

74773
В.П. Калинин

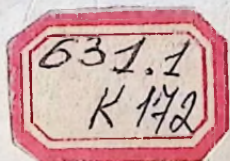
М.Б. Минкин

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МЕЛИОРАТИВНОГО ПРОЦЕССА

НА ОРОШАЕМЫХ
СОЛОНЦОВЫХ
КОМПЛЕКСНЫХ
ПОЧВАХ

Москва

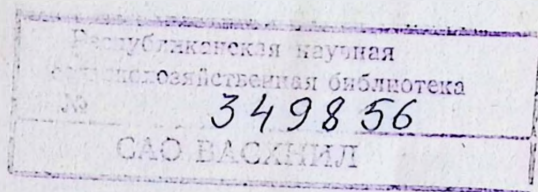
издательство
МСХА 1991



49/45
К
В.П. Калинин
М.Б. Минкин

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МЕЛИОРАТИВНОГО ПРОЦЕССА

НА ОРОШАЕМЫХ СОЛОНЦОВЫХ
КОМПЛЕКСНЫХ
ПОЧВАХ



Москва

издательство МСХА 1991

УДК 631.445.53

Калининченко В. П., Минкин М. Б.

Интенсификация мелиоративного процесса на орошаемых солонцовых комплексных почвах. М.: Издательство МСХА, 1991, 196 — с. ISBN 5—7230—0065—9.

В книге представлены результаты выполненных авторами количественных характеристик процессов влаго- и солепереноса в комплексных солонцовых почвах и разработанные на их основе приемы регулирования гидрологического режима, способствующие интенсификации мелиоративного процесса. Описаны полевые опыты, представлены данные об урожайности корневых культур, экономическая эффективность мелиораций.

Книга предназначена для научных работников, специалистов проектных организаций, студентов инженерно-мелиоративных и сельскохозяйственных вузов, практических работников сельского хозяйства.

К 3804000000—00
096(02)—91 Без объявл.

ISBN 5—7230—0065—9 © В. П. Калининченко, М. Б. Минкин, 1991

Введение

В южных и юго-восточных районах СССР одним из основных объектов мелиорации являются солонцовые почвы. Общая площадь комплексных солонцовых земель в нашей стране составляет более 100 млн га.

Низкое естественное плодородие солонцов и их локальное (пятнистое) расположение среди зональных почв приводят к резкому снижению продуктивности всех угодий солонцовых территорий. Ежегодный недобор зерна с общей площади пашни на комплексных солонцовых почвах составляет более 3 млн т, а с учетом лугов и пастбищ — 10—15 млн т корм. ед.

Распространение солонцовых почв приурочено главным образом к районам недостаточного увлажнения и связано с засоленностью почвообразующих пород, близким залеганием минерализованных грунтовых вод, слабой дренированностью территории.

Солонцы различны по строению и свойствам, однако у них есть и общие черты, в частности, наличие на глубине 3—20 см от поверхности плотного иллювиального горизонта, характеризующегося резко выраженными отрицательными агрономическими свойствами. При поступлении влаги этот слой сильно набухает и становится непроницаемым для воды, а в сухом состоянии он превращается в твердую плотную массу, не допускающую проникновения в нее корней. Корни проникают сюда только по трещинам, образующимся в результате высыхания.

Наличие в солонцах плотного иллювиального горизонта определяет отрицательные водно-физические, физико-химические, химические и биологические свойства этих почв.

Солонцы не залегают сплошными массивами, а образуют комплексы с зональными черноземными, каштановыми и бурыми почвами. В состав комплексов входят также луговые почвы западин. Количество солонцов составляет от 5—10 до 60—70% общей площади комплекса.

Мелиорация солонцовых земель является важным резервом увеличения производства зерна и кормов в нашей стране.

Приуроченность солонцов к различным почвенным зонам и геоморфологическим районам определяет их разнообразие по морфологическому строению и физико-химическим свойствам. Поэтому методы мелиоративного воздействия на солонцы должны быть строго дифференцированы. Особенно много негативных процессов (ощелачивание, оглинивание, слитизация и коркообразование) возникает при орошении солонцовых комплексных почв.

В настоящее время основными методами мелиорации солонцов являются: химический, агротехнический и комплексный.

Однако применение этих методов, особенно в условиях орошения, часто не дает должного мелиоративного эффекта, а во многих случаях отмечается реставрация отрицательных агрофизических свойств в длительном последствии [97, 110, 155]. Это свидетельствует о несовершенстве современных теоретических предпосылок генезиса и эволюции солонцовых почв, что тормозит выбор наиболее действенных способов их окультуривания.

Таким образом, поиск факторов, способствующих стабилизации, а иногда и реставрации отрицательных агрофизических свойств солонцовых почв, подвергнутых мелиорации, актуален.

Традиционные приемы исследования природы солонцов и теоретические предпосылки их мелиорации базируются на представлениях о характере процессов, происходящих в профиле только солонцовой почвы, вне связи с другими типами почв сложного комплексного покрова сухой степи.

Между тем почва представляет собой открытую систему, находящуюся в постоянном массо- и энергообмене с окружающей средой, поскольку является компонентом структурной единицы биосферы — биогеоценоза. В работах В. В. Егорова [92, 97], Б. А. Зимовца [109, 111] показано, что микрокомплексность почвенного покрова — один из факторов стабилизации природной почвенной системы, для которой характерно значительное засоление и осолонцовывание выпуклых элементов поверхности при промытости понижений и некоторой солонцеватости промежуточных по высоте позиций микрорельефа. Следовательно, мелиоративный эффект зависит не только от характера изменений в почвенном профиле солонцовых почв, но и в значительной степени определяется механизмом взаимосвязи отдельных компонентов почвенной комбинации (ПК). Согласно исследованиям В. М. Фридланда [227], воздействие лишь на один из компонентов почвенного покрова сказывается на состоянии других компонентов, что может привести к нежелательным изменениям.

В книге представлены результаты выполненных авторами количественных характеристик процессов влаго- и солепереноса в комплексных солонцовых почвах и разработанные на

их основе приемы регулирования гидрологического режима, способствующие интенсификации мелиоративного процесса.

Для их решения ставились следующие задачи.

1. Провести модельные эксперименты в почвенном канале, имитирующие условия почвообразования зоны каштановых почв, чтобы установить закономерности процессов массопереноса, определяющие характер структуры почвенного покрова (СПП).

2. Разработать методику математического анализа соотношения форм поверхности, учитывающую особенности микрокомплексности, специфику локализации элементарных почвенных ареалов (ЭПА) и изучить статистические закономерности варибельности почвенного покрова сухой степи и факторы формирования, развития и поддержания устойчивости СПП.

3. Провести анализ существующих уравнений, описывающих процессы массообмена в почвах, и разработать двухмерную математическую модель, описывающую процессы формирования микрокомплексности почвенного покрова.

4. Разработать метод интенсификации мелиоративного процесса при окультуривании солонцовых почв на основе представлений о факторах устойчивости СПП и изучить эффективность приемов регулирования гидрологического режима на фоне рекомендованных [203, 205] методов мелиорации солонцов.

Исследования проводились на территории Верхне-Сальской оросительной системы в сухостепной зоне каштановых почв юго-востока Ростовской области.

Для качественной и количественной характеристики многообразия почвенных процессов, свойственных структуре почвенного покрова сухой степи, наиболее приемлемым является метод моделирования. Такой метод особенно необходим при изучении почв каштановой зоны, отличающихся высокой варибельностью свойств.

На основании модельного опыта, имитирующего условия почвообразования сухой степи, установлена решающая роль пространственного влаго-солепереноса в формировании, развитии и поддержании устойчивости СПП. Показан характер процессов солепереноса в зависимости от микрорельефа и типа засоления, рассмотрены факторы, влияющие на подвижность ионов. Установлено, что причины устойчивости характерных параметров отдельных ЭПА, составляющих рассматриваемую ПК, определяются не только наличием или отсутствием связи с грунтовыми водами, размерами исходного засоления почвообразующих пород, но в значительной степени обусловлены интенсивным пространственным массообме-

ном. При этом большое значение приобретает характер обратной связи между взаимодействующими объектами.

Для количественной характеристики факторов и закономерностей локализации отдельных ЭПА нами использованы приспособленные к специфическим условиям сухой степи статистические приемы изучения реципиентно-донорных отношений между компонентами почвенного покрова на основе математических методов анализа форм микрорельефа.

Авторами разработана комплексная математическая модель (КМ) формирования высокодифференцированного в пространстве почвенного комплекса состава: солончаковый солонец, зональная каштановая почва, лугово-каштановая почва. КМ позволяет оценить эффективность воздействия моделируемых факторов формирования такой ПК в природных условиях под влиянием свойственной сухой степи неоднородности гидрологического режима почв.

Данные о закономерностях пространственной изменчивости почвенного покрова сухой степи использованы при разработке практических приемов пространственного нивелирования увлажнения, направленных на повышение эффекта от мелиорации солонцовых почв.

Для регулирования гидрологического режима предлагается использовать орудия ПЭК-1,6; СЗС-2,1; ЛД-10; БЩН-3; ППБ-0,6, применение которых значительно улучшит водно-физические и физико-химические свойства мелиорируемых орошаемых солонцовых почв. Это способствует повышению урожая сельскохозяйственных культур на 15—20% по сравнению с рекомендуемыми методами окультуривания, снижению себестоимости продукции на 20% и увеличению чистого дохода со 110,90 до 198,84 руб/га. Наиболее эффективными являются орудия ППБ-0,6 и БЩН-3, при использовании которых уровень окупаемости дополнительных затрат составляет 2,74—2,95 руб.

Экспериментальный материал, приведенный в книге, указывает на реальную возможность интенсификации мелиоративного процесса на солонцовых почвах посредством регулирования гидрологического режима. Это позволит значительно повысить плодородие почв, поднять эффективность сельскохозяйственного производства, добиться увеличения валовых сборов сельскохозяйственных культур.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕЛИОРАЦИИ ЗЕМЕЛЬ С КОМПЛЕКСНЫМ ПОЧВЕННЫМ ПОКРОВОМ

1.1. Роль СПП в оценке эффективности мелиорации солонцов

На территории Верхне-Сальской оросительной системы в результате взаимодействия природных факторов получили развитие почвы сухой степи с характерными для нее разнообразными комплексами.

С позиции исследования географии и экологии определенных классификационных групп почв в связи с генеральной совокупностью условий их формирования здесь создаются предпосылки протекания каштанового процесса почвообразования. Однако с точки зрения характеристики неоднородности почвенного покрова, которая является специфической чертой этого региона, более информативно изучение почвенно-географического пространства.

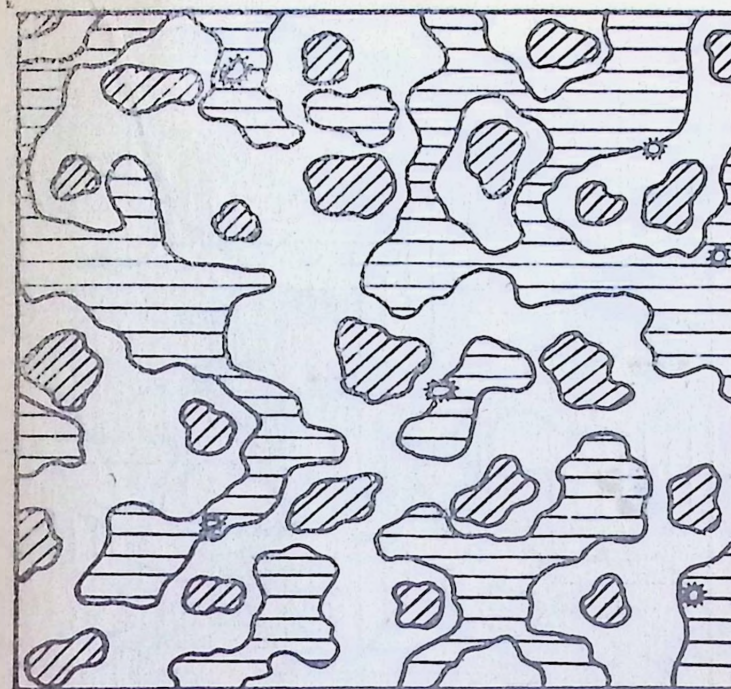
Наряду с представлениями о широтно-географической зональности классификационных единиц возможно выделить территориальные единицы почвенного покрова, так как диапазон их пространственной изменчивости на несколько порядков меньше изменчивости, возникающей под воздействием климатических условий. При характеристике ПК такого рода важное значение приобретают особенности заполнения почвенно-географического пространства классификационными единицами и специфика их чередования. Это связано с тем, что перечисление основных компонентов почвенного покрова, которыми в пределах территории Верхне-Сальской системы являются зональные каштановые, лугово-каштановые почвы и солонцы, не дает сведений о факторах их соотношения. Аналогичный недостаток имеет способ характеристики микрокомплексности посредством описания состава почвенного покрова, представляющий соотношение площадей, занимаемых отдельными индивидами: каштановые зональные почвы 45—50%, солонцы 35—40%, лугово-каштановые почвы 10—15%.

Почвы по уровню организации являются сложной системой, поэтому для их всесторонней региональной характеристики необходим анализ СПП [227]. СПП, как и параметры, являющиеся традиционными объектами почвенных исследований, требует изучения характера и механизма связи компонентов, особенностей геометрического строения образуемых ими узоров, факторов и процессов их возникновения и эволюции. Эти сведения имеют важнейшее практическое значение, поскольку являются основой рационального сельскохозяйственного использования земель.

Совокупность почв, развитых на рассматриваемой территории, формирующаяся на них растительность и строение сопряженной поверхности отражены соответственно: на почвенном, геоботаническом и топографическом планах ключевого участка № 1 (рис. 1—3). Сопоставление почв, растительности и микрорельефа показывает, что между ними прослеживается определенное взаимное соответствие. Это связано с тем, что почвы, входящие в состав рассматриваемой ПК, представляют собой результат воздействия факторов почвообразования, которым свойственна изменчивость интенсивности локального проявления. В частности, влияние микрорельефа сказывается на перераспределении влаги, растворимых веществ и тепла. Проявляется неоднородность почвообразующих пород, связанная с процессами их формирования и выветривания. Воздействует также пестрота растительного покрова и животного мира.

Интенсивность перераспределения влаги по микрорельефу определяет уровень контрастности ПК, его дифференцированность и вместе с тем степень интегрированности компонентов за счет взаимосвязи их генезиса. С учетом строения поверхности почвенная комбинация территории исследований во многом носит топографо-флювиальный характер. В этом заключается одна из важных причин чередования в пространстве образующих ПК ЭПА за счет формирования отчетливой генетической взаимосвязи между ними, что позволяет относить такую ПК к почвенным цепям. Вместе с тем ПК имеет элемент многофакторности. Развитие растительности находится под влиянием изменчивости почвенного покрова. Здесь непосредственная генетическая взаимосвязь ЭПА не проявляется и ПК отчасти приобретает характер сочетания фитогенного происхождения. В некоторых случаях образуется спорадическая пятнистость ЭПА за счет предельных структурных элементов (ПСЭ), площадь которых ограничена внутренней природой факторов, определяющих специфику свойств ПСЭ и занята, как правило, зоогенно-перерытыми почвами.

Сложность СПП изменяется согласно природно-климатической зональности. В условиях относительной сбалансиро-



0 10 20 30 м

Рис. 1. Почвенный план ключа 1: — солонец (Сп);

— каштановая почва (К);

— лугово-каштановая почва (К.л);

новая почва (К.л);



— почвы сурчи

ванности осадков и испарения (серые лесные почвы, выщелоченные черноземы) различные перераспределения влаги, являющиеся главной причиной сложности СПП, не оказывают на процессы почвообразования сильного влияния. Для сдвига баланса испарения и поступления необходимо перераспределение больших количеств влаги. При высокой аридности климата зональные почвы приобретают значительную солонцеватость и солончаковатость, что способствует снижению контрастности почвенного покрова. Только в условиях

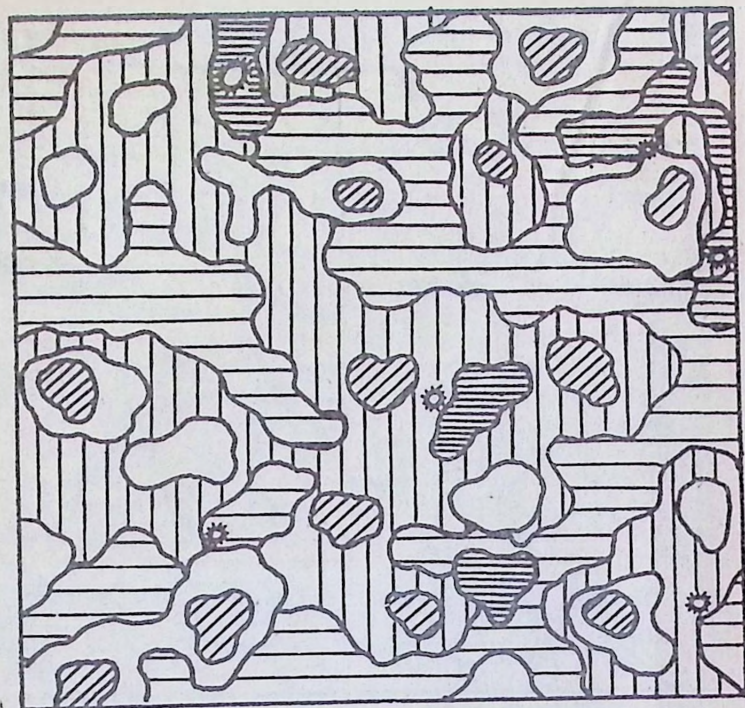


Рис. 2. Геоботанический план ключа 1:

- | | | | |
|--|---|---|---|
| — разнотравно-пырейно-типчаковая растительность; |  | — разнотравно-ковыльно-типчаковая растительность; |  |
| — ковыльно-типчаковая растительность; |  | — ромашниково-типчаковая растительность; |  |
| — типчаково-белопопынно-ромашниковая растительность; |  | — растительность сурчин | |

сухой степи незначительное увлажнение положительных элементов поверхности в сочетании со значительным промачива-

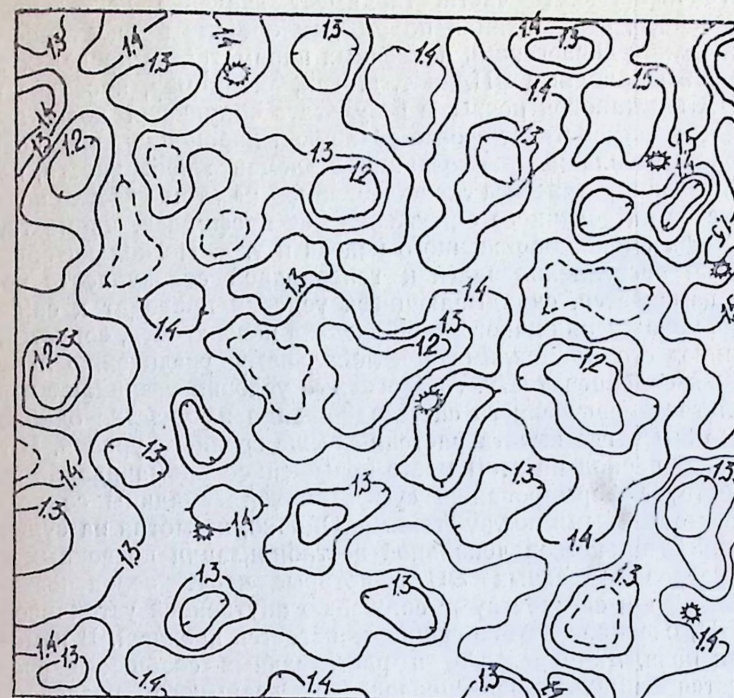


Рис. 3. Топографический план ключа 1

нием отрицательных форм за счет стока с прилегающей поверхности является важной причиной формирования свойственной региону высококонтрастной ПК и интенсивной дифференциации сопряженной с ней растительности [144, 229].

Очертания и формы ЭПА, элементов микрорельефа, ценозов достаточно изменчивы. Только ЭПА лугово-каштановых почв, микропонижения, ценозы влаголюбивой растительности и растительности сурчин близки к окружностям или, во всяком случае, представляют собой образования компактного очертания. Остальные компоненты, как правило, имеют извилистые границы и неправильную форму.

