассолонцевание.

Хотя внесение мелиорантов оказалось весьма эффективным для улучшения состава и свойств почв, но реакция растений на них была не совсем однозначной (табл. 19).

Мелиоранты с кислой реакцией (серная кислота, отчасти сернокислое железо) вызвали сильное подкисление почвенного раствора, в результате чего урожай стал ниже, чем на контроле. Это особенно проявилось в первый год проведения опыта.

На второй год опыта, поставленного на пятне солонца, угнетения растений уже не отмечалось как на варианте с внесением серной кислоты, так и сернокислого железа. Это можно объяснить тем, что атмосферные осадки в осенне-зимний период разбавили почвенные растворы, и это способствовало их миграции вниз. Урожай был выше, чем на контроле на 28–29 %, а внесение смеси фосфогипса с сернокислым железом вызвало прибавку урожая до 52 %.

Стабильно высокий урожай, как на темно-каштановой почве, так и на солонце обеспечивал фосфогипс. Прибавка колебалась в пределах от 32 до 57 %. Таким образом, для снижения повышенной щелочности и ослабления солонцеватости можно применять такие мелиоранты как фосфогипс, смесь его с сернокислым железом. Серную кислоту целесообразно использовать на почвах с четко выраженным содовым засолением.

Что касается норм мелиоранта, вносимого в целях ослабления щелочности, то для их определения мы предлагаем использовать данные щелочности, связанной с магнием и

натрием, т.е.  $\text{NaHCO}_3$  И  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ . Это так называемая бескальциевая щелочность  $\text{HCO}_3$  – Ca по Козловскому (2003).

Таблица 19. Урожай ячменя в условиях микрополевого опыта

Варианты опыта	Почвы					
	Темно-каштановая солонцеватая, совхоз "Новопавловский"		Солонец, колхоз им. Ладычука			
	1984 г.		1984 г.		1985 г.	
	г/м <sup>2</sup>	прибавка урожая, %	г/м <sup>2</sup>	прибавка урожая, %	г/м <sup>2</sup>	прибавка урожая, %
Контроль	133,5	-	108,4	-	218	-
Фосфогипс	180,7	35,4	170,8	57,5	310	42,2
Сернокислое железо	136,7	2,1	89,4	- 17,5	283	29,8
Смесь фосфогипса и сернокислого железа	141,5	6,0	120,3	11,0	33,2	52,3
Серная кислота	103,0	-22,8	47,9	-55,8	28,0	28,4
	НСП <sub>0,95</sub> =5,2 г/м <sup>2</sup> P - 1,3%		НСП <sub>0,95</sub> =12,9 г/м <sup>2</sup> P - 4,0%		НСП <sub>0,95</sub> =12,7 г/м <sup>2</sup> P - 1,6%	

В этом случае целесообразно применить такую формулу:

$$x = 0,086 (S - Ca) \cdot H \cdot D,$$

где x – доза гипса, т/га;

S – величина общей щелочности водной вытяжки в первом горизонте, где обнаружено содовое засоление, мг-экв на 100 г почвы;

Ca – содержание катиона кальция в водной вытяжке в этом же горизонте, мг-экв на 100 г почвы;

H – мощность мелиорируемого слоя, см;

D – объемная масса, г/см<sup>3</sup>.

Как видно из формулы, часть общей щелочности, связанную с кальцием, не следует принимать в расчет, а учитывать только ту, что связана с натрием и магнием.

В качестве примера приведем результаты расчета ориентировочных доз гипса для почв, в которых обнаружено содопроявление по разным административным областям (табл. 20). Нормы гипса рассчитаны как по среднеарифметическим значениям ( $\bar{x}$ ), так и по доверительному интервалу средней величины (Д).

Таблица 20. Примерные нормы гипса для погашения щелочности, связанной с Na и Mg в орошаемых почвах юга Украины

Области	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг-экв на 100г почвы		Ca, мг-экв на 100 г почвы	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca, мг-экв на 100 г почвы		Нормы гипса, т/га при учете	
	$\bar{x}$	Д		$\bar{x}$	Д	$\bar{x}$	Д
Одесская	0,5	0,4-0,7	0,2	0,3	0,2-0,5	1,9	1,2-3,2
Николаевская	0,6	0,4-0,8	0,3	0,3	0,1-0,5	1,9	0,6-3,2
Днепропетровская	0,8	0,6-1,0	0,3	0,5	0,3-0,7	3,2	1,9-4,5
Запорожская	0,7	0,6-0,8	0,3	0,4	0,3-0,5	2,6	1,9-3,2
Херсонская	0,7	0,4-1,0	0,2	0,5	0,2-0,8	3,2	1,3-5,1
Крымская	1,1	0,7-1,5	0,3	0,8	0,4-1,2	5,1	2,6-7,7

Дозы гипса колеблются по данным доверительного интервала, от 0,6 до 7,7 т/га. Но их необходимо конкретизировать для почв по предложенной выше формуле.