Важным элементом характеристики почвенно-географического пространства сухой степи является эволюция СПП — ее формирование и последовательное превращение в историческом плане. Эволюция СПП во многом обусловлена ее устойчивостью. Рассматриваемая СПП отличается средней

устойчивостью. В частности, имеет значение деятельность землероев, свойственная природным объектам спонтанность локальной дивергенции почвенных параметров в пределах исходно однородных ЭПА и т. д. Так, например, просадка на ЭПА каштановой почвы в результате обрушения ходов землероев способствует формированию микропонижения, повышению увлажнения возникшего элемента поверхности, преобразованию генезиса локализованной на этом участке почвы за счет интенсивного опреснения ее профиля и, кроме того, ведет к смене сопряженного ценоза и т. д. Поскольку общий объем поступления влаги к генеральной совокупности почв не изменяется, складывающиеся условия приводят к снижению увлажнения какого-либо участка поверхности, «опустыниванию» его микроклимата и локальному увеличению проявления солонцеватости. Аналогичные условия возникают в результате повышенного снегозадержания на участке однородного ЭПА, где высота растений выше среднего уровня. В весенний период на этом месте повышенное промачивание способствует формированию суффозионной западины со всеми рассмотренными последствиями. Однако, несмотря на существование процессов локальной дестабилизации почвенных параметров отдельных ЭПА, которые носят вероятностный характер и способствуют снижению внутренней устойчивости СПП, очевидно, что ее сущность остается прежней. В изменении почв, микрорельефа и растительных сообществ проявляется лишь перераспределение взаимного воздействия устойчивой генеральной совокупности параметров почвообразовательного процесса.

В то же время внешняя устойчивость рассматриваемой СПП высокая. Об этом свидетельствуют результаты исследований по окультуриванию солонцовых почв [98, 101, 129]. Так, прирост урожайности на солонцовых ЭПА, как правило, имеет подчиненное значение в сравнении с сохраняющейся и после мелнирации пестротой плодородия [96, 97, 110].

Согласно исследованиям В. М. Фридланда [207—229], в процессе эволюции любая СПП проходит этапы гомогенизации, гетерогенизации и стабилизации, темпы и продолжительность которых определяются складывающимися в конкретных условиях внешней и внутренней устойчивости этой СПП. Медленное изменение во времени является особенностью текущего сочетания геоморфологических, биоклиматических и структурно-формирующих факторов, воздействующих на ПК юго-востока Ростовской области. Следовательно, актуальная СПП этого района находится на этапе стабилизации. Специфика данного этапа заключается в том, что он фиксирует результат предшествующей гетерогенизации ПК при трансформации бескомплексной идеально равнинной поверх-

ности первичных солончаков, которые на самых ранних стадиях отличались зачаточными формами гетерогенности характера и степени засоленности только на уровне солевых профилей [15, 226].

Рост технических возможностей обуславливает решающее значение антропогенного фактора в современной эволюции СПП. При этом природная стабильность СПП часто сменяется набором разнообразных по интенсивности трансформации альтернатив ее преобразования. Например, по данным А. А. Попова [195], орошение почв солонцовых комплексов Ергенинской возвышенности в условиях культуры риса приводит к формированию нового фактора взаимодействия между компонентами ПК, так как ЭПА, имеющие засоленный почвенный профиль, становятся источником диффузионного засоления ЭПА зональных каштановых почв. Агрофизические свойства последних существенно ухудшаются относительно природного уровня при исходной СПП в связи с проявлением содообразования и увеличением щелочности почвенных растворов.

Другой причиной трансформации актуальной СПП является поверхностная планировка в условиях сухой степи. Здесь, по данным К. П. Пака [177], первым фактором оказывается дифференциация биологической продуктивности почв из-за утраты плодородия расположенных на участках срезки солонцовых и солонцеватых ЭПА. Помимо этого прямого следствия, вторым фактором становится полное изменение режима поступления влаги к отдельным ЭПА, который, как известно [277], играет решающую роль в формировании СПП. Наконец, произвольность транспортирования грунта при выполнении планировки от участков срезки к участкам насыпи вносит неопределенность в пространственное распределение исходно приуроченных к конкретным ЭПА почвенных горизонтов. Реальная возможность размещения иллювиального или подсолонцового горизонта на месте лугово-каштановой почвы, а поверхностных слоев зональной каштановой почвы — на месте солонца значительно увеличивает вероятностный характер формирующейся СПП.

Очевидно, что в условиях Верхне-Сальской оросительно-обводнительной системы актуально искусственное формирование хозяйственно полезной гомогенной СПП, развитие которой естественным образом маловероятно. Конструирование такой антропогенной СПП невозможно без мелнирации ЭПА, являющихся лимитирующим фактором интенсификации плодородия генеральной совокупности почв района наших исследований. Кроме того, необходимо выяснение актуальной СПП, ее характеристик и в особенности механизма взаимосвязи компонентов ПК, так как при мелнирации воздействие на

один из них влияет на другие. Проектирование мелиорации лишь одного компонента почвенного покрова может привести к нежелательным и непредсказуемым изменениям СПП в последствии [277].

Для теоретического обоснования приемов интенсификации мелиоративного процесса необходимы данные о генетических особенностях ЭПА различных типов почв сложного комплексного покрова. В связи с этим ниже приводятся данные об ЭПА солонцов, каштановых и лугово-каштановых почв.

Сложившаяся система генетических связей между почвами, развившимися на юго-востоке области, способствует интенсивному изменению параметров в зонах контакта отдельных компонентов почвенного покрова. Поэтому представленные ЭПА характеризуются глубокими различиями свойств.

В распространении солонцов на юго-востоке Ростовской области наблюдается географическая закономерность: на западе суммарная площадь солонцовых ЭПА составляет 5—10%, а на востоке — до 70%.

В районе исследований солонцы занимают 30—45% площади, их ЭПА имеют отчетливо распознаваемые границы и сложную конфигурацию. Статистическая оценка свидетельствует, что площадь солонцовых ЭПА составляет $(114 \pm 7) \text{ м}^2$ ($n = 60$). Как правило, они соприкасаются с достаточно обширными ЭПА зональных почв, однако встречаются варианты, когда солонцовый ЭПА находится в непосредственной близости от лугово-каштанового ЭПА и отделяется от последнего только узкой полоской каштановой почвы.

Генезис солонцов является наиболее сложной проблемой теоретического почвоведения. К настоящему времени сложился определенный взгляд на генезис и мелиорацию солонцов с высоким содержанием поглощенного натрия [236, 244]), базирующийся на классическом труде К. К. Гедройца [64], который показал, что неблагоприятные свойства таких солонцов связаны со значительным количеством натрия в почвенном поглощающем комплексе (ППК).

В последнее время появились сведения о почвах с четко выраженной физической солонцеватостью при незначительном содержании поглощенного натрия и повышенном количестве поглощенного магния в иллювиальном горизонте. Ареалы распространения малонатриевых солонцов очень разнообразны: Северный Казахстан, Западная Сибирь, Поволжье, Северный Кавказ. В пределах Доно-Сало-Маньчжурского водораздела Ергенинской возвышенности, где располагается район наших исследований, такие солонцы занимают общую площадь около 600 тыс. га [204].

Поглощающий комплекс этих солонцов содержит 40—50%

обменного кальция, 35—55% обменного магния и 10—20% обменного натрия от суммы поглощенных катионов.

Солонцы состоят из средних (60%) глубоких (10%), мелких (30%) разновидностей. Особое значение приобретает вариационная оценка важнейших генетических показателей этих почв, поскольку их пространственное изменение является объективной закономерностью, детерминированной микронеоднородностью условий почвообразования, материнских пород, рельефа, гидрогеологии, климата, растительности и т. д.

Варьирование характеризует известные статистические показатели: лимиты ($\lim$), граница типичности ($V_{г. \text{тип}}$), на которые приходится 50% совокупности, среднее квадратическое отклонение (σ) и коэффициент вариации (V). Методами математической статистики [81—84] нами обработаны данные о содержании и количественном составе гумуса, поглощенных катионов, количестве легкорастворимых солей, карбонатов, физической глины, плотности, скважности, влажности завядания, полевой влагоемкости, водопроницаемости, а также основные морфологические характеристики солонцов, ЭПА которых представлены на территории Верхне-Сальской оросительно-обводнительной системы (табл. 1).

Механический состав солонцов — тяжелосуглинистый или легкосуглинистый. Относительно более легким механическим составом отличаются мелкие солонцы (табл. 1). В целом солонцы характеризуются незначительной величиной варьирования содержания физической глины, что свидетельствует о высокой устойчивости этого показателя. Наблюдается прирост содержания частиц физической глины в гор. В₁ на 50—100% по сравнению с гор. А, из которого выносятся коллоидно-дисперсные частицы. Перераспределение высокодисперсных фракций по почвенному профилю связано с отмеченным выше процессом пептизации агрегатов и диспергированием органических веществ при увеличении содержания обменного натрия свыше 8—10% емкости поглощения, которые в виде илистых частиц выносятся из верхнего перегнойно-элювиального горизонта.

Плотность солонцов изменяется по профилю от 1,29—1,33 (гор. А) до 1,64—1,69 г/см³ (гор. С). Этот показатель устойчив, во всех случаях не превышает 10%. Аналогичная статистическая особенность и у другого показателя скважности ($V < 10\%$), которая в рассматриваемых почвах незначительна, особенно в пределах обогащенных коллоидами иллювиальных горизонтов.

Дифференциальная порозность [155] имеет следующий характер: объем капиллярных пор в верхнем горизонте составляет 60—65% общей скважности и резко уменьшается в гор. В₁ и В₂ — до 8—12%; максимум объема неактивных пор, за-

Таблица 1

Статистическая характеристика морфологических признаков солонцов зоны каштановых почв сухой степи

Статистическая характеристика

Показатель	Глубокие					Средние					Мелкие				
	п	М	σ	V _{г. тип}	V, %	п	М	σ	V _{г. тип}	V, %	п	М	σ	V _{г. тип}	V, %
Солонцы автоморфные															
Мощность гор. А	30	19,0	1,7	17—21	9	24	11,9	1,2	11—13	10	19	6,4	2,0	4—11	31
Мощность гор. В ₁	30	17,1	2,2	15—19	13	23	18,7	2,6	16—20	14	19	15,8	2,7	12—19	17
Верхняя граница															
вскипания . . .	28	39,2	4,8	36—44	11	23	30,7	2,8	29—33	9	19	24,9	2,5	22—27	10
Белоглазка . . .	28	50,1	7,0	35—56	14	19	41,8	5,5	37—45	13	17	30,6	4,2	28—33	14
Верхняя граница															
глина и легкорастворимых солей	28	48,4	7,7	43—54	16	19	47,1	8,5	41—53	18	17	33,4	8,3	26—39	25
Солонцы ирригационно-полугидроморфные															
Мощность гор. А	38	20,1	2,0	18—22	10	21	13,2	1,4	11—15	11	23	7,3	2,6	5—12	36
Мощность гор. В ₁	36	18,0	2,5	15—21	14	21	17,8	2,9	14—22	16	23	14,9	3,4	11—19	23
Верхняя граница															
вскипания . . .	36	42,9	4,3	37—48	10	21	34,5	3,1	31—37	9	23	23,7	2,9	21—25	12
Белоглазка . . .	36	53,1	10,6	46—60	19	17	41,9	6,7	34—48	16	23	30,0	5,7	23—36	19
Верхняя граница															
глина и легкорастворимых солей	33	47,0	8,0	42—52	17	17	44,2	7,9	38—51	18	23	34,2	10,2	24—44	30

нятых рыхло- и прочносвязанной водой, располагается в солонцовом горизонте; в этих же горизонтах объем пор, занятых воздухом при капиллярном насыщении водой, как правило, неудовлетворительный (4—12% объема почвы).

Вследствие незначительной порозности у солонцов относительная низкая влагоемкость, особенно в карбонатно-солевом горизонте. Иллювиальные горизонты отличаются высокими значениями влажности завядания растений, поэтому на солонцовых ЭПА диапазон активной влаги резко снижен. Водопроницаемость на этих ЭПА неудовлетворительная, причем в иллювиальных гор. В₁ и В₂ она почти в два раза ниже, чем в перегнойно-элювиальном. Наименьшими значениями водопроницаемости отличаются иллювиальные горизонты мелких солонцов. Водопроницаемость является важным диагностическим признаком солонцов района исследований, поскольку из всех рассмотренных генетических показателей у нее наименьшая степень варьирования (3—9%).

В солонцах содержится мало гумуса, причем его количество несколько больше в полугидроморфных видах.

Сумма поглощенных катионов в гор. А ниже, чем в гор. В₁. Особенностью состава поглощенных катионов степных солонцов является незначительное содержание поглощенного натрия (табл. 2). В полугидроморфных солонцах (табл. 3) это значение несколько выше, чем в автоморфных, однако и то и другое может быть отнесено к малонатриевым. Количество поглощенного натрия в мелких солонцах больше, чем в глубоких.

Наличие на определенной глубине легкорастворимых солей — характерный признак солонцов. Подсолонцовый, обычно засоленный горизонт служит постоянным резервом натрия, обеспечивая относительную устойчивость солонца в природе и возможность реставрации солонцовых свойств [92, 225, 237].

В почвенном профиле солонцов района исследований (табл. 4) выделяются две зоны. Первая, в зависимости от мощности перегнойно-аккумулятивного горизонта, распространяется до глубины 40—80 см и характеризуется сульфатно-хлоридным, кальциево-натриевым типом химизма засоления. Вторая — располагается глубже. Этой зоне свойствен хлоридно-сульфатный, натриево-кальциевый тип засоления. Такая специфика засоления почвенного профиля наблюдается у степных и полугидроморфных солонцов.

В комплексе с солонцами находятся зональные каштановые почвы. Каштановые почвы входят в Донскую сухостепную провинцию темно-каштановых и каштановых почв [131]. В западной части провинции, где она граничит с зоной черноземов, преобладают более мощные и гумусные темно-кашта-

Физико-химическая характ

Показатель	Горизонт	Глубокие				
		п	М	σ	V _{г. тип}	V, %
Гумус, %	A	14	2,88	0,32	2,5—3,0	11
	B ₁	14	2,14	0,49	1,8—2,6	23
	B ₂	12	1,35	0,51	1,0—1,8	38
Сумма поглощенных катионов, мг-экв/100 г	A	19	19,2	1,3	17—20	7
	B ₁	19	31,3	1,6	30—33	5
	B ₂	17	26,0	3,0	24—29	13
Na, % от суммы поглощенных катионов	A	22	12,1	1,7	10—14	14
	B ₁	22	15,1	2,4	13—17	16
	B ₂	26	12,6	2,4	10—15	19
Сухой остаток, %	A	15	0,08	0,03	0,06—0,10	29
	B ₁	15	0,15	0,35	0,12—0,18	23
	B ₂	20	0,24	0,07	0,19—0,28	27
	C ₁	22	0,73	0,14	0,57—0,90	19
Физическая глина, %	A	20	41,2	2,1	39—43	5
	B ₁	20	60,0	2,4	57—62	4
	B ₂	20	57,1	2,8	55—60	5
	C ₁	24	46,3	3,7	44—49	8
Плотность, г/см ³	A	12	1,29	0,08	1,22—1,34	6
	B ₁	17	1,50	0,11	1,4—1,6	7
	B ₂	14	1,61	0,15	1,5—1,7	9
	C ₁	17	1,64	0,19	1,5—1,8	12
Скважность, %	A	12	48,7	2,9	47—51	6
	B ₁	9	41,0	3,3	39—44	8
	B ₂	9	40,1	3,7	37—43	9
	C ₁	10	36,5	4,4	32—40	12
Влажность завядания, %	A	8	6,9	0,3	6,5—7,3	5
	B ₁	8	16,1	0,7	15—17	4
	B ₂	8	15,0	0,5	14—16	3
	C	10	12,3	0,5	11—13	4
Полевая влагоемкость, %	A	10	23,1	1,4	22—25	6
	B ₁	10	25,3	2,1	24—27	8
	B ₂	8	22,8	2,7	21—25	12
	C	11	19,1	1,5	18—20	6
Водопроницаемость, мм за 6 ч	A	6	108	7	100—115	6
	B ₁	6	66	2	60—70	3
	B ₂	6	59	3	54—63	6
	C	6	83	6	76—89	7

еристика степных солонцов

Средние					Мелкие				
п	М	σ	V _{г. тип}	V, %	п	М	σ	V _{г. тип}	V, %
23	2,35	0,35	2,1—3,0	15	18	2,16	0,37	1,8—2,6	17
23	1,80	0,33	1,6—2,0	18	18	1,70	0,41	1,5—2,0	24
18	1,04	0,30	0,9—1,2	29	20	0,52	0,20	0,3—0,7	39
22	16,9	1,7	14—18	10	16	13,0	1,2	12—14	9
22	32,8	3,4	31—36	11	16	36,4	4,4	33—40	12
24	27,1	4,3	24—30	16	14	30,7	7,7	25—36	25
18	13,5	1,6	12—15	12	25	15,4	2,3	13—17	15
18	17,3	2,6	16—19	15	25	24,2	4,2	21—26	16
18	14,0	3,4	12—16	24	14	20,9	5,9	17—25	28
21	0,13	0,03	0,1—0,2	26	18	0,20	0,03	0,17—0,24	14
22	0,16	0,04	0,1—0,2	25	18	0,44	0,07	0,37—0,52	16
16	0,37	0,11	0,2—0,5	29	21	1,03	0,14	0,91—1,20	13
25	1,0	0,18	0,8—1,2	18	25	1,72	0,19	1,6—1,8	11
24	26,2	2,2	34—38	6	15	28,4	2,3	26—30	8
24	62,7	4,4	57—66	7	18	54,9	2,7	52—57	5
24	57,8	4,1	54—61	7	20	55,8	4,8	52—60	9
24	44,3	5,3	40—49	12	18	40,1	7,3	33—40	18
15	1,33	0,07	1,3—1,4	5	18	1,33	0,13	1,2—1,4	10
17	1,53	0,15	1,4—1,7	10	24	1,61	0,13	1,5—1,7	8
20	1,61	0,13	1,5—1,7	8	27	1,68	0,12	1,6—1,8	7
20	1,68	0,14	1,6—1,8	8	23	1,61	0,23	1,4—1,8	14
10	48,1	2,9	46—50	6	13	47,5	4,3	41—51	9
11	40,8	2,9	39—43	7	13	38,4	4,2	36—41	11
11	40,0	2,8	38—43	7	11	36,7	4,8	34—40	13
8	36,7	3,7	34—39	10	8	37,9	3,8	35—42	10
12	5,8	0,3	5—6	6	14	4,8	0,6	4—5	13
12	17,1	0,7	17—18	4	14	15,2	1,3	14—17	9
12	18,2	0,9	17—19	5	14	15,1	1,5	13—17	10
10	9,9	0,3	9,6—10,2	3	14	9,0	1,1	8—10	12
8	22,0	1,6	20—24	8	7	19,4	1,9	18—21	9
12	24,8	1,9	23—27	8	7	23,7	2,4	22—26	10
12	23,6	1,6	22—25	6	7	22,9	1,4	21—24	6
12	20,1	1,4	19—21	7	6	17,0	2,6	15—19	16
9	123	3	120—125	2	8	136	3	133—139	2
9	58	2	56—59	3	8	49	2	45—52	4
10	61	4	58—65	6	8	44	3	40—47	7
10	98	8	92—103	8	8	105	3	96—112	9

Физико-химическая характеристика ирригационно-

полугидроморфных солонцов

Показатель	Гори- зонт	Глубокие				
		п	М	σ	V _{г. тип}	V, %
Гумус, %	A	16	3,54	0,44	3,2—3,8	13
	B ₁	16	2,60	0,55	2,2—3,0	29
	B ₂	16	1,52	0,55	1,4—2,3	36
Сумма поглощенных катио- нов, мг-экв/100 г	A	24	23,8	0,9	21—26	4
	B ₁	24	34,3	2,1	31—37	6
	B ₂	17	29,9	3,6	24—34	12
Na, % от суммы поглощен- ных катионов	A	14	16,4	2,1	15—18	13
	B ₁	18	18,8	3,6	16—21	19
	B ₂	18	15,3	3,1	13—18	20
Сухой остаток, %	A	14	0,12	0,04	0,09—0,16	33
	B ₁	14	0,19	0,05	0,14—0,21	25
	B ₂	12	0,31	0,10	0,24—0,37	29
	C ₁	12	0,70	0,14	0,5—0,9	21
Физическая глина, % . . .	A	24	49,3	1,4	48—50	3
	B ₁	20	65,7	3,9	62—68	6
	B ₂	19	58,0	5,4	53—62	9
	C ₁	19	48,0	3,0	46—50	6
Плотность, г/см ³	A	9	1,33	0,14	1,30—1,41	8
	B ₁	12	1,62	0,18	1,5—1,77	7
	B ₂	13	1,66	0,18	1,5—1,7	10
	C ₁	13	1,68	0,17	1,5—1,8	14
Скважность, %	A	15	44,5	3,1	42—47	7
	B ₁	14	39,0	3,9	36—43	10
	B ₂	14	38,6	3,1	37—40	13
	C ₁	14	35,2	3,9	33—37	11
Влажность завядания, %	A	11	8,1	0,6	7,5—8,6	8
	B ₁	11	17,9	1,1	16—19	6
	B ₂	10	15,7	0,8	14—17	5
	C	10	13,2	1,1	12—15	8
Полевая влагоемкость, %	A	8	25,3	2,1	23—27	8
	B ₁	12	27,9	2,7	26—29	9
	B ₂	12	24,5	3,7	22—27	15
	C	12	19,8	2,1	18—21	11
Водопроницаемость, мм за 6 ч	A	9	101	7	95—110	7
	B ₁	11	54	2	50—60	4
	B ₂	9	48	3	44—53	6
	C	8	72	6	66—80	8

Средние					Мелкие				
п	М	σ	V _{г. тип}	V, %	п	М	σ	V _{г. тип}	V, %
15	3,27	0,49	2,9—3,6	16	19	2,76	0,41	2,5—3,0	16
14	2,69	0,55	2,3—3,0	23	15	2,29	0,61	1,8—2,6	28
12	1,30	0,43	0,9—1,6	33	16	0,92	0,40	0,5—1,5	48
23	20,2	1,9	18—22	9	21	16,0	1,6	14—18	10
26	35,8	3,7	33—39	10	22	38,4	5,4	33—42	14
26	30,6	5,2	26—34	17	24	32,1	9,1	26—39	28
19	16,9	2,0	15—18	12	20	18,4	3,3	15—20	18
19	19,8	2,8	18—22	14	18	25,8	4,6	23—29	18
15	16,1	3,9	13—19	24	20	21,0	5,0	17—24	24
20	0,13	0,03	0,1—0,2	24	13	0,36	0,05	0,20—0,30	20
20	0,24	0,08	0,15—0,35	33	13	0,52	0,10	0,4—0,6	18
15	0,48	0,13	0,3—0,6	26	16	1,24	0,23	1,0—1,5	17
18	1,07	0,25	0,8—1,3	23	16	1,65	0,20	1,5—1,8	13
17	42,1	2,9	39—44	7	21	31,3	3,1	28—33	10
16	66,3	4,1	63—70	7	19	59,1	2,9	57—60	5
16	57,1	4,6	54—60	8	16	54,1	2,9	52—56	6
20	45,4	5,9	41—50	13	12	40,5	8,1	34—46	21
12	1,38	0,13	1,3—1,45	9	22	1,35	0,18	1,2—1,5	13
14	1,56	0,16	1,5—1,8	8	20	1,70	0,17	1,5—1,8	10
14	1,63	0,16	1,5—1,7	10	20	1,69	0,15	1,6—1,8	8
10	1,69	0,18	1,6—1,8	11	20	1,60	0,26	1,4—1,8	18
16	43,9	2,2	42—45	5	15	44,1	3,5	42—47	8
16	39,2	3,1	37—40	8	15	37,3	4,5	33—40	12
13	39,1	4,7	36—41	12	14	36,2	4,7	33—39	13
13	34,8	4,3	32—37	13	12	36,8	4,8	34—40	13
14	6,3	0,6	5—7	8	10	5,9	0,6	5—7	14
14	18,2	1,0	17—19	6	15	16,4	1,9	14—18	12
13	17,6	0,8	17—18	5	15	16,9	1,4	16—18	8
14	11,4	0,9	10—12	8	13	10,8	1,7	9—12	16
13	22,8	1,4	21—24	6	14	21,9	2,2	20—24	10
12	26,7	1,8	25—28	6	12	24,9	2,9	23—27	13
12	24,0	2,1	22—26	8	14	23,3	2,2	22—25	9
10	20,0	1,4	19—21	7	17	18,7	2,1	17—20	12
11	112	5	108—116	4	7	121	3	118—124	2
11	50	2	45—54	4	7	50	2	48—53	3
11	55	2	51—58	3	9	42	2	40—44	3
11	84	3	80—89	4	9	100	5	95—106	5

новые почвы, которые по мере продвижения на восток сменяются светло-каштановыми.

В районе наших исследований представлены каштановые почвы, занимающие около 45% площади. Границы ЭПА распознаются отчетливо. Представлены обширные ЭПА компактной формы и ареалы значительного протяжения, образующие сложные переплетения с ЭПА другого вида. Кроме того, встречаются ЭПА концентрической конфигурации. Согласно данным статистической обработки, площадь ЭПА каштановых почв составляет $(176 \pm 14) \text{ м}^2$ ($n = 50$).

Таблица 4

Состав водных вытяжек из солонцов, мг-экв/100 г

Номер разреза	Глубина взятия образца, см	Сухой остаток, %	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ (по разности)
Солонец средний степной									
14	0—15	0,096	Нет	0,65	0,32	0,15	0,26	0,38	0,38
	15—30	0,239	—	0,94	1,37	0,71	0,49	0,61	1,95
	40—60	0,671	—	1,70	5,70	2,88	3,61	1,95	4,72
	60—80	0,964	—	1,91	7,82	3,99	5,04	3,66	5,01
	80—100	1,217	—	2,31	7,08	8,87	7,27	4,96	6,03
	140—160	1,474	—	1,95	6,81	12,74	8,16	5,94	7,39
	180—200	1,658	—	1,54	8,54	14,01	8,77	6,45	8,87
	240—260	1,299	—	1,21	5,89	11,90	7,00	5,06	6,94
Солонец средний ирригационно-полугидроморфный									
20	0—15	0,137	Нет	0,85	0,62	0,39	0,46	0,54	0,86
	15—30	0,298	—	1,28	2,61	0,64	0,57	0,77	2,59
	40—60	0,782	0,05	1,53	6,40	2,96	2,87	2,44	5,58
	60—80	1,295	Нет	1,97	10,93	5,08	3,29	4,07	10,61
	80—100	1,121	—	1,48	6,36	8,45	4,84	4,03	7,42
	140—160	1,826	—	1,29	8,91	16,68	8,42	6,37	12,09
	180—200	1,345	—	1,35	6,76	12,64	7,96	4,88	7,91
	240—260	1,239	—	1,14	4,98	12,83	7,00	5,93	5,92

Специфической региональной чертой зоны является солонцеватость каштановых почв, которая возрастает при усилении засушливости климата. В пределах района исследований у этих почв небольшая мощность и светлая окраска перегнойных горизонтов, повышенная линия вскипания и незначительная глубина залегания карбонатных и сульфатных новообразований. Проявление солонцеватости увеличивает плотность и трещиноватость иллювиальных горизонтов. Поэтому водно-физические свойства каштановых почв недостаточно благоприятны.

Статистическая характеристика некоторых свойств каштановых почв приведена в табл. 5. Механический состав каштановых почв тесно связан с характером почвообразующих пород — лессовидных суглинков. При тяжелосуглинном и легкоглинистом мехсоставе отдельные ЭПА различаются по содержанию ила и физической глины ($<0,01 \text{ мм}$) и характеризуются значительным количеством лессовидной фракции ($0,05—0,01 \text{ мм}$), которое составляет в среднем 35—40% [155, 177].

Увеличение содержания поглощенного натрия в профиле солонцеватых каштановых почв усиливает перераспределение илстой фракции, которая накапливается в иллювиальном гор. В. Последний приобретает более темную окраску. Содержание илстой фракции в этом горизонте на 8—14% больше, чем в перегнойно-аккумулятивном.

Если степень солонцеватости повышается, то снижаются молекулярные отношения $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 = 7—8$ (табл. 5). Минералогический состав характеризуется увеличением вниз по профилю количества монтмориллонита в смешанослойном слюдо-монтмориллонитовом образовании, о чем свидетельствует соотношение $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 = 2,81—3,24$ в илстой фракции.

Каштановые почвы отличаются от черноземов и темно-каштановых почв меньшей емкостью поглощения (24—32 мг-экв/100 г, табл. 5). В гор. В она увеличивается, так как этот горизонт обогащен почвенными коллоидами. В составе поглощенных катионов преобладает кальций, однако с увеличением солонцеватости повышается содержание не только натрия, но и магния.

Реакция почв слабощелочная — pH 7,6—8,1, она несколько повышается с глубиной.

В пахотных горизонтах каштановых почв содержится 3,1—4,0% гумуса, в гор. В — 2,4—3,0%. По групповому составу гумус каштановых почв отличается от гумуса чернозема более значительным содержанием фульвокислот ($C_f : C_{\text{ф}} = 1,1—1,5$).

Каштановые почвы характеризуются максимумом объемной массы в уплотненном гор. В. Общая порозность в верхнем слое — 46—50%, однако в нижних горизонтах заметно снижается. Объем капиллярных пор в пахотном горизонте составляет 37—58% общей скважности, а в гор. В — 26—33%. В нижнем горизонте по сравнению с верхним значительно увеличивается количество пор, занятых рыхло- и прочносвязанной водой (до 25—32%).

Объем пор, занимаемых воздухом при капиллярном насыщении почвы водой, более 20% общей скважности, однако в солонцеватых почвах он в значительной степени представлен трещинами. Полевая влагоемкость в гор. А — 26—32%,

Таблица 5
Физико-химическая характеристика каштановых почв

Показатель	Горизонт	n	M	D	V _г , тип	V, %
1	2	3	4	5	6	7
Гумус, %	A	12	3,72	0,45	3,4—4,0	12
	B ₁	12	2,80	0,50	2,4—3,0	18
	B ₂	11	1,62	0,45	1,2—2,0	18
Сумма поглощенных катионов, мг-экв/100 г почвы	A	15	25,9	1,6	24—27	6
	B ₁	18	29,7	2,4	27—32	8
	B ₂	18	28,4	4,2	24—32	15
Na, % от суммы поглощенных катионов	A	14	4	0,7	3—6	14
	B ₁	14	7	1,3	5—9	18
	B ₂	13	10	2,2	7—12	22
C _г :C _ф	A	8	1,5	0,10	1,5—1,6	6
	B ₁	8	1,2	0,10	1,1—1,3	8
	B ₂	8	1,1	0,25	1,0—1,3	15
Физическая глина, %	A	10	46,2	4,1	43—49	8
	B ₁	14	55,4	2,3	53—57	4
	B ₂	14	56,1	4,1	53—59	7
	C ₁	12	52,7	2,6	51—54	5
Плотность, г/см ³	A	9	1,24	0,12	1,1—1,4	9
	B ₁	9	1,38	0,10	1,2—1,6	14
	B ₂	8	1,45	0,15	1,4—1,6	10
	C ₁	8	1,50	0,16	1,4—1,7	13
Скважность, %	A	11	50,3	4,1	47—52	7
	B ₁	10	46,4	3,9	44—49	8
	B ₂	8	43,3	2,7	42—45	6
	C ₁	7	39,1	4,4	36—93	14
Влажность завядания, %	A	10	6,6	0,4	6,3—7,0	6
	B ₁	9	11,4	0,9	11—13	8
	B ₂	9	12,0	0,9	11—13	7
	C ₁	9	9,3	1,1	8—10	12
	C ₂	6	28,2	2,0	26—32	6
Полевая влагоемкость, %	A	6	25,8	2,2	24—28	8
	B ₁	6	24,1	2,4	21—26	10
	B ₂	6	20,9	2,1	19—23	10
Водопроницаемость, мм за 6 ч	A	8	213	9,8	204—222	4
	B ₁	8	153	10,8	141—164	7
	B ₂	7	162	9,7	155—168	6
	C ₁	7	161	12,9	151—170	8
	A	14	7,83	0,6	7,6—8,0	9
	B ₁	14	6,74	0,9	6,5—7,0	14
	B ₂	12	7,26	1,3	7,0—7,6	18
	C ₁	12	6,03	0,9	6,7—7,2	13

в гор. В — 24—28% (табл. 5). Наибольший диапазон активной влаги в гор. А (19—26%), с глубиной он резко снижается.

Характер содержания и распределения легкорастворимых солей в профиле каштановых почв юго-востока Ростовской области — результат сложной геохимической истории занимаемой ими территории. До глубины 50—100 см сухой остаток составляет 0,06—0,12%. С этой глубины количество легкорастворимых солей заметно возрастает — до 0,3—0,7%. На глубинах более 120—160 см количество легкорастворимых солей достигает 0,8—1,7% и более. Для солонцеватых почв часто характерно повышенное количество хлоридов на глубинах 70—120 см, которые иногда преобладают в этих слоях над сульфатами [106].

В районе исследований важным компонентом комплексного почвенного покрова являются лугово-каштановые почвы, ЭПА которых имеют компактную форму и четко различимые границы приуроченности к блюдцеобразным понижениям, западинам и частично к потяжинам. Средняя площадь ЭПА (41±6) м² (n = 58). По мнению некоторых исследователей [31, 34, 207], термин лугово-каштановые почвы не соответствует их природе, поскольку они формируются не под влиянием грунтовых вод, а под воздействием повышенного поверхностного увлажнения в результате стока со смежных ЭПА. Существуют предпосылки формирования периодически промывного водного режима лугово-каштановых ЭПА не только в полугидроморфных условиях, но и в автоморфных, где они представлены достаточно широко.

ЭПА лугово-каштановых почв отличаются от смежных ЭПА каштановых почв большей мощностью перегнойно-аккумулятивных горизонтов (гор. А + гор. В = 65—100 см). В перегнойном горизонте содержится 4—5% гумуса, причем его количество вниз по профилю убывает значительно медленнее, чем в каштановых почвах. Морфологические признаки ЭПА формируются вместе с изменчивостью поступления влаги к отдельным западинам и поэтому отличаются разнообразием. Линия вскипания располагается на глубине 41—85 см, видимые карбонаты, чаще всего представленные распычатой редкой белоглазкой, встречаются на глубине 60 см и глубже, сульфаты, как правило, находятся на глубине более 1,3—1,5 м, но иногда не обнаруживаются и в пределах двухметровой толщи [155].

Встречаются солонцеватые разности, однако преобладающими являются лугово-каштановые почвы, у которых сохраняется лишь незначительное реликтовое скопление илестых частиц в относительно несколько уплотненных горизонтах. Наличие слабо выраженных морфологических признаков солон-

цового профиля свидетельствует о развитии лугово-каштановых западин из солонцовых почв.

Лугово-каштановые почвы имеют тяжелосуглинистый и легкосуглинистый мехсостав и содержат до 50—70% физической глины. Скважность верхних горизонтов — 50—55%, однако с глубиной она заметно снижается [116, 177].

Емкость поглощения составляет 30—35 мг-экв/100 г. В составе поглощенных катионов существенно преобладает кальций, причем соотношение кальция к магнию 4 : 6.

Солевой профиль лугово-каштановых почв отличается промывистостью от легкорастворимых солей. Сухой остаток в метровом слое редко превышает 0,08%, тип засоления гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный. Солевые аккумуляции отмечаются глубже 150—200 см от поверхности и имеют сульфатный, реже хлоридно-сульфатный химизм [34, 35].

1.2. Горизонтально-боковое движение влаги и солей в условиях комплексности почвенного покрова — важнейший фактор снижения мелиоративного эффекта

Солонцы являются одним из самых сложных объектов почвенных мелиораций. Это связано не только с их природными особенностями, генезисом и условиями современного существования, но и определяется причинами, способствующими устойчивости комплекса неблагоприятных агрофизических свойств в длительном последствии мелиоративного процесса.

Отмеченные в ряде публикаций факты отсутствия или существенного снижения в последствии мелиоративного эффекта [95, 98, 146] свидетельствуют об определенном несовершенстве современных теоретических предпосылок генезиса и эволюции солонцовых почв.

Используемые в настоящее время приемы мелиоративного воздействия базируются только на учете параметров конкретного почвенного профиля. Разрабатываемый комплекс мероприятий направлен на оптимизацию водно-физических и физико-химических характеристик лишь так называемой «типичной» почвенной разности, свойства которой осредняются в рамках обширного геоморфологического элемента. В некоторых случаях такая интеграция изменчивых в пространстве почвенных индивидуумов полезна, чтобы получить предварительную информацию о почвенно-географической структуре (ПГС). Однако в условиях комплексного почвенного покрова она является грубой схематизацией реальных закономерностей. Это связано с тем, что при существующем способе изолированного рассмотрения дискретных почвенных разностей искусственно разрывается система генетических взаимо-

связей между отдельными ЭПА в пределах определенного почвенно-географического пространства. Подобная формализация функций конкретной почвенной комбинации правомерна при отсутствии взаимной координации ее элементов в горизонтальном направлении [134, 135, 227].

Почва представляет собой сложную открытую систему, находящуюся в постоянном массо- и энергообмене с окружающей средой, поскольку она является компонентом структурной единицы биосферы-биогеоценоза [184]. Следовательно, чем сильнее взаимное влияние смежных ЭПА, тем больше несоответствие между разработанной на основе традиционных взглядов моделью ПГС и существующей почвенной комбинацией. Наблюдаемая неадекватность теоретических представлений реальным закономерностям солонцового процесса влияет на эффективность мелиоративных мероприятий, которые разрабатываются на основании неполной модели почвенного покрова сухой степи.

Для получения достоверной информации об особенностях пространственного размещения ЭПА, факторах формирования и способах стабилизации их свойств нами проведен модельный опыт, имитирующий комплекс условий почвообразования, характерный для сухой степи. С этой целью в почвенном канале ДонСХИ были оборудованы три секции, размерами в плане 3×3 м и высотой 1,8 м. В секции поместили слой каштановой почвы с искусственно засоленным слоем мощностью 80—180 см (сухой остаток 1,5%).

Тип засоления в каждой секции различный: хлоридный, сульфатный, хлоридно-сульфатный, магниевое-натриевый. Верхний относительно опресненный слой 0—80 см содержал 0,12—0,26% легкорастворимых солей. Искусственно сформирован свойственный сухостепной зоне плоскозападинный микрорельеф с разностью превышений, равной 10 см. Увлажнение проводили восемью поливами общей нормой 430 мм, причем имитирована высокая интенсивность выпадения осадков, характерная для сухостепной зоны каштановых почв. Это в сочетании с низкой водопроницаемостью обусловило мало отличающийся от естественных условий гидрологический режим. Температура на поверхности почвы составляла 29—31°C и поддерживалась при помощи ламп накаливания рассредоточенных равномерно на высоте 0,5 м. На дно каждой секции был заложен гравийный дренаж.

Интенсивное перераспределение влаги между элементами микрорельефа обусловило существенную пространственную дифференциацию промачивания. Так, увлажнение повышенный отмечалось лишь до глубины 20—30 см, а слой промачивания составлял 140—160 см. На промежуточных по высоте позициях это значение примерно соответствовало норме полива

60—70 см (табл. 6). В подобных условиях анализ процессов миграции влаги с использованием известных представлений о влагопереносе по почвенному профилю недостаточен. Так, согласно данным С. И. Долгова [87], А. А. Роде [206, 208, 209], интенсивное увлажнение почв микропонижений при комплексности почвенного покрова приводит к образованию гравитационной и подвешенной влаги, причем последняя имеет свойство растекаться во всех направлениях. Приобретает значение термодинамическая оценка влагообмена между элементами объема почвенного слоя солонцового комплекса.

Согласно [5, 55, 218, 238, 241, 248, 253], влага передвигается к областям с низкой удельной свободной энергией, которая в результате переноса увеличивается в связи с «насыщением» сорбционной емкости вмещающего тела. Процесс происходит до выравнивания энергией, однако в почвах он носит квазистационарный характер.

Таким образом, важной движущей силой влагообмена в почвенном слое является термодинамический потенциал почвенной влаги, причем его влияние прослеживается в широком диапазоне значений влажности при полном насыщении и в ненасыщенной почве [160, 165, 171, 172, 186, 250] (табл. 6).

Таблица 6

Влажность почв по элементам искусственного микрорельефа, % от массы абсолютно сухой почвы, через 2 сут после увлажнения

Глубина взятия образца, см	Элемент микрорельефа		
	Повышение	Промежуточная позиция	Понижение
0—20	20,0±1,8	23,8±2,6	23,3±1,9
20—40	21,6±1,5	24,9±2,9	25,4±2,3
40—60	15,9±1,2	22,7±1,5	14,1±2,0
60—80	14,8±0,8	19,6±1,7	21,4±1,2
80—100	14,1±1,3	16,5±1,2	19,3±1,4
100—120	13,3±1,1	15,0±1,8	18,2±1,1
120—140	13,9±1,4	14,2±1,4	16,7±1,6
140—160	13,7±1,0	14,5±1,2	15,8±1,4

С учетом известных допущений о характере зависимости между содержанием влаги и ее потенциалом [43, 218, 247, 249, 250] принято уравнение экспоненциального вида, коэффициенты которого подобраны соответственно особенностям физических, физико-химических свойств и характеру строения порового пространства почв сухой степи:

$$W = A - \ln P/B, \quad (1)$$

где W — влажность, % объема почвы,

A, B — коэффициенты уравнения, зависящие от физи-

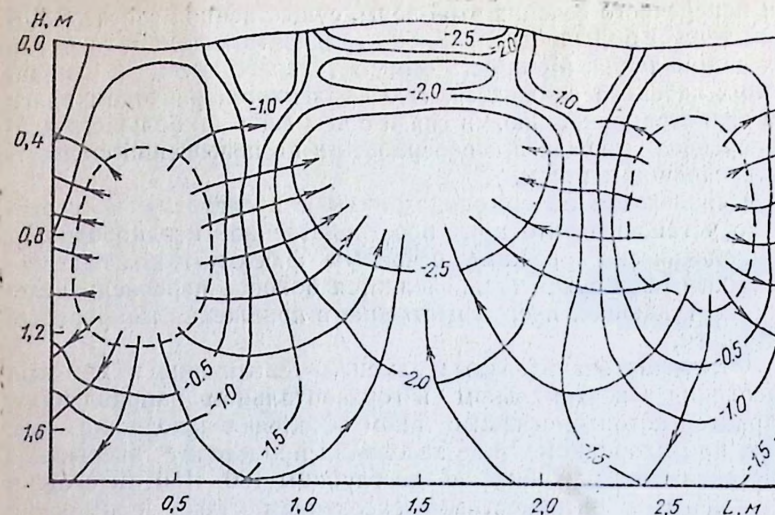


Рис. 4. Эквипотенциали почвенной влаги (2 сут после полива, давление; линии со стрелкой — гидравлические линии тока)

ческих, физико-химических параметров и строения порового пространства почвы,

P — потенциал почвенной влаги.