Если нормы гипса определять из расчета только нейтрализации щелочности, вызванной собственно натрием, то норма гипса будет меньшей. В среднем для почв Одесской, Николаевской и Запорожской областей она составит около 1 т/га, для Днепропетровской и Херсонской – по 2 т/га и для Крымской по 3 т/га. Однако более правильно количество гипса рассчитывать с учетом погашения щелочности, связанной не только с натрием, но и с магнием.

Для нейтрализации щелочности можно вносить также хлористый кальций. Он имеет преимущество перед гипсом за счет лучшей растворимости, что особенно важно, когда содопроявление обнаружено не в самом верхнем горизонте, а на большей глубине. Для этих целей можно применять сернокислое железо и фосфогипс, примерно по половине нормы каждого мелиоранта, рассчитанной по гипсу.

В случае, если плантажированные почвы с поверхности карбонатны, можно вносить гидролизную серную кислоту, которая нейтрализует соду и способствует образованию с карбона-

том кальция свежесожденного гипса, действующего на почву более активно.

Для расчета доз других мелиорантов можно воспользоваться таблицей 21.

Внесение мелиорантов не только ослабляет щелочность почв, но и способствует рассолонцеванию. В борьбе с солонцеватостью важно также применять и агротехнические приемы.

С учетом разработанных рекомендаций по мелиорации солонцовых почв (2000, 2001 гг.), для солонцовых почв Крымского и Херсонского Присивашья высокий эффект обеспечивает глубокая мелиоративная плантажная вспашка, но ее следует проводить при глубине грунтовых вод не ближе 3 м.

Для снижения солонцеватости почв с глубоким залеганием карбонатного или гипсового горизонта рекомендуется внесение гипса по обычной или глубокой (на 30–40 см) вспашке. Дозы гипса колеблются от 2 до 10 т/га и определяются при составлении проекта химической мелиорации для каждого поля севооборота особо, а для погашения щелочности следует увеличить дозу гипса.

Большое значение в борьбе с содовым засолением и солонцеватостью имеет внесение навоза или заплата сидеральных трав. В этих случаях в почвах продуцируется много углекислоты, что способствует переводу карбоната кальция в бикарбонат и повышению активности кальция, его внедрению в поглощающий комплекс, а также положительно воздействует на прочность структурных агрегатов почвы.

Не менее важным мероприятием является внесение минеральных удобрений. Для содовозасоленных горизонтов нужны физиологически и химически кислые удобрения – сульфат аммония, суперфосфат, кальциевая селитра. Нормы внесения удобрений должны определяться в соответствии с зональными рекомендациями для орошаемых условий.

Учитывая различные пути появления содового засоления в почвах при орошении (сульфат-редукция, грунтовые воды, десорбция поглощенного натрия при рассолении, поливные воды), предлагаем следующие рекомендации по борьбе с этим явлением.

1. Для почв рисовых участков, где содопроявление связано с сульфат-редукцией, необходим целый ряд мероприятий (Н.Ф. Решетняк, 1974; Т.Н. Кириенко, 1985).

Так, для усиления аэрации почвы следует проводить глубокую зяблевую вспашку и весеннюю перепашку, осуществлять сброс воды в период всходов риса с целью снижения количества

восстановленных продуктов и ослабления токсичного их действия на проростки риса. Для пополнения почвы кислородом рекомендуется вносить легко восстанавливающиеся вещества (окислители), которые могут служить акцепторами водорода при окислительно-восстановительных реакциях (перекись водорода, перманганат калия, нитраты).

Таблица 21. Коэффициенты для вычисления норм внесения в почвы различных мелиорантов

Вещество	Количество чистых мелиорирующих веществ, эквивалентное чистому гипсу, т
Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	1,0
Хлористый кальций ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	0,85
Известняк ( $\text{CaCO}_3$ )	0,58
Сера (S)	0,19
Серная кислота $\text{H}_2\text{SO}_4$	0,57
Сульфат железа ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )	1,62
Сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$	1,29
Полисульфид $\text{CaS}_2$	0,77

С целью нейтрализации повышенной щелочности в почвах рисовых участков лучше вносить хлористый кальций, поскольку гипс и сернокислое железо как вещества, содержащие сульфаты, могут усиливать процесс сульфат-редукции.

Положительное действие оказывает фосфоритная мука, которая является не только удобрением, но и ослабляет подвижность алюминия, снижает его токсичное действие на растения (Н.В. Дубовская, 1978).