По уравнению (1) рассчитываем значения термодинамического потенциала почвенной влаги в индивидуальных объемах микропрофиля «понижение — переходная позиция — повышение». Установлено, что особенности гидрологического режима определяют динамику процессов влагопереноса, причем значение термодинамического потенциала влаги в почве отличается значительной изменчивостью во всех направлениях.

Это обусловило характерный вид эквипотенциалей влажности (рис. 4), которые в почвах понижений, как правило, имеют форму параболы с отрицательным экстремумом, под промежуточными элементами микрорельефа наклонены под углом 75—100° к горизонтали, а на повышении выполняются и частично выходят на поверхность. В связи с этим перпендикулярные эквипотенциалам гидравлические линии тока у поверхности изрежены, а в слоях глубже 120 см удлинены из-за явной кривизны. Таким образом, вклад верхней и нижней зон в общий влагоперенос незначительный. Линии тока, направленные из толщи 60—120 см почвы понижения к слою 40—70 см повышения, выполняют основной влагообмен между указанными элементами микрорельефа. Интенсивность влагообмена обусловлена немалыми размерами площа-

ди поперечного сечения этой зоны, существенной густотой линий тока и большой величиной градиента потенциала вдоль их направления. Мощность горизонтального потока в направлении переноса снижается. Это объясняется расходом влаги на эвапотранспирацию, в связи с чем зона наибольшего влагопереноса смещается к поверхности и на повышении сменяется восходящим током.

Использование термодинамических представлений позволило установить, что при пространственной неоднородности гидрологического режима основным фактором влагообеспеченности почв сухой степи является боковое перераспределение поступающей преимущественно в понижения микрорельефа влаги.

Отмечены значительные изменения величины и химизма засоления в вертикальном и горизонтальном направлениях, характер которых связан с типом засоления исходной почвы. Так, при хлоридном типе засоления происходит энергичное опреснение почв понижений до глубины 130—150 см с одновременным поверхностным засолением почв повышений (табл. 7). В то же время при сульфатном химизме верхняя граница солевого горизонта в понижениях опускается на 20 см, а на повышении слой 0—40 см остается практически незасоленным.

Однако наиболее глубокие изменения зарегистрированы при смешанном засолении, которое влияет не только на перераспределение солей, но и на смену типов засоления. В частности, почва понижения до глубины 100 см имеет гидрокарбонатный тип засоления, который вниз по профилю сменяется сульфатным. При этом в почвах на промежуточных по высоте позициях глубина солевого горизонта практически не изменяется, лишь в слое 80—120 см увеличилось соотношение Cl/SO_4 .

В то же время на повышении мощность верхнего относительно опресненного слоя сульфатно-хлоридного засоления 20—30 см, а на глубине 40—60 см из-за резкого увеличения минерализации зарегистрирован горизонт хлоридного засоления. Последний постепенно сменяется слоем сульфатно-хлоридного засоления, в котором содержание сухого остатка несколько снижается, а доля сульфатного иона в составе водной вытяжки увеличивается.

На глубине более 120 см тип засоления близок к исходному. Таким образом, очевидна полигенетичность почв, расстояние в плане между которыми несколько метров.

Опресненность профиля и химизм почвы понижения соответствуют промывному водному режиму. Особенности засоления почвы, локализованной на промежуточных позициях микрорельефа, позволяют характеризовать ее как автоморфную.

Процесс солепереноса в зависимости от микрорельефа и типа засоления, %

Слой, см	Исходное засоление				Конечное засоление при разных исходных химизмах засоления											
	пов.		пон.		хлоридный					сульфатный					хлоридно-сульфатный	
	пов.	пром.	пов.	пон.	пов.	пром.	пов.	пром.	пон.	пов.	пром.	пов.	пром.	пон.		
0—20	0,12	0,14	0,15		0,23	0,08	0,05		0,16	0,13	0,10	0,17	0,14	0,05		
21—40	0,18	0,15	0,17		0,54	0,12	0,07		0,21	0,17	0,12	0,38	0,22	0,05		
41—60	0,22	0,20	0,25		2,16	0,45	0,08		0,48	0,22	0,17	1,52	0,28	0,12		
61—80	0,26	0,18	0,23		2,54	0,87	0,11		0,85	0,43	0,21	2,3	0,8	0,2		
81—100	1,55	1,61	1,49		2,21	1,81	0,27		2,08	1,37	0,78	2,14	1,53	0,52		
101—120	1,63	1,49	1,56		1,81	1,57	0,64		1,86	1,51	1,43	1,73	1,60	0,95		
121—140	1,47	1,54	1,65		1,72	1,48	1,09		1,65	1,48	1,49	1,58	1,32	1,25		
141—160	1,44	1,63	1,51		1,35	1,63	1,36		1,54	1,61	1,55	1,42	1,50	1,73		
												0,5	0,5	0,6		

Примечания. 1. При хлоридно-сульфатном засолении исходное соотношение $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 0,5$; 2. В числителе приведен сухой остаток, %, в знаменателе — соотношение Cl/SO_4 .

Наконец, на повышении порядок чередования солей, при котором максимум Cl^- находится выше максимума SO_4^{2-} , соответствует гидроморфному режиму почвообразования. Однако в связи с тем, что в опыте применяли дренаж секций, условия, сходные с засолением почвенного профиля от минерализованных грунтовых вод, были исключены.

Следует отметить, что в литературе есть сведения о почвах с подобными аномальными солевыми профилями. В. В. Егоровым [92, 96, 98, 100] показано, что горизонтальное перемещение солей позволяет полнее учесть условия существования близких типов солонцовых комплексов на разновозрастных поверхностях в ряде районов сухостепной зоны, а также концентрирование больших запасов солей под пятнами солонцов, часто в размерах более значительных, чем могло быть исходное засоление.

Б. А. Зимовец [108, 109, 111, 112] показал, что распределение солей в зоне аэрации, которое подчинено воздействию фактора случайности, для отдельных контуров засоления связано с характером почвенных ареалов. Закономерности изменчивости засоления отдельных почвенных профилей в зоне светло-каштановых почв исследовали также А. Ф. Большаков [31, 34] и А. А. Роде [207]. Последний полагал, что главным механизмом формирования ареалов засоленных почв в автоморфных условиях является поступление легко растворимых солей с пленочно-капиллярным током от расположенных на глубине 8—10 м грунтовых вод.

Характерно, что на юго-востоке Ростовской области в комплексе с солонцами располагаются каштановые почвы, порядок чередования солей по профилю которых соответствует процессу рассоления. Таким образом, механизмы передвижения почвенных растворов имеют глубокие различия. Известно, что процессы миграции почвенных растворов подчинены воздействию градиентов: потенциала почвенной влаги, химического потенциала, упругости пара, температуры, которые определяют ход квазистационарных термодинамических процессов в почве.

Воздействие первого из перечисленных градиентов в диапазоне от ВРК (влажность разрыва капилляров) до полной влагоемкости на 1—2 порядка интенсивнее, чем остальных, и полностью ослабевает лишь при влажности, соответствующей максимальной гигроскопичности [203]. В связи с этим под действием избыточных количеств перераспределившейся по микрорельефу влаги в понижениях формируется направленный вертикально вверх градиент гравитационного потенциала, что способствует преобладанию нисходящего тока и опреснению формирующихся там почв. С глубиной роль этого фактора ослабевает и основное воздействие на процессы миграции поч-

венного раствора оказывают градиенты капиллярного, а затем капиллярно-пленочного потенциала, которые определяют массоперенос в соответствии с направлением гидравлических линий тока.

В таких условиях гидрологический режим ПГС становится определяющим фактором ионо- и солеобмена смежных в пространстве почв. Независимо от грунтовых вод идет процесс обогащения профиля почвы повышения легко растворимыми солями за счет понижений, при этом общий запас солей остается постоянным. Лишь в случае низкой влажности контактирующих почв возможна миграция ионов в обратном направлении, против градиента химического потенциала, однако вклад этого процесса в общий перенос несущественен. Последнее связано с понижением коэффициента влагопроводности грунта в области значительных по абсолютной величине отрицательных значений потенциала почвенной влаги. Это приводит к резкому замедлению движения растворов.

Миграция ионов почвенного раствора в горизонтальном направлении против градиента потенциала влаги является главной причиной, определяющей пространственную дифференциацию солевого режима почв сухой степи.

Однако остается невыясненной другая сторона процесса — зависимость характера пространственного распределения ионов от типа засоления. Согласно исследованиям В. А. Ковды [132, 133], Н. И. Базилевич [19], А. В. Новиковой [167], существенным фактором такой зависимости, помимо других причин, является метаморфизация состава почвенного раствора, у которой выделяются несколько стадий в зависимости от зоны миграции.

Метаморфизация в транзитном слое обусловлена постепенным повышением минерализации раствора, а в испаряющем слое — изменением в поглощении катионов коллоидным комплексом и переходом отдельных компонентов мигранта в твердую фазу [167].

Таким образом, при рассмотрении процесса солепереноса в солонцовых комплексах необходимо учитывать формы ионов в почвенных растворах.

Ассоциация ионов также существенный фактор, влияющий на формирование почв с различным типом засоления в условиях комплексности почвенного покрова. С одной стороны, она повышает растворимость соответствующих труднорастворимых солей, а с другой — изменяет подвижность основных макрокомпонентов почвенного раствора и характера ионообменных равновесий в системе твердая фаза — раствор [11, 103, 174, 175, 182].

Известно, что теоретические и экспериментальные пути прогнозирования водно-солевого режима мелниорируемых почв

Состав почвенного раствора почв опытной емкости

Глубина взятия об- разца, см	Влаж- ность, %	Сухой остаток, г/л	моль/л	рН	мг-экв/л						
					CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Микроповышение											
0—20	20,0	1,34	0,036	7,83	Нет	9,72	4,79	9,42	7,99	5,78	10,21
60—80	14,8	29,96	0,635	7,94	—	10,37	279,45	161,22	119,25	128,19	203,60
Промежуточная позиция											
0—20	23,8	0,82	0,017	7,65	Нет	4,15	2,84	4,52	4,45	3,87	3,19
60—80	19,6	12,08	0,364	7,81	—	11,27	67,44	114,31	83,17	64,15	45,70
Микропонижение											
0—20	23,3	0,59	0,013	7,85	0,0	4,12	1,76	2,31	4,42	2,68	1,07
60—80	21,4	1,06	0,021	8,38	0,1	7,60	2,41	4,09	3,87	5,73	4,20

еще недостаточно разработаны [96, 136, 152, 177]. В значительной степени это связано с отсутствием сведений о реальных формах ионов, находящихся в почвенных растворах или водных вытяжках из почв [23, 148, 215, 232, 234].

Часто для анализа специфики засоления, установления количества токсичных и нетоксичных солей проводят связывание ионов в гипотетические соли. Однако во многих случаях рассчитанные в результате последовательного связывания ионов различного рода солевые ассоциации не позволяют определить характер процессов аккумуляции и миграции солей, влияние засоления на развитие растений.

Физико-химические исследования, проведенные на материале изучения океанских и морских вод, показали, что значительная часть ионов в растворах находится в ассоциированном состоянии [38, 182, 184].

По уравнениям (1—13) рассчитали формы ионов по элементам микрорельефа почв опытной емкости при хлоридно-сульфатном типе засоления (табл. 8). Результаты расчета представлены в табл. 9, данные которой свидетельствуют, что реальные равновесные концентрации ионов, полученные при решении системы соответствующих уравнений [163], отличаются от определяемых аналитически (табл. 8).

Таблица 9

Количество свободных ионов в почвенных растворах почв опытной емкости, % общего содержания соответствующего иона

Глубина взятия образца, см	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻
Микроповышение							
0—20	81,10	76,39	98,97	81,32	95,86	Нет	100,00
60—80	50,12	48,92	92,32	37,41	81,10	—	100,00
100—120	47,32	42,15	90,34	33,85	76,11	—	100,00
Промежуточная позиция							
0—20	84,21	83,07	99,33	82,33	97,16	—	100,00
60—80	58,78	61,27	93,19	54,43	88,14	—	100,00
100—120	55,48	57,33	92,15	52,34	83,67	—	100,00
Микропонижение							
0—20	85,25	85,34	99,49	84,08	97,81	—	100,00
60—80	81,49	78,14	99,18	82,01	96,12	16,21	100,00
100—120	80,37	77,12	98,25	80,33	92,17	13,85	100,00

Наиболее существенные различия равновесных и аналитических концентраций отмечаются в почве повышения. Здесь в ионные пары связано 50—52% ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , 63% ионов SO_4^{2-} , 8—19% ионов Na^+ и HCO_3^- .

Почва промежуточной позиции микрорельефа характеризуется меньшей ионной силой почвенного раствора. В связи с этим в ионные пары связано уже 39—41% ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , 46% ионов SO_4^{2-} , 7—12% ионов Na^+ и HCO_3^- .

Наконец, значительное разбавление почвенного раствора в понижении способствует слабому проявлению комплексобразования на этом элементе искусственного микрорельефа, где существенно ассоциированным оказывается только ион CO_3^{2-} (84% общего количества CO_3^{2-} связано в комплексы).

Согласно полученным данным (табл. 9), в почве понижения почти все ионы с зарядом, равным их валентности, имеют подвижность, достаточную для перемещения вдоль гидравлической линии тока. В то же время в почвах микроповышения и прилегающих позиций интенсивное комплексобразование сказывается таким образом, что способность миграции сохраняется только у не связанных в комплексы, достаточно подвижных ионов Na^+ , Cl^- .

Если ионная сила раствора одинакова, то комплексобразование при хлоридно-сульфатном типе засоления обычно выражено в большей степени, чем при сульфатно-хлоридном [153, 167]. В первом случае ионы в растворе представлены относительно малоподвижными электронеутральными ионными парами MgSO_4^0 , CaSO_4^0 , MgCO_3^0 , CaCO_3^0 и несущий заряд NaSO_4^- , NaCO_3^- , MgHCO_3^+ , CaHCO_3^+ . Во втором случае в составе раствора возрастает доля индифферентных ионов Cl^- и слабо связываемых в комплексы ионов Na^+ , поэтому жидкая фаза почв состоит в основном из наиболее подвижных свободных ионов Cl^- , Na^+ . Процессы образования и распада ионных пар широко распространены в почвах солонцовых комплексов, где в силу различного характера увлажнения происходит концентрирование и разбавление почвенного раствора. В частности, в солонцах с высокой концентрацией раствора в солевых горизонтах значительная часть ионов находится в форме ионных пар, а в лугово-каштановых почвах из-за значительного увлажнения — в форме ионов с зарядом, равным их валентности, что влияет на подвижность ионов при горизонтальной миграции почвенных растворов и на распределение солей в отдельных компонентах почвенного покрова [182, 184, 185].

Так, в понижениях однообразный по профилю гидрокарбонатно-кальцевый тип химизма засоления обусловлен наличием малоподвижных ионных пар CaCO_3^0 , CaHCO_3^+ , MgCO_3^0 , MgHCO_3^+ . С удалением от понижения поперечное сечение

зоны соле-влажноперееноса возрастает. В сочетании с одновременным расходом влаги на эвапотранспирацию это способствует росту ионной силы почвенного раствора вдоль линий тока по мере приближения к микроповышению. В зависимости от типа засоления наблюдаются значительные колебания в пространственном распределении ионов. При хлоридном типе в модельном эксперименте отмечаются наиболее резкие различия исходного и конечного распределения ионов между элементами микрорельефа (табл. 9). В случае сульфатного засоления установлено лишь некоторое снижение верхней границы солевого горизонта в микропонижении, распределение солевых аккумуляций повышения изменилось незначительно. В случае смешанного засоления, в соответствии с различной подвижностью ионов, наблюдается метаморфизация ионного состава: почвы повышений до глубины 60 см характеризуются хлоридным типом засоления, на промежуточных позициях на этой же глубине несколько расширяется соотношение Cl^- и SO_4^{2-} и, наконец, понижения в условиях эксперимента приобретают сульфатный химизм засоления.

Таким образом, почвы микроповышения имеют характерный профиль, в котором четко выделяется относительно опресненный в результате поверхностного увлажнения 0—40 см хлоридно-гидрокарбонатного типа засоления, который на глубине 40—80 см резко переходит в горизонт хлоридного химизма и значительной минерализации. Переход к исходному химизму засоления с глубины 100—120 см вызван тем, что ниже лежащие горизонты повышения не охватываются процессом горизонтального переноса и солевые аккумуляции в них практически неподвижны.

Согласно данным модельного эксперимента, формирование мелiorативного эффекта при окультуривании солонцовых почв объясняется сложностью СПП сухой степи, характер которой, по В. М. Фридланду [227], определяет направление процессов почвообразования в пределах подчиненного ей почвенно-географического пространства. Следовательно, для теоретического обоснования приемов окультуривания солонцов почв в соответствии с условиями их генезиса необходим анализ особенностей СПП.

К сожалению, количественные аспекты пространственного массообмена в комплексных почвах практически не изучены. В связи с этим нами выполнены исследования закономерностей формирования СПП сухой степи на заложенных методом рендомизации ключевых участках, в которых реализован метод пространственной дискретизации компонентов. Полученные в исследованиях на трех почвенных ключах данные, характеризующие их водный и солевой режимы, строение поверхности и изменчивость почвенного покрова приведены в

A hand-drawn contour map of a field. The map shows several closed contour lines representing different elevations. The contours are labeled with numbers: 12, 13, 14, and 15. The map includes a north arrow in the top left corner, pointing towards the top. A scale bar is located at the bottom, marked with 0, 10, 20, and 30 meters. Various features are drawn on the map, including trees (represented by small circles with crosshairs) and a building (represented by a rectangle with a chimney). The map is drawn on a grid of 1 cm squares.

* Данные отобраны из общей выборки методом рендомизации.

Таблица 10

Номер скважины	Геодезическая отметка, м	Влажность, % абсолютно сухой массы, в слое, см			
		0—20	0—40	0—120	0—160
Ключ 1					
1	1,225	22,3	22,4	24,8	20,1
9	1,450	20,4	19,6	16,2	15,1
13	1,350	21,1	21,7	15,8	15,7
42	1,200	23,8	24,5	25,1	18,9
155	1,425	21,1	20,7	16,9	15,3
179	1,450	22,5	20,0	14,9	14,0
213	1,500	19,3	18,1	14,5	14,0
242	1,375	21,9	22,4	19,3	15,9
284	1,305	21,3	20,7	16,4	15,0
Ключ 2					
15	1,650	24,2	24,3	18,3	17,1
22	1,525	22,3	22,0	16,2	15,5
33	1,750	21,8	19,1	15,3	14,6
48	1,600	22,7	22,5	18,2	16,9
144	1,800	23,1	23,0	17,9	16,0
153	1,725	23,7	24,2	23,9	21,1
189	1,900	22,0	18,5	15,6	13,7
204	1,950	20,8	20,9	18,6	14,3
247	1,700	21,5	21,0	17,5	14,9
Ключ 3					
24	1,100	24,1	23,3	19,1	16,5
88	1,125	23,0	22,1	17,3	15,8
96	0,925	23,9	24,8	22,7	21,9
124	1,350	20,6	16,6	15,1	13,0
201	1,325	22,1	19,1	16,8	19,6
205	1,150	22,7	20,4	17,9	17,2
223	1,000	23,0	23,7	22,0	21,4
237	1,300	22,5	20,1	17,5	15,1
238	1,175	21,3	19,8	18,9	18,2

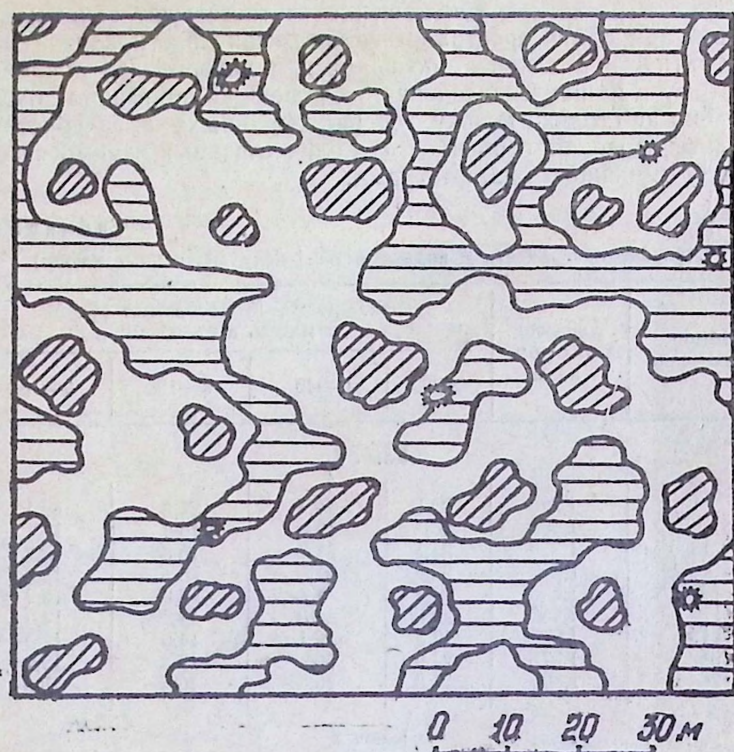


Рис. 6. Почвенный план ключа 1. Обозначения те же, что на рис. 1

Первоначально рассчитали корреляцию между микро-рельефом и остальными параметрами (табл. 10—12) посредством составления уравнений регрессии. Вычислили r между рядом, образованным значениями геодезических отметок поверхности ключа в местах отбора почвенных проб (факторный признак z), и каждым в отдельности рядом соответствующих значений послойного засоления, влажности, а также рядом данных, состоящим из пронумерованных по видам ЭПА.

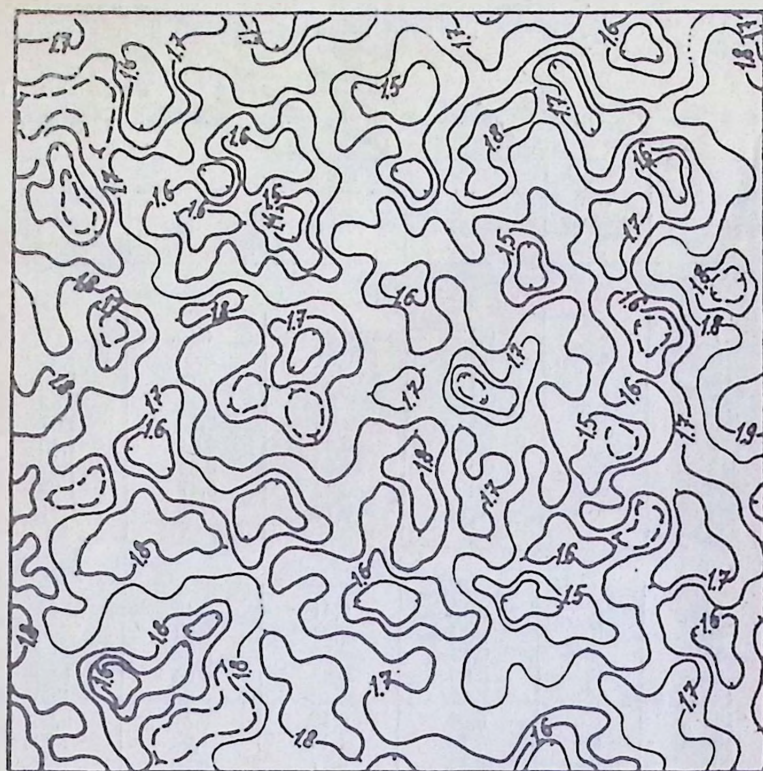
Значения сравниваемых статистических рядов характеризуются широким диапазоном изменчивости соответственно конкретным параметрам. Так, расчет взаимосвязи между номерами геодезических отметок и влажностью почвы в слое 0—20 см дал результат, указывающий на отсутствие какой бы то ни было зависимости между ними (коэффициент детер-

минации $d = r^2 = 0,0064—0,061$) [28, 82]. Подобный результат получен и в результате расчета ряда значений влажности в слое 0—40 см.

Таблица 11
Содержание легкорастворимых солей в почвах ключевых участков, %

Номер скважины	Тип почвы	Слой почвы, см			
		0—20	40—80	0—100	120—160
Ключ 1					
1	Кл	0,13	0,22	0,27	0,59
9	Сп	0,19	0,81	0,64	1,44
13	К	0,17	0,43	0,49	1,56
42	Кл	0,09	0,28	0,29	0,52
155	К	0,12	0,70	0,72	1,67
179	Сп	0,13	0,89	0,61	1,60
213	Сп	0,15	1,08	0,84	1,87
242	К	0,12	0,52	0,47	1,02
284	К	0,14	0,76	0,49	1,51
Ключ 2					
15	К	0,12	0,41	0,45	1,32
22	К	0,11	0,81	0,82	1,64
33	Сп	0,15	0,92	0,98	1,94
48	К	0,09	0,53	0,54	1,29
144	К	0,07	0,44	0,38	1,65
153	Кл	0,06	0,12	0,21	0,86
189	Сп	0,13	1,11	1,03	1,80
204	Сп	0,11	0,77	0,58	1,53
247	К	0,13	0,56	0,62	1,83
Ключ 3					
24	К	0,11	0,31	0,36	1,56
88	К	0,10	0,36	0,41	1,35
96	Кл	0,07	0,09	0,12	0,29
124	Сп	0,14	1,13	1,18	2,21
201	Сп	0,31	0,79	0,62	1,97
205	К	0,12	0,53	0,47	1,42
223	Кл	0,06	1,15	0,15	0,44
237	Сп	0,13	0,81	0,62	1,57
238	К	0,10	0,70	0,68	1,60

По-видимому, это определяется процессом эвапотранспирации, тенденция отрицательной корреляции для горизонта 0—40 см $r = -(0,16—0,34)$ обусловлена, вероятно, проявлением резкого снижения значений влажности в пределах солонцового и подсолонцового горизонтов соответственно особенностям водопроницаемости.



0 10 20 30 м

Рис. 7. План в горизонталях ключа 2

Приведенные результаты свидетельствуют о слабом непосредственном воздействии процессов горизонтального массообмена в связи с микрорельефом на характер режима увлажнения поверхностных горизонтов генеральной совокупности почв, изученных в пределах ключей. У поверхности процессы вертикального влагообмена являются основными.

Как отмечалось, все типы почв каштановой зоны Ростовской области отличаются глинистым и тяжелосуглинистым мехсоставом и, следовательно, обладают низкой водопроницаемостью [131, 155]. Это приводит к развитию локального микростока при минимальном слое осадков и относительно не-

Таблица 12

Химизм засоления почв ключевых участков

Номер скважины	Слой почвы, см				
	0—20	20—40	40—80	80—120	123—160
1	6	6	6	6	4
9	5	5	3	3	3
13	6	6	4	4	4
42	6	6	6	5	4
155	6	5	2	3	3
179	5	4	1	2	3
213	5	5	1	3	3
242	6	5	5	4	3
284	5	5	3	3	4
15	6	5	3	3	3
22	5	5	2	2	3
33	6	4	1	2	2
48	5	5	4	3	3
144	6	6	5	4	3
153	6	6	6	5	4
189	6	4	1	2	3
204	5	5	3	4	4
247	6	5	4	3	3
24	6	5	4	3	3
88	5	5	4	3	3
96	6	6	6	6	6
124	6	4	1	2	3
201	4	4	1	3	3
205	5	4	3	4	4
223	6	6	6	5	4
237	6	4	1	2	3
238	6	5	2	3	4

Примечание. Типы засоления: 1 — хлоридный, 2 — сульфатно-хлоридный, 3 — хлоридно-сульфатный, 4 — сульфатный, 5 — сульфатно-гидрокарбонатный, 6 — гидрокарбонатный.

высокой интенсивности их выпадения. Перераспределение влаги на фоне слабого общего атмосферного увлажнения в таких условиях — существенный фактор, поскольку в решающей степени влияет на пространственную неоднородность гидрологического режима всего почвенного слоя. На основании данных табл. 10 нами получено следующее уравнение регрессии:

$$G = 20,3 - 34,5 (Z - Z_0), \quad (2)$$

где G — влажность в слое 0—120 см;

Z — геодезическая отметка в месте отбора образца;

Z_0 — геодезическая отметка нулевой плоскости ключевого участка.

На существование взаимосвязи между положением точки

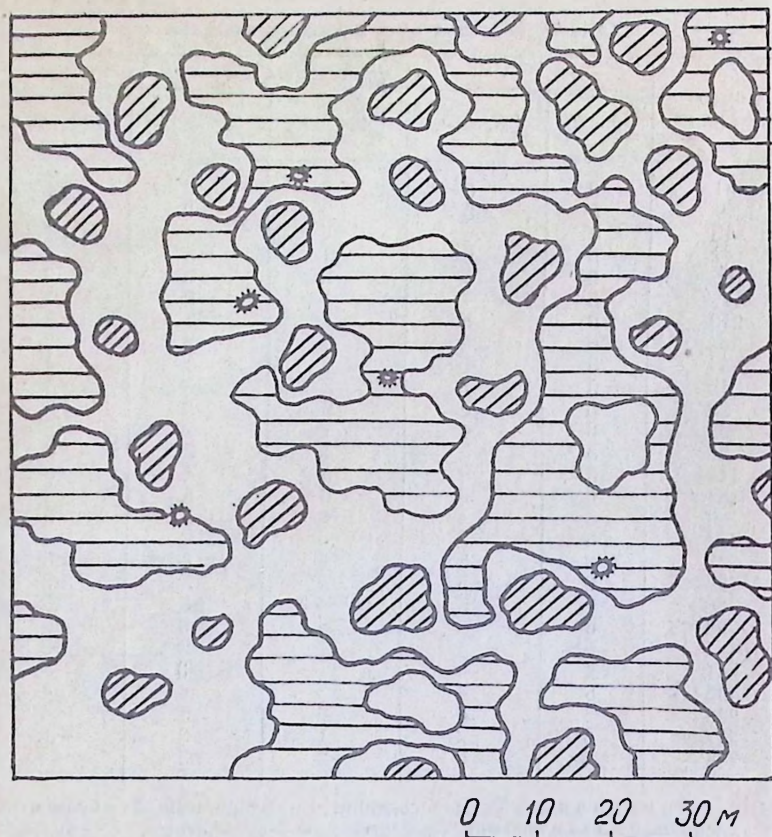


Рис. 8. Почвенный план ключа 2. Обозначения те же, что на рис. 1

взятия образцов в микрорельефе и влажностью почвы в слое 0—120 см указывает $d = 0,35—0,42$. Характер зависимости (2) сохраняется и для слоя 0—160 см, но с некоторым ослаблением взаимосвязи ($d = 0,26—0,31$). По-видимому, последнее связано с тем, что микропонижения с глубиной промачивания более 120—150 см статистически характеризуются малой повторяемостью. Изменчивость влажности слоя 0—160 см сужается, что ухудшает синхронизацию результирующего признака по форме сопряженной дневной поверхности и ослабляет корреляцию.

Зависимость (2) указывает на значительную пространственную дифференциацию термодинамического потенциала

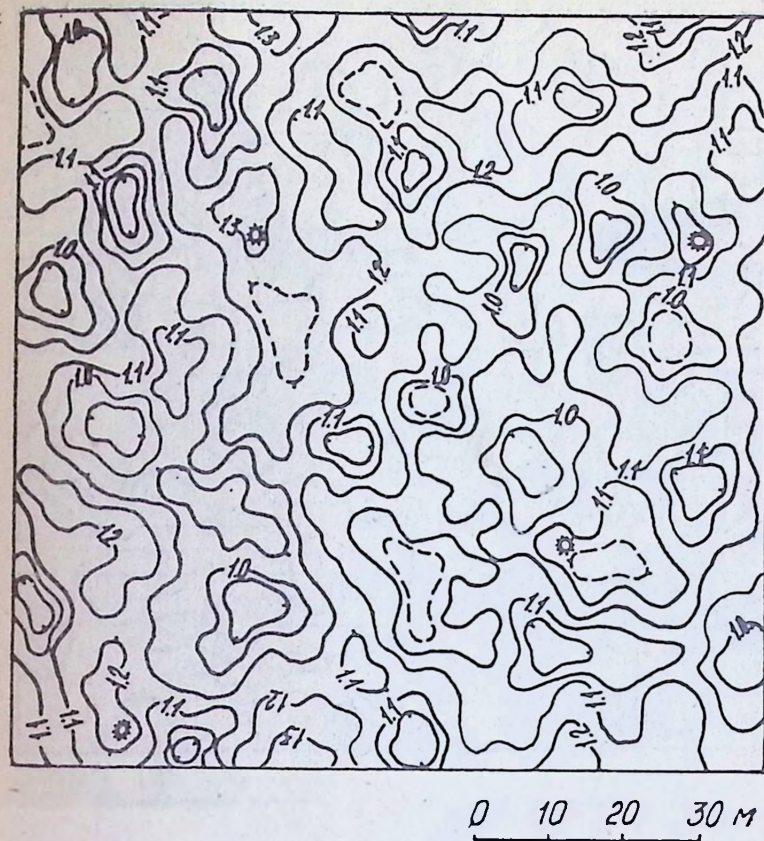


Рис. 9. План в горизонталях ключа 3

влаги в почвах сухой степи, значения которого для почв близкого механического состава тесно коррелируют с содержанием влаги [44, 45, 53, 54, 113, 161, 163, 171]. Складываются специфические условия миграции почвенных растворов, обусловленные особенностями гидродинамической сетки, соответствующей значениям термодинамического потенциала в трехмерной толще почвогрунта. Соответственно варьированию глубины промачивания эквипотенциали, построенные для любого микропрофиля значений термодинамического потенциала почвенной влаги в пределах ключевого участка, приобретают изменчивую форму. В понижениях они обращены выпуклостью вниз, под промежуточными по высоте позициями микрорельефа

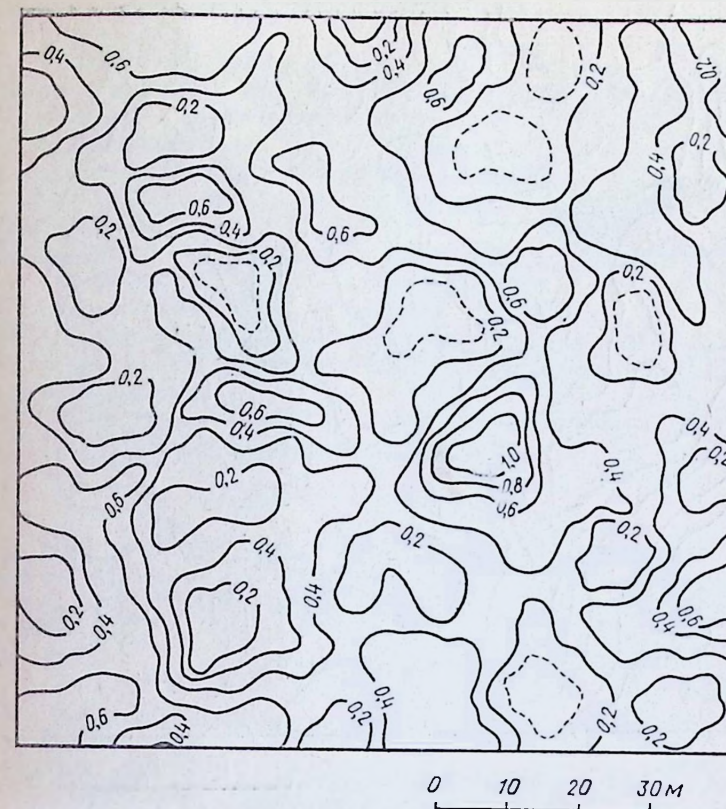
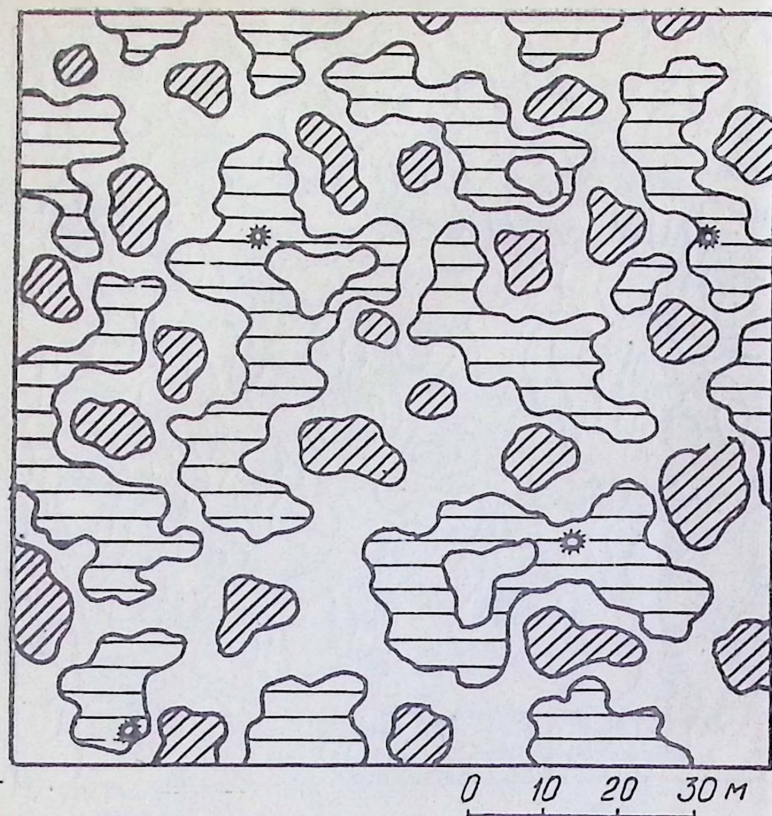


Рис. 10. Почвенный план ключа 3. Обозначения те же, что на рис. 1. Фа характеризуются существенным наклоном, а на микропонижениях выполаживаются и частично сопрягаются с поверхностью. Поэтому гидравлические линии тока, соответствующие направлению миграции раствора, концентрируются преимущественно в зоне, ограниченной по вертикали глубинами 60—120 см в микропонижении и 40—80 см на микроповышении. Им свойственна тенденция горизонтальной направленности.

Рассмотренные особенности переноса обусловлены спецификой гидрологического режима и в значительной степени влияют на характер засоления почвенного слоя. Об этом свидетельствует уравнение регрессии

$$B = 0,46 + 0,85 (Z - Z_0), \quad (3)$$

где B — сухой остаток, % в слое 40—80 см.

Рис. 11. План ключа 3 в галоизолиниях для слоя 40—80 см

Зависимость (3) статистически достоверно ($r = 0,78$) характеризует закономерности аккумуляции легкорастворимых солей в слое 40—80 см и подтверждает наше предположение о важной роли вектора, соответствующего градиенту термодинамического потенциала как фактора направленности массопереноса в пределах почвенной толщи. Проявление этого процесса связано с интенсивным рассолением почв понижений микрорельефа, которые соответствуют особенностям миграции почвенных растворов, являющихся источником засоления средней части профиля почвы микроповышения (рис. 11). Частично засоление происходит и под промежуточными позициями.

Таким образом, в сухостенной зоне каштановых почв отсутствует тенденция к общему опреснению почвенного слоя

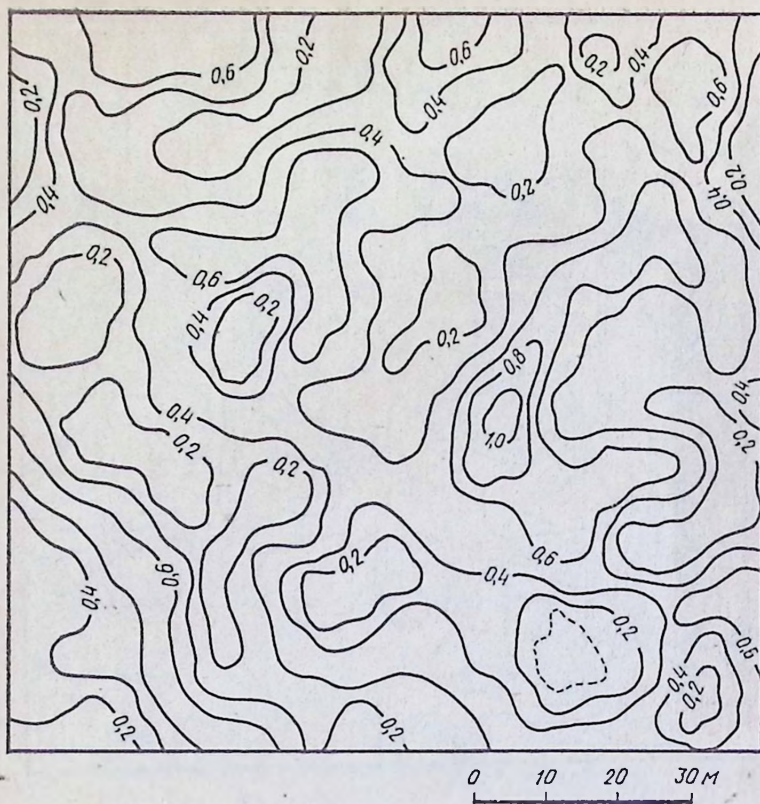


Рис. 12. План ключа 3 в галонизониях для слоя 0—100 см

даже при значительной глубине грунтовых вод. Наоборот, интенсивный горизонтальный массообмен между смежными в пространстве ЭПА значительно превышает маловероятную в рассматриваемой обстановке возможность выщелачивания. Как указывает В. В. Егоров [92, 98] повсеместно складываются предпосылки того, что засоленность элемента почвенного покрова, являющегося зоной разгрузки почвенных растворов, не снижается во времени.