Необходимо вводить правильные севообороты, не допускать длительной монокультуры риса, высевать люцерну и другие многолетние травы для их фитомелиорирующего воздействия. Учитывая, что при возделывании риса создается интенсивный

промывной режим, рекомендуется вносить повышенные нормы удобрений с учетом культур рисового севооборота.

2. На участках, где повышенная щелочность вызвана воздействием напорных вод (юг Краснознаменной системы), прежде всего, необходимо понизить уровень грунтовых вод до 3 м для ослабления воздействия их на почвы и провести ряд приемов повышения плодородия почв (С.А. Балюк и др, 2001).

Из химических мелиорантов хорошее действие в этих условиях оказывает совместное внесение фосфогипса и сернокислого железа (или пиритного огарка). Фосфогипс способствует нейтрализации содового засоления, вытеснению натрия из поглощающего комплекса. Сернокислое железо и пиритные огарки повышают эффективность фосфогипса за счет подкисления среды, железо способствует оструктуриванию почвы. Нормы внесения этих веществ различны. Лучшее действие оказывает смесь из фосфогипса (6 т/га) и сернокислого железа (10 т/га). На каштаново-луговой солонцеватой почве эта норма соответственно равна 3 и 5 т/га.

Еще более сильное влияние на снижение щелочности содово-засоленных почв оказывает внесение 1 % раствора серной кислоты. При этом величина рН уменьшается с 9,3 до 8,1, а количество обменного натрия с 4,8 до 2 мг-экв на 100 г почвы.

Положительное действие серной кислоты усиливается в присутствии карбоната кальция, когда образуется свежесажженный гипс, способствующий рассолонцованию почвы. Поскольку речь идет о снижении щелочности в нижних горизонтах, которые, как правило, карбонатны, то внесение раствора серной кислоты может быть целесообразно.

На таких участках, кроме орошения, необходимо внесение минеральных и органических удобрений, введение посева многолетних трав, особенно белого донника, который хорошо переносит содовое засоление.

3. На участках плато и плиоценовых террас, где повышенная щелочность вызвана десорбцией натрия на карбонатном фоне при рассолении, необходимо усилить процесс вытеснения натрия из поглощающего комплекса.

Для этого следует вносить кальцийсодержащие вещества – фосфогипс, хлористый кальций, смесь фосфогипса и сернокислого железа и другие мелиоранты. Наиболее доступным в настоящее время является внесение фосфогипса.

Ускорение растворения карбоната кальция связано с повышением содержания углекислоты в почвенном растворе. Поэтому рекомендуется применять посева трав с ежегодным запа-

живанием их в качестве зеленого удобрения или возделывать многолетние травы (люцерну). Такое же действие оказывает и внесение повышенных доз навоза (80–100 т/га).

На староплантажированных участках, где на поверхность вынесена карбонатная масса, рекомендуется вносить слабый раствор серной кислоты. Это ускоряет процесс растворения карбоната кальция с переводом его в бикарбонат, после чего происходит внедрение кальция в поглощающий комплекс и вытеснение натрия. Орошение рекомендуется с промывным режимом.

Необходимо также устройство дренажа с выводом грунтовых вод за пределы данной территории для того, чтобы удалить почвенные растворы с вытесненным натрием и предупредить возможность последующего осолонцевания почв раствором соды. Следует вносить физиологически и химически кислые минеральные удобрения.

4. Для улучшения соотношения катионов в поливной воде необходимо внесение в воду кальциевых мелиорантов (фосфогипс, хлористый кальций), для снижения щелочности – кислотные воды, а при повышенной минерализации – разведение пресной водой (Рекомендации... 2003).

В связи с изменением карбонатно-кальциевого равновесия в поливной воде под влиянием высокой температуры или под воздействием фитопланктона, которое сопровождается разложением иона  $\text{HCO}_3$  и появлением  $\text{CO}_2$ , рекомендуется периодически вносить гипс даже на почвах, где сода образуется лишь эпизодически.

Кроме химических и агрохимических приемов, необходимо проводить гидротехнические (дренаж), особенно на территориях, где сода появляется из близко залегающих грунтовых вод.

В целом для повышения эффективного использования орошаемых земель рекомендуется использовать весь комплекс предлагаемых мер (Рекомендации эффективного использования земель при орошении, 2003 и др.).

## **Заключение**

В почвах степной и сухостепной зон Украины, в незасоленной части их профиля, где содержатся гидрокарбонаты кальция и магния, весьма часто появляются гидрокарбонаты и даже карбонаты натрия.