Подобный процесс горизонтального солепереноса (рис. 12 и 13) возникает в слоях 0—100, 120—160 см. Однако здесь корреляция с микрорельефом ($r = 0,31—0,48$) значительно ниже, чем для слоя 40—80 см.

Наряду с данными об общем распределении солей в почве необходимы сведения о качественном составе ионов. Поэтому была изучена изменчивость химизма засоления почв ключе-

вых участков соответственно изменчивости микрорельефа. Для проведения расчетов все зарегистрированные в эксперименте типы химизма засоления: хлоридный, сульфатно-хлоридный, хлоридно-сульфатный, сульфатный, сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатный (табл. 12) — представлены в виде соответствующего числового ряда 1, 2, ... 6. Такой прием позволил использовать данные послойной качественной характеристики солевых аккумуляций для количественной статистической обработки совместно с рядом сопряженных геодезических отметок.

Вычисления проведены для различных горизонтов. Для слоев 0—20 см и 20—40 см взаимосвязь типа засоления и формы микрорельефа не установлена ($d_{0-20} = 0,04$; $d_{20-40} = 0,13$). Аналогичный результат получен для слоя 120—160 см ($r = -0,34$) вследствие проявления процессов солепереноса в нижних горизонтах.

При глубине расчетной толщи 80—120 см получено достоверное ($d = 0,51$) уравнение регрессии:

$$M_1 = 2,47 - 7,11 (Z - Z_0), \quad (4)$$

где M_1 — тип химизма засоления в слое 80—120 см согласно принятой нумерации (табл. 12).

Для горизонта 40—80 см взаимосвязь становится более тесной ($d = 0,71$):

$$M_2 = 2,06 - 5,15 (Z - Z_0), \quad (5)$$

где M_2 — тип химизма засоления в слое 40—80 см согласно принятой нумерации.

Установлено, что изменчивость послойного химизма засоления в пределах каждого ряда данных зависит от того, для какого горизонта проведен расчет. При этом коэффициент вариации статистического ряда согласно номерам химизма в слое 40—80 см составил $C_v = 0,8$, а для вариантов, где тип засоления практически не связан с микрорельефом (слои 0—20, 20—40, 120—160 см), $C_v = 0,15—0,25$.

Известно, что высокая вариабельность факторов снижает достоверность их взаимосвязи, идентифицируемой при расчете корреляции. Тогда интерпретация зависимостей (4) и (5) приводит к противоречию, поскольку с учетом полученных значений C_v достоверный результат более вероятен для слоев 0—20, 20—40, 120—160 см, а не для слоя 40—80 см.

Как было показано выше, при горизонтальном массопереносе необходимо рассматривать другой важный фактор, который в значительной степени связан с характером миграции и аккумуляции солей в аридных регионах, а именно — ассоциацию ионов в почвенных растворах.

Изученная в рамках нашего опыта генеральная совокупность почв характеризуется значительным разнообразием влажности, широким набором типов химизма, поэтому влияние ассоциации ионов здесь особенно вероятно. Так, процесс миграции почвенных растворов в микропонижениях протекает при относительно высоком содержании влаги, следовательно, комплексобразование проявляется в слабой степени и большая часть свободных (не связанных в пары) ионов перемещается в направлении гидравлических линий тока. Незначительное количество ионных пар с относительно низкой подвижностью обуславливает однообразный по вертикали гидрокарбонатный тип засоления почвы в начальной части зоны горизонтального солепереноса.

С удалением от микропонижения периметр зоны миграции постепенно возрастает, а суммарная площадь поперечного сечения элементарных гидравлических трубок тока увеличивается. Последнее в сочетании с расходом на эвапотранспирацию по мере приближения к микроповышению ведет к резкому росту ионной силы почвенного раствора. Результатом этого процесса является метаморфизация ионного состава мигранта вдоль линий тока, при которой почвы на переходных позициях микрорельефа в горизонтах зоны массопереноса приобретают сульфатный тип засоления, сменяющийся вблизи микроповышения хлоридно-сульфатным [92, 108, 115, 132, 167].

Наконец, почвам выпуклых элементов в слое 40—80 см свойствен хлоридный (иногда сульфатно-хлоридный) химизм засоления. Это связано с тем, что конечный участок зоны горизонтальных миграций характеризуется особенно значительным ростом ионной силы раствора. В таких условиях только относительно более подвижные ионы Na^+ и Cl^- сохраняют способность к перемещению. Таким образом, пестрота засоления горизонта 40—80 см, о которой свидетельствует значение S_v типов химизма, объясняется спецификой гидрологического режима. Характер статистических закономерностей (4) и (5) определяется важной ролью ассоциации ионов в формировании закономерностей процесса переноса [103, 153, 174].

Отсутствие корреляции для слоя 120—160 см, где тип химизма близок к сульфатному (арифметическая середина 3,8 согласно принятой нумерации), при узком диапазоне изменчивости связано со спонтанностью проявления перераспределения влаги по микрорельефу на обширных понижениях.

Малая мощность и значительная изменчивость влажности слоя 0—20—40 см определяют формирование относительно высоких знакопеременных во времени вертикальных градиентов термодинамического потенциала. С одной стороны, это является причиной слабой зависимости химизма засоления горизонтов 0—20 и 20—40 см от геодезических отметок, а с

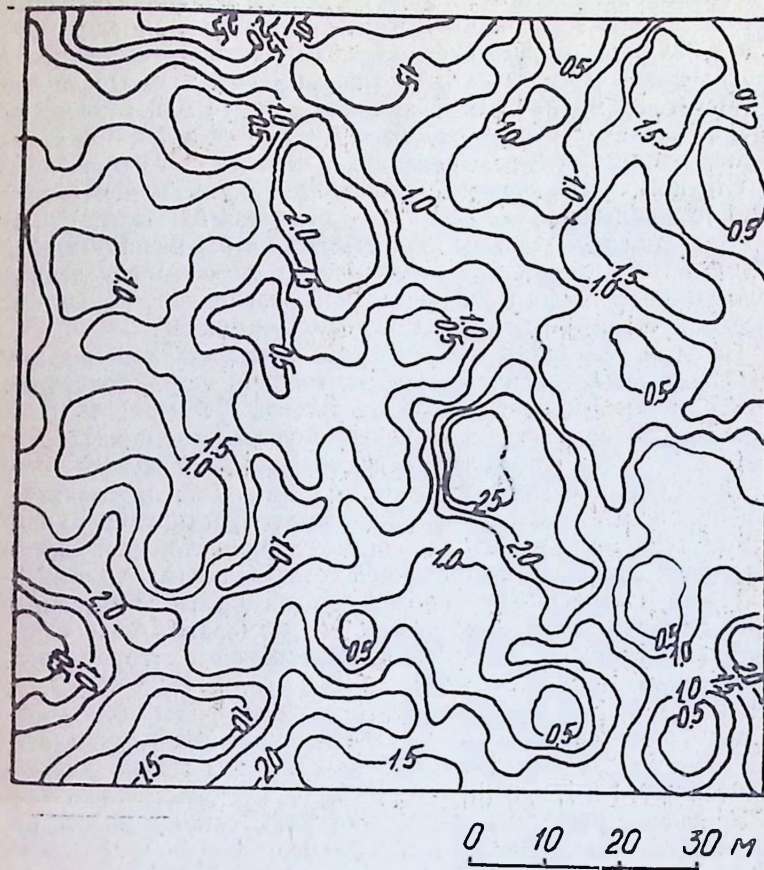


Рис. 13. План ключа 3 в галтонизалиях для слоя 120—160 см

другой — обуславливает тесную связь почвенно-мелиоративных процессов в слое 0—40 см с характером солевых аккумуляций слоя 40—80 см.

Указанное вертикальное взаимодействие в почвах понижений влияет только на процессы влагообмена, что не вызывает негативных последствий. Однако, согласно уравнению (5), солевые аккумуляции слоя 40—80 см на микроповышениях в связи с хлоридным типом засоления характеризуются относительно повышенным количеством иона Na^+ в твердой и жидкой фазах. Вертикальный перенос солей в поверхностных слоях почвы этого элемента микрорельефа ведет к регуля-

ному появлению Na^+ на глубине 15—30 см. Таким образом, стабилизированные боковым поступлением минерализованных почвенных растворов химизм и величина засоления слоя 40—80 см являются весьма существенным фактором вероятности проявления солончатости на микроповышениях. Последнее согласуется с мнением В. В. Егорова [100], В. И. Кирюшина [130] об устойчивости солонцового процесса в связи с цикличностью появления Na^+ в пределах иллювиального горизонта.

Статистические данные о закономерностях изменчивости водного и солевого режимов почв в пределах ключевых участков делают справедливым полученное на основании данных модельного эксперимента предположение об определенной роли микрорельефа в дискретизации изученной природной пространственно-географической структуры на ЭПА.

На этом основании нами выполнен расчет локализации отдельных ЭПА в зависимости от микрорельефа, тенденции которой видны при сопоставлении рис. 5, 7, 9 и рис. 6, 8, 10, характеризующих почвенный покров и устройство поверхности ключей 1—3. Каждому установленному почвенному индивиду присвоен порядковый номер, который в процессе математической обработки используется в качестве результирующего признака. Нумерация выполнена согласно принятой при взятии почвенных образцов координатной сетке. С целью рендомизации выбора вычисления проведены для шести возможных (трех попарно обратных) вариантов нумерации почв комплекса (солончаковатого солонца, каштановой и лугово-каштановой почв) соответственно: 1, 2, 3—3, 2, 1; 1, 3—1, 2; 1, 3, 2—2, 3, 1. Полученные статистические ряды были обработаны совместно с соответствующими значениями геодезических отметок. Достоверные данные получены только для вариантов 3, 2, 1 и 1, 2, 3 ($|r| = 0,18—0,71$).

Уравнение регрессии свидетельствует о сопряженности изменчивости микрорельефа и почвенного покрова сухой степи

$$P_1 = 1,56 + 3,41 (Z - Z_0), \quad (6)$$

где P_1 — условный номер почвы (Кл — 1; К — 2; Сн — 3).

Описанный расчет корреляции между отдельными почвенными параметрами и формой поверхности для ключей 1 и 3 был выполнен на основании данных об отклонении геодезических отметок индивидуальных точек опробования от средней плоскости Z_0 . В случае однородного масштаба изменчивости высоты отдельных точек на этой плоскости геодезическая отметка является удовлетворительным индикатором обеспеченности элемента поверхности влагой и соответственно несет информацию о его солевом режиме. Однако такой характер зависимости прослеживается не для всех вариантов формы поверхности.

Следует учитывать, что термин микрорельеф объединяет элементы с довольно значительным диапазоном изменчивости размеров. Поэтому лишь в некоторых случаях (в частности, ключи 1 и 3) на поверхности удается выделить продольные профили, форма которых определена в основном сочетании элементов одного порядка размеров (рис. 14 а, б). Чаще всего основной тон (терминология гармонического анализа), или максимальный цикл линейной периодичности формы, взаимодействует с гармониками — элементами меньшей протяженности (рис. 13, в). В то время как на рис. 14, а, б отчетливо проявляется симметричная периодичность одной линейной формы $a—a_1$ ($b—b_1$) относительно нулевой плоскости $0_1—0_1$, рис. 14, в отражает комбинацию различных частот изменчивости. Очевидно, что наряду с перераспределением влаги по $a—a_1$ здесь приобретают существенное значение экстремальные элементы цикла $b—b_1$.

При этом процессы дифференциации увлажнения не поддаются идентификации с учетом принятого нами ранее высотного соотношения согласно плоскости $0_2—0_2$. Действительно, при этом почвы, как в элементах поверхности D, и E, характе-

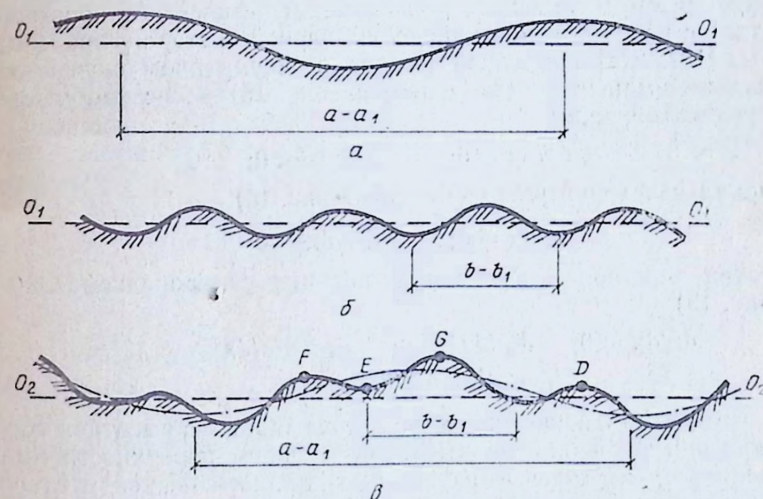


Рис. 14. Реципентно-донорные взаимодействия: а, б — однопериодная пространственная изменчивость микрорельефа; в — комбинация двух элементов формы; $a—a_1$; $b—b_1$ — элементы формы; $0—0_1$ — нулевая плоскость; — поверхность почвы; — максимальный цикл изменчивости формы

цикл изменчивости формы

ризуются одноименным высотным признаком, но, согласно рис. 14, в режим увлажнения каждой из них существенно различается. Элемент D допустимо рассматривать как донорный, поскольку его вероятной функцией является воздействие на окружающие почвы посредством микростока. В то же время Е — акцепторный ареал. Он, наоборот, получает влагу в виде стока с прилегающих позиций F и G.

Реальные закономерности проявления отдельных форм микрорельефа разнообразнее, чем показано на рис. 14, в. Поэтому при изучении природных объектов необходим более универсальный прием анализа реципиентно-донорных отношений, формирующихся на поверхности, чем относительная высота точки опробования, которая часто принимает второстепенный характер.

Нами была разработана методика установления специфических пространственных форм, рассматривающая количественную оценку интенсивности их взаимодействия, поскольку при анализе почвенного покрова сухой степи необходимо в первую очередь идентифицировать характерные элементы поверхности, влияющие на режим увлажнения. Для этого были применены математические приемы исследования функции двух переменных (геодезической отметки) в зависимости от аргументов (координат почвенно-географического пространства) с использованием значений первой и второй производных [137, 224]. На такой основе в двухмерном случае локальный максимум (элемент 3 на рис. 15) распознается следующим образом:

$$dz/dx = 0; \quad d^2z/dx^2 < 0;$$

локальный минимум (элемент 1 на рис. 15) —

$$dz/dx = 0; \quad d^2z/dx^2 > 0;$$

точка перегиба (переходная позиция микрорельефа 2 на рис. 15) —

$$\begin{aligned} dz/dx = 0; \quad d^2z/dx^2 = 0; \quad \text{sign } d^2z/dx^2 \Big|_{x=x_0-0} &= \\ &= \text{sign } d^2z/dx^2 \Big|_{x=x_0+0}. \end{aligned}$$

В связи с дискретным характером данных о высотном соотношении точек для идентификации форм поверхности были использованы конечно-разностные аналоги первой и второй производных на сетке с постоянным шагом соответственно h и h^2 . Аппроксимирующие операторы заданы на сеточной функции z (геодезическая отметка):

$$L_1 z = dz/dx \sim L_h z_l = (z_l^{j_{l+1}} - z_l^{j_{l-1}}) 2b,$$

где i, j — номера узлов конечно-разностной сетки. Наряду с проведением анализа по расчетным значениям L_h, L_τ, L_{ht}

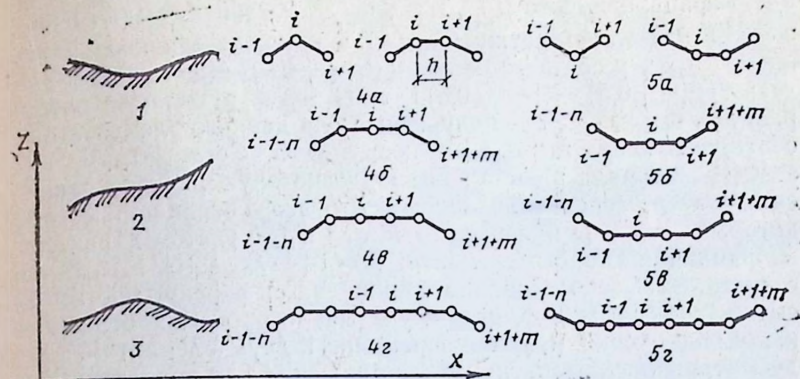


Рис. 15. Графическая иллюстрация использования конечно-разностных приемов при анализе формы поверхности

были предусмотрены дополнительные признаки распознавания (рис. 15). В частности, для идентификации свойственных региону плоских микроповышений и микропонижений с дном, близким к горизонтальному, была применена аппроксимация операторов L_h , L_v , L_{ht} на многоточечном шаблоне ($i=p-1 \dots i+m+1$; $j=1 \dots j+k+1$), иначе, используя в программе только трехточечный шаблон ($i-1, i+1$; $j-1, j+1$), при расчете возникает неопределенность i -го (j -го) элемента в центральной части 4б, 5б, 4в, 5в, 4г, 5г и т. п. в связи с нулевыми значениями L_{ht} .

$$L_{h_1} z_l = (z_{l+m+1}^j - z_{l-n-1}^j) / 2h;$$

$$L_{\tau_1} z_i = (z_i^{j+k+1} - z_i^{j-l-1})/2\tau;$$

$$L_{h_1, \tau_1} z_l = [(z_{l+m+1}^{j+k+1} z_{l-n-1}^{j+k+1})/2h - (z_{l+m+1}^{l-1} z_{l-n-1}^{l-1})/h]/2\tau.$$

Варьирование m, n, k, l позволяет принять во внимание особенности поверхности. Так, при $\max (m+n) = 0$; $\max (k+l) = 0$ перераспределение влаги учитывается лишь для малых элементов 4а, 5а (рис. 15), а 4б, 5б, ... 5г не распознаются ($L_{h_1T_1/x} = h \cdot i = L_{h_1T_1/x} = h \cdot j = 0$). С другой стороны, 4в и 5в (рис. 15) распознаются при $\max (m+n) = \max (k+l) = 2$ соответственно как повышение и понижение. Аналогичный результат возможен для 4г и 5г при $\max (m+n) = 4$; $\max (k+l) = 4$.

Естественно, что в двух последних случаях 4а и 5а распознаются уже при $\max (m+n) = 0$; $\max (k+l) = 0$.

Кроме того, был предусмотрен учет характера влияния идентифицированного L_{h_1} , L_{τ_1} , $L_{h_1\tau_1}$ повышения (или понижения) принятой протяженности в направлении координатных осей x и y соответственно: $((i+p+0,5)-(j-g-0,5)) \cdot h = 1$; $((j+s+0,5)-(i-t-0,5)) \cdot \tau = l_1$ на окружающее пространство, где p, r, s, t — полученные для данного элемента при соответствующих $m+n, l+k$ координаты. Согласно $p-g+1, s-t+1$ выбирали размер зоны D , на которую распространялся характер распознанной формы. Для этого ввели параметр λ , который ставил D в зависимость от l и l_1 с учетом характера координат данного элемента: $D = l + l_1 \cdot \lambda_{\text{прав}} + l_1 \cdot \lambda_{\text{лев}}$. В частности, если использование λ приводило к перекрытию зон D смежных экстремумов, на что указывало расчетное отнесение какой-либо точки (i, j) одновременно к двум элементам, предусматривалось итеративное приближение для корректировки λ с тем, чтобы его левое (правое) значение соответствовало размерам соприкасающихся элементов и позволяло идентифицировать границу G между ними. Если между локальными экстремумами противоположного знака располагался участок $l \geq 2h$ ($l_1 \geq 2\tau$), то вычленился переходный элемент размера $h(\tau)$ с центральной координатой E (рис. 16). В расчетах не предусматривалось специальное распознавание переходных позиций микрорельефа, за исключением идентифицируемых при определении соотношения повышений и понижений в виде позиций G . На оставшейся после распознавания упомянутых элементов части поверхности предусматривался режим почвенных параметров, соответствующий зональным природно-климатическим условиям, без заметного проявления донорности или акцепторности. Таким образом, координатам любой точки в пределах изученных ключевых участков был поставлен в соответствие свойственный форме участка поверхности режим: донорность (элементы 3 и 4 на рис. 15), акцепторность (элементы 1 и 5 на рис. 15) или отсутствие преобладающего

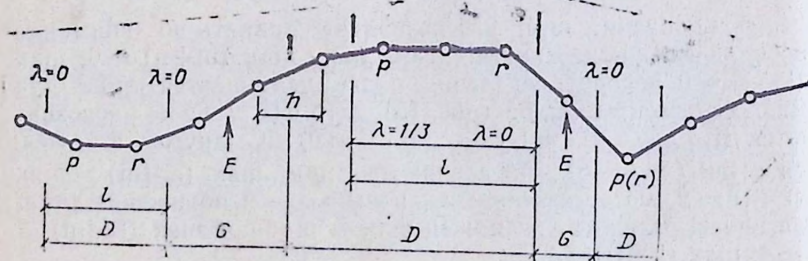


Рис. 16. Схема распознавания форм поверхности

направления пространственного взаимодействия (G на рис. 16). Наконец, для расширения диапазона использования разработанного нами способа вводился параметр g , служивший критерием определения участка поверхности в качестве наклонного ($|L_{h_1}| > g$ или $|L_{\tau_1}| > g$) или горизонтального ($|L_{h_1}| \leq g$ или $|L_{\tau_1}| \leq g$).

Каждому типу режима присваивалась соответствующая позиция микрорельефа (1 — отрицательная, 2 — переходная, 3 — положительная), используемая в качестве факторного признака при количественной оценке взаимообусловленности форм поверхности и сопряженных почвенных параметров.

Представляет интерес характер распознавания форм в зависимости от значений m, n, l, k, λ, g , а также влияние этих величин на уровень корреляции статистических рядов. В частности, при $m+n=0$; $k+l=0$; $\lambda=1,0$; $g=0,001$ зарегистрирована высокая частота появления элементов 1 и 3 при низкой повторяемости элемента 2 (рис. 15), причем относительная повторяемость 1 и 3 была на порядок выше, чем у ЭПА ($f_1 = 0,12 \text{ м}^{-2}$, $f_2 = 0,08 \text{ м}^{-2}$, $f_{\text{ЭПА}} = 0,013 \text{ м}^{-2}$). Расчет показал, что в этом варианте корреляция формы поверхности и элементов почвенного покрова была низкой: $r_{\text{форма-ЭПА}} = 0,24-0,32$. По нашему мнению, подобный результат обусловлен излишне высокой чувствительностью операторов L_{h_1} , L_{τ_1} , $L_{h_1\tau_1}$ на изменчивость поверхности при выбранных значениях m, n, l, k, λ, g . При этом отслеживается самое незначительное варьирование формы, которое является проявлением случайных процессов изменчивости, воздействующих на форму поверхности в пределах в целом однородного, отдельного ЭПА и не определяет донорно-акцепторные отношения.

Взаимообусловленность вариабельности микрорельефа и почвенного покрова не была отмечена и при $m+n=6$; $l+k=6$; $\lambda=0,33$; $g=0,1$. В отличие от предшествующего случая относительная повторяемость распознаваемых форм, наоборот, весьма незначительная и, кроме того, существенно ниже, чем у ЭПА ($f_1 = 0,0007 \text{ м}^{-2}$, $f_2 = 0,002 \text{ м}^{-2}$, $f_{\text{ЭПА}} = 0,0004 \text{ м}^{-2}$). Очевидно, что этот результат обусловлен учетом только наиболее рельефных положительных и отрицательных форм поверхности, а остальная территория распознавалась преимущественно в качестве переходных позиций микрорельефа, соответствующих зональным условиям почвообразования.

Сопоставление повторяемости ЭПА и элементов 1, 2, 3 (рис. 15) свидетельствует о недостаточном учете воздействия относительно пологих экстремальных форм, которые не распознаются при таком варианте параметров. При промежуточных значениях m, n, l, k, λ, g установлен прирост корреляции формы поверхности и элементов почвенного покрова.

В зависимости от значений m, n, l, k, λ, g характер распознавания был различным. Однако при $m+n=2; l+k=2; \lambda=0,25; g=0,03$ взаимосвязь рассматриваемых признаков существенна ($r=0,49-0,56$) для всех почвенных ключей. Ее уровень не снизился и на ключе 2, для которого ранее, в случае непосредственного использования геодезических отметок при расчете корреляции, достоверность взаимосвязи не была установлена. Характерно совпадение порядков повторяемости форм микрорельефа и ЭПА ($f_1=0,006 \text{ м}^{-2}, f_2=0,007 \text{ м}^{-2}, f_3=0,011 \text{ м}^{-2}, f_{\text{ЭПА}}=0,013 \text{ м}^{-2}$).

Получено уравнение

$$P_2 = 0,24 + 0,89 N, \quad (7)$$

где P_2 — условный номер почвы (табл. 11);

N — условный номер элемента формы поверхности (рис. 15), который указывает на приуроченность почв сухой степи к элементам микрорельефа при распознавании последних по характеру взаимовлияния.

Поэтому методика расчета формы была использована для вычисления корреляции строения поверхности с солевым и водным режимами. Однако здесь ее положительное воздействие на характер сходимости данных зафиксировано лишь для ключа 2 (прирост уровня корреляции от $r=0,08$ до $r=0,50-0,61$).

На ключах 1 и 3 расчетные r несколько снизились, а для режима влажности в слое 0—120 см и химизма засоления в слое 40—80 см это снижение было значительным (с $r=0,84$ до $r=0,51$).

По нашему мнению, причина такого результата заключается в узком наборе значений факторного признака (три уровня), что сужает возможность применения рассматриваемого метода.

Он эффективен при характеристике весьма вариабельной поверхности (ключ 2) для оценки ее воздействия на результирующий признак. Согласно данным топоъемки, поверхность ключей 1 и 3 удовлетворительно аппроксимируется кривой типов 1 и 2 (рис. 14). Поэтому при описании их свойств более удобен частный вариант расчета с применением геодезических отметок, поскольку такой факторный признак имеет значительный набор уровней дискретизации (через 2,5 см), сопоставимый с характером данных, отражающих почвенные параметры.

Однако в обоих случаях при аппроксимации сложных природных закономерностей вариабельности почв сухой степи линейными уравнениями (2)—(5) получены удовлетворительные по уровню статистической достоверности результа-

ты, что является подтверждением правомерности перехода к изучению пространственно-географического аспекта формирования почвенного покрова сухой степи.

Как известно, повышение степени полинома при поиске взаимосвязи данных часто обеспечивает повышение уровня корреляции:

$$\varphi = a_0 + a_1 \alpha + a_2 \alpha^2 + a_3 \alpha^3,$$

где φ — аппроксимирующая реальный параметр функция;

α — аргумент (факторный параметр);

a_0-a_3 — коэффициенты.

Варьирование значениями a_0-a_3 позволило повысить уровень статистической достоверности по сравнению с зависимостями (2), (5).

При этом режим влажности на ключевых участках характеризуется уравнением

$$G_2 = 15,4 - 28,7 (z-z_0) + 0,8 (z-z_0)^2 - 59,4 (z-z_0)^3, \quad (8)$$

где G_2 — влажность в слое 0—120 см.

Распределение d по ключевым участкам: $d_1=0,48; d_2=0,05; d_3=0,60$.

Засоление слоев 0—100 и 40—80 см описывается следующими зависимостями:

$$M_3 = 0,68 + 2,96 (z-z_0) - 0,70 (z-z_0)^2 + 26,8 (z-z_0)^3; \quad (9)$$

$$M_4 = 0,79 + 2,04 (z-z_0) - 0,42 (z-z_0)^2 + 39,2 (z-z_0)^3, \quad (10)$$

где M_3 — сухой остаток в слое 0—100 см, %; M_4 — сухой остаток в слое 40—80 см, %.

Распределение d по ключевым участкам 1, 2, 3: $d_1=0,56; d_2=0,08; d_3=0,74$.

Для аппроксимации химизма засоления в слое 40—80 см (M_5) и приуроченности почв (P_2) получены уравнения:

$$M_5 = 2,45 - 6,84 (z-z_0) - 0,91 (z-z_0)^2 - 34,5 (z-z_0)^3; \quad (11)$$

$$P_2 = 1,39 - 3,56 (z-z_0) - 0,22 (z-z_0)^2 - 21,7 (z-z_0)^3. \quad (12)$$

Характерно, что для ключа 2, форма поверхности которого, как указывалось, весьма сложная, повышение порядка полинома при описании почвенных параметров уравнениями (8)—(12) не дало положительного эффекта. Аналогично случаю использования линейной зависимости значения d лежат за пределами достоверности взаимосвязи.

На ключе 3 зависимости (8)—(12) позволили, наоборот, повысить уровень достоверности по сравнению с зависимостями (2)—(7) от $d=0,35-0,71$ до $d=0,52-0,74$. Наконец,

для ключа 1 применение уравнений (8) — (12) обусловило их дифференциальность d по сравнению с уравнениями (2) — (7).

Применение разработанного нами метода анализа реципипентно-донорных отношений между компонентами поверхности в сочетании с расчетом по полиному третьей степени обусловило иные результаты. Получены следующие уравнения:

$$G_3 = 29,8 - 2,34 N - 0,03 N^2 - 1,46 N^3; \quad (13)$$

$$M_6 = -0,02 + 0,08 N + 0,01 N^2 + 0,03 N^3; \quad (14)$$

$$M_7 = 7,40 - 1,31 N + 0,07 N^2 - 0,11 N^3; \quad (15)$$

$$P_3 = 0,27 + 0,61 N - 0,10 N^2 + 0,11 N^3, \quad (16)$$

где G_3 — влажность в слое 0—120 см;

M_6 — сухой остаток в слое 0—100 см;

M_7 — химизм засоления в слое 40—80 см;

P_3 — условный номер почвы (табл. 10).

Использование уравнений (13) — (16) обусловило рост уровня достоверности по сравнению с зависимостями для этих значений, полученных из уравнения (7). Одновременно зарегистрирована близость коэффициентов детерминации для всех ключей ($d=0,44—0,51$), тогда как согласно линейным уравнениям изменчивость для одного и того же параметра лежала $|r|=0,07—0,84$. Отзывчивость аппроксимирующей способности метода анализа формы поверхности на повышение порядка полинома связана с тем, что он более соответствует природным закономерностям вариабельности почвенного покрова, чем характер геодезических отметок.

Однако этот вывод не совсем обоснован для ключа 3, где с использованием уравнений (8) — (12) были получены более высокие коэффициенты корреляции ($|r|=0,76—0,91$), чем по уравнениям (13) — (16) ($|r|=0,57—0,73$). Результат несколько противоречит объективным закономерностям трехмерного массообмена в почвенном слое каштановой природно-климатической зоны, которые вскрыты модельным экспериментом в настоящем разделе. В связи с этим была выполнена количественная оценка степени соответствия геодезических отметок сопряженным формам поверхности посредством расчета корреляции между рядами z_i (табл. 10) и соответствующих номеров формы (рис. 15). На ключе 3 взаимообусловленность рассматриваемых параметров была высокой ($d=0,92$), на ключе 1 — существенно ниже ($d=0,41$), а для ключа 2 зарегистрировано отсутствие взаимосвязи ($d=0,06$). Значение $d=0,92$ показывает, что превышение уровня достоверности уравнений (8) — (12) над зависимостями (13) — (16) на ключе 3 вызвано тем, что поверхность этого ключа является частным ва-

риантом формы с преобладанием однородной пространственной изменчивости (рис. 14).

Таким образом, на основании выполненного анализа заполнения почвенно-географического пространства классификационными единицами таксономической системы установлено, что интенсивное пространственное варьирование параметров почвенного покрова сухой степи закономерно. Определяющее значение в формировании структурной целостности типичной почвенной комбинации каштановой зоны юго-востока Ростовской области состава (солончаковатый солонец, зональная каштановая почва, лугово-каштановая почва) принадлежит особенностям организации дневной поверхности. Согласно зависимостям (2) — (16) соотношение элементов формы поверхности определяет реципипентно-донорный тип взаимодействия ЭПА, поэтому специфической региональной чертой является пространственная неоднородность гидрологического режима. Возникающий при этом массообмен в почвенном слое в сочетании с процессами ассоциации ионов в почвенных растворах приводит к особому характеру миграции и аккумуляции легкорастворимых солей. Между структурными единицами почвенной комбинации формируется достаточно тесная двусторонняя генетическая взаимосвязь. Одновременно складываются предпосылки для стабилизации дифференциации почвенных параметров за счет устойчивого осолонцевания выпуклых элементов поверхности под воздействием постоянного бокового поступления Na^+ к микроповышениям.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что работы по окультуриванию солонцовых почв следует выполнять не только с целью изменения морфологических и физико-химических параметров компонентов почвенного покрова, как это практикуется, но и для преодоления природного характера реципипентно-донорных отношений между структурными единицами почвенно-географического пространства сухой степи. В последнем случае будет устранено воздействие рассматриваемого механизма генетической взаимосвязи. Таким образом, вероятность реставрации отрицательных агрофизических свойств каштановых комплексных почв исключается. Более того, новый характер генезиса ЭПА почвенной комбинации (Сп, К, Кл) при соблюдении требуемой пространственной однородности обеспечит устойчивость трансформации СПП в направлении гомогенизации.

1.3. Моделирование мелиоративного процесса — инструмент изучения природы солонцеобразования

В настоящее время пространственную вариабельность свойств солонцовых почв считают подчиненной закону нор-

мального распределения и проводят расчеты с использованием интеграла вероятностей [67]:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt. \quad (17)$$

Выполнение таких расчетов тесно связано с природой объекта. Так, при характеристике однородных в пространстве почв для получения достоверных результатов необходим сравнительно небольшой объем выборки. Однако в случае изучения параметров солонцовых комплексных почв объем выборки данных порядка 20—80 на каждом участке опробования дает статистически недостоверный результат. Поэтому следует оценивать массивы значительно больших объемов, что вызывает резкое увеличение расчетных размеров выборки и требует выполнения громоздких вычислений.

Итак, основное требование к полевым исследованиям — соблюдать принцип дискриминации в отборе образцов. В результате вскрывается характер рендомизированных в пространстве факторов, но не учитывается возможность взаимовоздействия строения поверхности и изученных в ее пределах параметров.

Математически это часто выражается в асимметрии кривой распределения, а иногда и в значительном усложнении ее формы. Несовпадение формы реального и теоретического распределения вероятностей приводит к тому, что такой вариант выборки исходных данных воспроизводится зависимостью (17) со значительными дефектами [81, 83, 137]. Поэтому применение типовых приемов здесь недопустимо.

Кроме того, через особую форму кривой распределения часто проявляется определенная закономерность изучаемого параметра, не учтенная при исследованиях. В этом случае стандартный прием обработки такой выборки согласно типовому минимальному набору математических зависимостей дает искаженный результат. Такое утверждение основано на том, что авторы при рассмотрении вопросов, связанных с генезисом и мелнирацией солонцовых почв, отмечают определенную тенденцию закономерной пространственной изменчивости проявления некоторых физико-химических и морфологических свойств почв [176]. Поэтому точки зрения на формирование комплексности почвенного покрова в условиях сухой степи часто далеки друг от друга или противоречивы [174, 207]. Это связано с тем, что при статистической характеристике элементов почвенного покрова предполагается их группировка по признаку принадлежности к определенному классу вариационного ряда, а при поиске упомянутых пространственных закономерностей варьирования используются

иные приемы. Специфика подхода в последнем случае заключается в том, что для исследования привлекаются отдельные результаты, по мнению авторов, наиболее полно раскрывающие суть явлений. В результате реализации такого подхода Б. А. Зимовцом [109] получены данные, свидетельствующие о важной роли перераспределения влаги по микрорельефу в условиях комплексного почвенного покрова светло-каштановой зоны. Автор подчеркивает, что варьирование глубины промачивания в рассматриваемых условиях является существенным фактором осолонцевания и засоления повышенный микрорельефа и связано с боковым перемещением почвенных растворов между смежными почвами, интенсивность которого определяет уровень осолонцевания за счет поступления иона Na^+ . Индикатором процесса считается преобладание иона Cl^- в составе водной вытяжки из подсолонцового горизонта микроповышений.

В работе [196] солонцеватость каштановых почв Ергенинской возвышенности также связывается с перераспределением влаги между смежными в пространстве почвами. Однако, по мнению авторов, основное значение имеет не поверхностное перераспределение влаги, которое в рассмотренном выше случае было определяющим фактором, а внутрипочвенный перенос влаги в виде гравитационного тока по наклонному водонепроницаемому солонцовому горизонту. Указывается, что в процессе выпадения атмосферных осадков или при полве резкий перепад коэффициента водопроницаемости по профилю солонцовой почвы приводит к формированию слоя полного насыщения в элювиальном горизонте солонца. Поэтому почвенный раствор, обогащенный легкорастворимыми солями из солевых аккумуляций на небольшой глубине, характерных для рассматриваемых почв, под воздействием гравитационного потенциала влаги движется в направлении смежных почв. Направление миграции не совпадает с линиями наибольшего ската дневной поверхности. Более того, указывается, что в связи со сложной конфигурацией водупорных слоев иногда возникает противоположная ориентация миграции и уклона поверхности.

Таким образом, краткий анализ двух точек зрения на природу микрокомплексности солонцовых почв каштановой и светло-каштановой зон свидетельствует о том, что учет пространственного взаимодействия между смежными почвами дает новую информацию о генезисе этого сложного объекта почвенных мелнираций. В отличие от статистического метода, это позволяет понять характер процессов, однако не дает сведений о возможности экстраполяции полученных данных. Лимитирующим фактором является очевидная многовариантность разрабатываемых гипотез. Одна из них предполагает

поступление солей к солонцу, а другая, наоборот, его засоляющее и осолонцовывающее воздействие на окружающие почвы.

Такое противоречие свидетельствует о том, что для адекватной характеристики микрокомплексности учет пространственного взаимодействия в пределах почвенного слоя недостаточно ограничиваться поиском генетических взаимосвязей между почвами на материале некоторых отчетливо сопряженных контуров. В связи с чрезвычайной природной сложностью проявления различных закономерностей в почвах каштановой зоны это может дать взаимоисключающие результаты. Необходимо использовать приемы количественного описания, которые в то же время не должны рендомизировать анализируемые в эксперименте факторы (в противном случае будут получены обычные генерализованные параметры, не содержащие необходимой информации о причинах взаимообусловленности данных). По нашему мнению, для исключения субъективного фактора, который существенно искажает результаты даже на качественном уровне оценки, при статистическом расчете характера почвенного покрова необходимо рендомизировать не расчетные параметры, а только способ оценки их результирующего воздействия на тот или иной почвенный процесс, влияние на взаимообусловленность параметров пространственных элементов почвенного покрова.

Количественная характеристика взаимосвязи параметров почвенного покрова и микрорельефа с использованием математических методов в разд. 1.2 позволила установить статистически достоверную синхронную изменчивость определяющих свойств профилей почв, изученных на ключевых участках каштановой зоны, и особенностей их приуроченности к отдельным элементам микрорельефа.

Однако недостаток изложенного подхода заключается в том, что отсутствует механизм учета формирования конкретных параметров. Проведенные нами вычисления базировались на статистических рядах, которые сопрягались при расчетах случайным образом, независимо от соответствующих им реальных параметров, выбираемых априорно. Поэтому такой подход можно рассматривать лишь в качестве первого приближения при количественной оценке особенностей СПП сухой степи [139]. В связи с этим целью наших исследований является математическое моделирование факторов дифференциации почвенного покрова с использованием количественных закономерностей влагопереноса в почвах.

Основным условием формирования параметров дискретных ЭПА является характер режима увлажнения. В настоящее время предложены многочисленные качественные града-

ции его типов и способ количественного описания на основе квазилинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка со многими независимыми переменными и действительными коэффициентами [224].

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (a_{ij} u_{x_i}) x_j + \sum_{i=1}^n b_i u_{x_i} + cu + f = 0 \quad (a_{ij} = a_{ji}), \quad (18)$$

где a, b, c — функции независимых переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$;

$$u_{x_i x_j} = \partial^2 u / \partial x_i \partial x_j, \quad u_{x_i} = \partial u / \partial x_i.$$

При математическом описании процессов влагопереноса наибольшее распространение получили уравнения параболического типа, именуемые в математической физике уравнениями диффузии, или теплопередачи, в связи с близостью физической сущности этих явлений и способа математического выражения (18).