С целью выявления приуроченности содопроявления к определенным типам почв было проведено специальное исследование в почвах степного Крыма. Изучался состав водораство-

римых солей по данным водных вытяжек. Применялся статистический метод обработки данных.

В большинстве разрезов почв зафиксировано появление двууглекислой соды в незаселенных горизонтах, содержащих разное количество поглощенного натрия и карбонатов кальция. Глубина залегания такого горизонта в почвах различна. В солонцах содопроявление обнаружено в пределах первого полуметрового слоя, в темно-каштановых – второго и третьего, в черноземах – третьего и четвертого полуметрового слоя.

Количество солей в таких горизонтах небольшое (0,1–0,2%), в их состав входят гидрокарбонаты натрия, магния и кальция, а также хлориды и сульфаты натрия. Соотношение ионов  $\text{HCO}_3$  к сумме Ca и Mg превышает единицу, что свидетельствует о присутствии двууглекислой соды. Ее количество неодинаково в почвах: больше всего в солонцах (50–60 %), меньше в темно-каштановых сильно- и среднесолонцеватых (25%), и совсем мало в слабосолонцеватых их видах (15 %). Общая щелочность варьирует в солонцах в пределах 0,7–1,7 мг-экв/100 г почвы, в темно-каштановых почвах – 0,8–1,03, в черноземе южном составляет 1,03 мг-экв/100 г почвы. В целом общая щелочность невысокая, наибольших значений она достигает в иллювиальных и переходных иллювиально-карбонатных горизонтах солонцов и солонцеватых почв. Однако и в таких пределах она вызывает снижение плодородия почв.

С введением широкого орошения на юге Украины содопроявление стало обнаруживаться в грунтовых и поливных водах, но больше всего – в почвах. В результате совместных исследований сотрудников Национального научного центра «Институт почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского» и гидрогеологов Минводхоза Украины впервые были установлены границы распространения содового засоления в почвах юга Украины при орошении, глубина горизонта, в котором присутствует бикарбонат натрия, интенсивность щелочности и частота встречаемости таких почв в пространстве.

Содопроявление отмечается в почвах всех оросительных систем, но оно носит спорадический характер (границы распространения почв, в которых отмечается содопроявление, показаны на картах). Величина щелочности, где присутствует бикарбонат натрия, колеблется в пределах 0,5–1,5 мг-экв/100 г почвы. Наименьшие величины щелочности (0,5–0,6 мг-экв/100 г почвы) встречаются в почвах юго-западного Причерноморья, максимальные (1,1–1,5 мг-экв/100 г почвы) – в Крымском Присивашье, где почвенный покров отличается повышенной солонцеватостью.

Неодинакова и глубина содопроявления. Более близко горизонты с повышенной щелочностью залегают в почвах Одесской области, глубже – в Крымской, Днепропетровской, Запорожской областях. Отмечается спорадичность содопроявления в пространстве.

Источники появления соды в почвах юга Украины при орошении различны: 1) сульфат-редукция (в подах, на рисовых участках); 2) напорные воды содового химизма (терраса-дельта Днепра); 3) процессы десорбции поглощенного натрия при рассолении почв на фоне карбоната кальция (преобладающая часть территории Причерноморья – плиоценовые террасы, плато); 4) поступление соды вместе с поливной водой; 5) ощелачивание оросительных вод при сдвиге карбонатно-кальциевого равновесия.

Наибольшее распространение получили почвы, в которых сода появилась при рассолении, сопровождающемся рассолонцеванием. Это объясняется тем, что вся Причерноморская низменность претерпела в ранние геологические эпохи четвертичного времени неоднократные опускания земной коры, с трансгрессией моря, засолением почво-грунтов и их осолонцеванием. В настоящий период земная кора поднимается в одних местах и опускается в других. Там, где совершается подъем, происходит рассоление почв и одновременно рассолонцевание.

Такие же процессы протекали и в других низменностях – Прикаспийской, Азово-Кубанской. Установлено, что орошение лишь усиливает рассоление и рассолонцевание почво-грунтов.

Проведенные вегетационные опыты показали, что, несмотря на слабую и среднюю степень ощелачивания почв, даже при величине щелочности  $0,5-0,7$  мг-экв/100 г почвы, когда в ней присутствует бикарбонат натрия, происходит токсичное воздействие на растения (урожай снижается на 10–15%). При щелочности  $1,2$  мг-экв/100 г почвы урожай сельскохозяйственных культур падает до 50–60 %.

Таким образом, все вышеизложенные факты свидетельствуют о необходимости применять меры по борьбе с ощелачиванием почв. На основании собственных и литературных данных предложены рекомендации по ослаблению щелочности в почвах, содовое засоление которых вызвано разными причинами.