Применительно к гидрогеологическим расчетам форма такой зависимости выражается следующим образом [186]:

$$-\partial \Theta / \partial t = \partial (K_w \partial \psi / \partial z - K_w) / \partial z, \quad (19)$$

где Θ — объемная влажность;

K_w — коэффициент влагопереноса;

t — временная координата;

ψ — потенциал почвенной влаги;

z — пространственная координата в направлении переноса.

Необходимо отметить, что уравнение (19) дает удовлетворительные результаты лишь для относительно слабозасоленных почв и грунтов, где величина сухого остатка и тем более качественный состав ионов существенно не воздействуют на характер влагопереноса, так как на K_w накладываются ограничения, учитывающие только узкий набор почвенно-гидрогеологических констант, к тому же генерализованных на достаточно обширном массиве. Для K_w применяется, как правило, экспоненциальная зависимость от Θ [37, 45, 54, 162, 185, 199], не всегда учитывающая специфику изменчивости этих параметров в связи с варьированием физико-химических и физических свойств почвенного профиля.

Поэтому в природной обстановке каштановой зоны почвообразования в связи с характером засоления зоны аэрации применение зависимости такого вида при описании процессов влагопереноса требует обоснования. Это обусловлено вероятностью расхождения расчетных параметров и реальных распределений влажности по почвенному слою. Это расхождение будет тем значительнее, чем интенсивнее проявляется воздействие не учтенных уравнением (20) факторов, в частности, трехмерной пестроты засоления, бокового перераспре-

деления масс между смежными почвами и т. п. Очевидна необходимость расчета динамики солевого режима почв. Для этого часто используют «уравнение конвективной диффузии», которое во многих случаях дает удовлетворительные результаты при описании коррелирующих с динамикой процесса влагопереноса особенностей миграции солей в профиле засоленных почв [44, 150, 201, 220, 235]:

$$\epsilon \partial c / \partial t + Q \partial c / \partial z = \epsilon D^* \partial^2 c / \partial z^2, \quad (20)$$

где ϵ — доля порового пространства в общем объеме;
 c — концентрация мигранта;
 Q — расход мигранта через единичную площадку, перпендикулярную направлению z ;
 D^* — коэффициент конвективной диффузии.

В уравнении (20) учтены конвективный массовый поток мигранта (сумма солей), молекулярная диффузия в проточной зоне, порождающая макроскопический поток массы мигранта, гидродинамическая дисперсия и массообмен застойной и проточной зон порового пространства посредством введения единственного, так называемого «коэффициента конвективной диффузии» [7, 13, 184], который интегрирует все перечисленные параметры. Высокая степень обобщения реальных параметров одним коэффициентом отрицательно сказывается на уровне приспособляемости моделей на основе уравнения (20) к конкретным условиям почвенного профиля. Поэтому необходимо экспериментальным путем проверять принимаемые для расчета значения [8, 163].

Кроме того, недостатком моделей, построенных с использованием уравнения (20), является осреднение параметров мигрантов, что допустимо в случае идентичности их физико-химических характеристик. Предполагается аналогия воздействия процесса переноса для разнообразных ионов почвенного раствора.

В связи с различным характером взаимодействия присутствующих в почвенном растворе ионов с твердой фазой подобное упрощение не всегда возможно [8, 175]. Так, вряд ли возможно осреднять совместную миграцию ионов Na^+ и Ca^{2+} , характер которой будет в решающей степени зависеть от свойств почвенного раствора, особенностей состава ионов в ППК по элементам зоны миграции. Поэтому уравнения (20) можно применять только при расчете переноса в профиле легких почв, с ограниченной емкостью обмена, которая слабо влияет на ионный состав мигранта. В этом случае уравнение (20) упрощается и принимает вид

$$\epsilon \partial c / \partial t = -Q \partial c / \partial z, \quad (21)$$

так как с увеличением скорости миграции значение конвек-

тивного члена Q возрастает, а влияние процессов диффузионного характера D^* , наоборот, сводится к бесконечно малым величинам второго порядка.

Установлено, что уравнение (20) дает хорошее соответствие предсказанных комплексной моделью (КМ) и измеренных распределений по профилю одного несорбирующегося мигранта [184]. Этот подход для одного сорбирующегося мигранта с линейной изотермой сорбции применим не всегда. Наконец, при миграции двух конкурирующих ионов такая КМ лимитируется характером изотермы обмена.

Особенности сорбции твердой фазой, обменные реакции в почвенном поглощающем комплексе, процессы осаждения и растворения солей и т. п. определяют поливариантность способов и интенсивности миграции различных ионов. Эти процессы объединяются термином подвижности ионов [174, 182], применяемым именно к специфическим условиям почвенного профиля. В связи с этим правильный выбор способа описания солепереноса растворов разной подвижности в реальной системе, которая характеризуется значительной застойной зоной, возможен только на основе многошаговой процедуры моделирования. При этом особое значение приобретает селекция расчетных параметров, прорабатываемых индивидуально для конкретной КМ.

В настоящее время разрабатываются КМ, описывающие засоление или осолонцевание почв, которые в зависимости от назначения подразделяются на две группы [76, 184]. Первую группу образуют модели, разрабатываемые для целей мелиоративного прогнозирования, причем балансовые слои и интервалы расчета баланса имеют конечную протяженность, а зависимости для статей баланса носят, как правило, эмпирический характер.

Вторая группа — модели, в которых мощность балансовых слоев и интервал расчета баланса дискретизируются таким образом, что при описании соотношений модели возможен предельный переход к зависимостям в виде дифференциальных уравнений физико-химической гидродинамики дисперсных систем. Модели последней группы не всегда пригодны для долгосрочного прогнозирования засоления, однако позволяют детализировать практически любые почвенные микропроцессы [44, 45].

Чаще всего разрабатываемые для описания миграции влаги и солей в почвах модели первой и второй групп формируются в рамках гипотезы одномерности. Одна пространственная координата z принимается соответственно достаточно четко выраженным направлениям макроскопической миграции растворов [7, 8, 76, 186]. В частности, для опытов на колонках, монолитах, при промывках в естественных условиях

ось z вертикальна. Распределение параметров в плоскости сечения не рассматривается из-за их низкой изменчивости в этом направлении, что и является единственным обоснованием гипотезы одномерности. В таком случае основой для КМ миграции солей в почвах служит дифференциальное уравнение сохранения массы мигранта в жидкой фазе почвы:

$$\partial m_i / \partial t = -\partial J_i / \partial z + I_i, \quad (22)$$

где m_i — масса i -го мигранта в единице объема почвы;
 i — номер мигранта;
 J_i — поток массы мигранта в растворе в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к оси z ;
 I_i — масса мигранта, вносимая в поровый раствор единицы объема почвы в единицу времени.

Полагая, что, используя уравнение (22), возможно выполнить расчеты для многих типов почв. Проверка расчетов при опытах на почвенных колонках на основе гипотезы одномерности дает удовлетворительные по сходимости результаты [201].

Однако гипотеза одномерности обоснована лишь при ламинарности движения почвенных растворов и изотропном строении субстрата переноса по всем изученным параметрам [182, 241]. Положение о слабой вариабельности ослабляет это ограничение и, таким образом, обосновывает оценку отдельных элементов сечения зоны переноса

$$\iint_D g_i(y, x, p, m, k) dy dx = G_i, \quad (23)$$

где g_i — значение i -го параметра в пределах выбранного сечения вдоль оси z ;
 y, x — ортогональные направления в пределах сечения;
 p, m, k — параметры, доопределяющие функцию распределения;
 G_i — принимаемое в расчетах по одномерной КМ значение параметра.

По нашему мнению, этот подход малоинформативен относительно вариантов с отклонением одномерных задач от фиксированных априорных направлений при произвольной ориентации в пространстве оси предполагаемого переноса. Кроме того, имеет значение поперечный размер расчетной зоны переноса. Например, при колоночных опытах ее значение незначительно, что в сочетании с обычным использованием в экспериментах достаточно высоких значений термо-

динамического потенциала почвенной влаги позволяет сделать вывод о свободном поперечном обмене в почве опытной емкости. При этом значения p, m, k , определяющие особенности распределения отдельных мигрантов в сечении, оказываются близкими в пределах области D взятия двойного интеграла. Очевидно, что режимы миграции в отдельных элементарных трубках тока практически не отличаются. Поэтому использование уравнения (23) приводит к потере информации из-за отсутствия учета вида зависимости $g_i(y, x, p, m, k)$, которая отличается в рассматриваемых специфических условиях монотонностью.

Однако в реальных условиях необходимо принимать в расчет сопряженность профиля, для которого проводится математическое моделирование с другими смежными в пространстве почвами, что требует обязательной оценки допустимости применения выражения (23), а следовательно, и самой одномерной модели. Так, в работах [47—49, 96, 109, 117—122] показано, что зона аэрации и почвенный слой при выраженной микрокомплексности отличаются значительным разнообразием параметров. Это определяет характер зависимости $g_i(y, x, p, m, k)$ при каждом варианте реальной обстановки и, кроме того, влияет на выбор размеров области D , по которой проводят расчеты.

Естественно, что требование адекватности в таком случае приводит к необходимости принимать для расчетов обширный элемент, иначе существует риск промоделировать, например, весьма засоленные или, наоборот, слабозасоленные почвы, причем оба варианта могут оказаться нехарактерными. Однако при выборе широкой области и изолированном моделировании параметров отдельных элементов почвенного покрова малых поперечных размеров с последующим обобщением данных одномерные модели для описанных условий имеют дефект, обусловленный допущением (23). В действительности это выражение может исключить из рассмотрения массообмен в пределах поперечника расчетной зоны (обширная D) или через стенку элементарной трубки тока (малая D). В каждом варианте это будет обусловлено тем, насколько сильно дискретные значения $g_i(y, x, p, m, k)$ отличаются от генерализованного G_i . Иногда в результате интенсивности природной вариабельности возможно формировать такие градиенты g_i , которые вызовут в почвенном слое процессы переноса по своему результату более значимые, чем учтенный моделью поток мигранта только в направлении z .

На основе данных, содержащихся в работе В. В. Егорова [92], формирование ареалов засоленных почв с «аномальным» чередованием солей по профилю (максимум Cl^- выше максимума SO_4^{2-}) при комплексном почвенном покрове в сухой

степи определено механизмом бокового поступления легко-растворимых солей к микроповышениям. Автор полагает, что этот же процесс является фактором устойчивости осолодцевания, характерного для региона. Данные наблюдений на реальных почвах каштановой зоны и проведенный нами анализ математических зависимостей, описывающих сечение зоны переноса при одномерном моделировании миграций по почвенному слою, свидетельствуют о том, что необходимо учитывать характер пространственного распределения отдельных параметров в процессе описания изменчивых комплексных почв.

Такую точку зрения подтверждает характер общепринятой оценки трехмерной изменчивости параметров почвенного слоя, моделируемого балансовым методом. Как указывалось, вне зависимости от конкретного варианта этого метода, расчеты ведутся для слоев, дискретизированных по вертикали. Очевидно, что для каждого из методов полагают справедливой средневзвешенную объемную оценку отдельных параметров (S_i) почвенного профиля следующим образом:

$$\iiint V S_i(x, y, z, p, m, k) dx dy dz = S_i, \quad (24)$$

где S_i — функция трехмерного распределения i -го компонента в жидкой (или твердой) фазе почвы в пределах балансного слоя;
 x, y, z — пространственные координаты расчетного элемента;
 p, m, k — параметры засоления.

На основе зависимости (24) может быть получена лишь статическая пространственная характеристика, поскольку невозможно учесть специфику распределения S_i как вероятного фактора трехмерной дифференциации параметров. Математическое моделирование особенностей почвенного покрова охватывает процессы переноса, которые, как известно, являются основными факторами эволюции того или иного почвенного индивида. Эти процессы по каждому компоненту, подверженному миграции, в общем виде можно охарактеризовать выражением для потока векторного поля через поверхность

$$\sum_{i=1}^n \left(\iint_{\sigma} F_i n d\sigma \right) = \sum_{i=1}^n \iiint_{\sigma} (X_i dy dz + Y_i dx dz + Z_i dx dy), \quad (25)$$

где F_i — значение i -го вектора в точке поверхности σ ;
 n — единичный вектор нормали к поверхности σ ;
 X_i, Y_i, Z_i — компоненты i -го вектора на осях координат.

С точки зрения почвенных исследований вектор F_i следует принимать в качестве движущей силы процесса переноса i -го

мигранта в пределах почвенного слоя через любую поверхность выбранной ориентации σ и перисилиндрической или направленной. Правая часть уравнения (25) отражает тот же процесс, только с использованием ортогональной системы координат.

Одномерный вариант математической модели, как правило, строится на зависимостях типа (25). Обычно рассматривается единственная пространственная координата, т. е. в расчет берется только одно слагаемое из правой части уравнения (25). Выражение принимает вид

$$\iint_{\sigma} F_i n d\sigma = \iint_{\sigma} Z_i dx dy, \quad (26)$$

поскольку на основании гипотезы одномерности

$$\iint_{\sigma} Y_i dx dz = \iint_{\sigma} X_i dy dz = 0,$$

что определяет отсутствие переноса через стенку вертикальной гидравлической трубки тока. Подобная схематизация при математическом моделировании комплекса факторов, формирующих актуальную СПП сухой степи, позволяет установить только доминирование процесса накопления или, наоборот, выщелачивания солей, исходя из расчетного вертикального распределения и изменения ионного состава компонентов по профилю. Тем не менее характер моделируемого объекта в реальной обстановке не позволяет сделать обоснованного априорного вывода относительно правомерности выражения (26). При рассмотрении особенностей комплексных солонцовых почв каштановой зоны сухой степи в связи с особенностями их параметров необходимо учитывать в равной степени три слагаемых правой части уравнения (25).

Анализ использования математических выражений (19), (20), (24) — (26) для описания массопереноса в пределах трехмерной толщи почвогрунта применительно к условиям сухой степи показывает, что основным условием для получения адекватных почвенному покрову региона комплексных математических моделей влагопереноса, засоления и осолодцевания требуется переход от общепринятых одномерных вариантов к рассмотрению двух- и трехмерных задач. Данные экспериментов, в которых установлены эмпирические зависимости между важнейшими свойствами элементарных почвенных ареалов (ЭПА) в зоне каштановых почв и особенностями их локализации в пределах почвенно-географического пространства [119, 135, 227], свидетельствуют о необходимости такого перехода. С учетом приведенных математических зависимостей первоочередное значение приобретают данные о

существенном горизонтальном взаимодействии ЭПА. Следует полагать, что учет горизонтального распределения легкорастворимых солей даст сведения об эффективности факторов, регулирующих солевой режим и солевой баланс в почвенном покрове исследуемого участка или территории.

Обоснуем переход от одномерного варианта КМ к двумерному при моделировании гидрологического режима рассматриваемой структуры с учетом микрорельефа. Для этого в первом приближении следует задать поверхность в виде массива геодезических отметок, адаптированных так, что средняя плоскость имеет отметку 0,00 м. Возможно аналоговое представление в виде

$$H = f(x),$$

где H — геодезическая отметка;

x — горизонтальная координата поверхности расчетного продольного профиля.

Этот прием оценивает воздействие строения поверхности на формирование особенностей пространственного режима увлажнения. Однако, согласно закономерностям гидравлики, для получения такой информации необходимо охарактеризовать рассматриваемую поверхность с точки зрения интенсивности воздействия формирующихся на ней линий наибольшего ската на объем и скорость перераспределения поверхностного микростока. Иначе отсутствует критерий оценки рассматриваемого явления и в его математическое описание вносится неопределенность. В частности, если поверхность практически не сопротивляется движению жидкости, то результирующее распределение атмосферной (снеговой, оросительной) влаги очевидно и без использования математических закономерностей. Это такое состояние, при котором вся влага окажется в микропонижениях, а остальные элементы приобретут нулевое промачивание. Наоборот, при большом сопротивлении стоку, когда для его формирования необходимы значительные градиенты напора (уклоны поверхности), наиболее характерен монотонный в пространстве режим увлажнения. Тогда для реального объекта следует ввести интегральное представление коэффициента шероховатости поверхности:

$$N = 1/n \sum_{i=1}^n \{x, p, m, k\}. \quad (28)$$

При этом нами сделано предположение о промежуточной вариабельности индивидуальных коэффициентов шероховатости n по равномерно дискретизированному n элементам ΔX поверхности. Оперируя N , интенсивностью выпадения осадков p и скоростью впитывания K , можно получить сле-

дующую зависимость для результирующего распределения влаги по расчетной поверхности:

$$h_i = a_1 \{ a_2 (0,5 - H_p/K)^{\frac{3}{2}} + a_3 (0,8 - H_i/K^{\frac{1}{2}}) + \exp(a_4 (2,5 - H_i)/N) \} \int_0^{\tau} \rho dt, \quad (29)$$

где $a_1 - a_4$ — постоянные коэффициенты;

τ — продолжительность выпадения осадков.

Выражение (29) позволяет проводить вычисления слоя влаги, поступающего на отдельный участок поверхности в зависимости от высоты этого участка H_i относительно нулевой плоскости расчетного элемента ($X_1 - X_2$) дневной поверхности. Кроме того, выражение (29) учитывает усиление дифференциации промачивания при увеличении интенсивности поступления влаги на поверхность. При этом на одинаковых по форме участках перераспределение влаги между положительными и отрицательными элементами существенно зависит от водопроницаемости почвы. Причем на участках, где этот параметр выше, пространственные различия глубины промачивания сглаживаются. Критерием качества аппроксимации для зависимости (29) принято выражение

$$\sum_{i=1}^n [(h_i \Delta x) - \int_{x_1}^{x_2} \int_0^{\tau} \rho dt dx] / \int_{x_1}^{x_2} \int_0^{\tau} \rho dt dx = \lambda \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty \quad (30)$$

где x_1, x_2 — линейные координаты поверхности почвы в начале и конце расчетного участка;

n — число элементарных участков Δx на отрезке $x_1 - x_2$.

Зависимость (30) показывает, что объем влаги рассчитан-

$$\sum_{i=1}^n (h_i \Delta x),$$

ный на основании значений h_i , полученных для элементов Δx , должен незначительно отличаться от формирующего дискретные h_i количества атмосферных осадков (оросительной воды, поданной с помощью дождевания) за расчетный период времени (0— τ)

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_0^{\tau} \rho dt dx.$$

Значения, определенные по уравнениям (29) и (30), использовали для расчета двухмерного распределения влаги по моделируемому профилю ($x_1 - x_2$) в последующий после τ пе-

риод. Для этого при достижении времени $\tau+1$ (через 1 сут. что примерно соответствует известному периоду относительной стабилизации почвенной влаги после завершения гравитационного вертикального стекания) задавался режим эвапотранспирации из-под элемента поверхности согласно зависимости:

$$AT_0\Delta x/\ln(|\psi^n|+e) \{1+1,5[(n-1)/d]^2\}=T_j^n, \quad (31)$$

где A , d — параметры, принимаемые по каждому варианту расчета расхода влаги;

T_0 — уровень транспирации (потенциальной);

j — номер конечно-разностного слоя по оси Y (рис. 17).

Выражение (31) учитывает, что в связи с уменьшением концентрации корней растений с глубиной (Y) снижается потребление влаги [113, 168].

При влажности прекращения движения влаги в жидкой форме и при влажности, превышающей полевою влагоемкость, обычно преобладает вертикальный перенос [5, 208, 217, 219]. В первом случае это обусловлено преобладанием вертикальных градиентов температуры и упругости пара. Во втором случае основное значение приобретает перемещение влаги под действием градиента гравитационного потенциала.

Однако в связи с существенной неоднородностью h_i обобщенное заключение о поведении почвенной влаги при промежуточных значениях ее содержания затруднительно [240, 246]. Поэтому для описания процесса миграции влаги по поч-

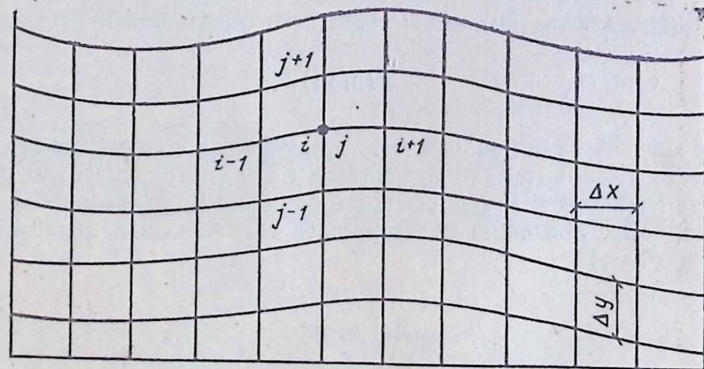


Рис. 17. Конечно-разностная сетка для расчета влагопереноса в опытной емкости

венному слою при неполном насыщении в обсуждаемой КМ принята следующая система уравнений:

$$T_{ij}^n = AT_d\Delta x/\ln(|\psi_{ij}^n|+e) \{1+1,5[(n-1)/d]^2\}; \quad (32)$$

$$-(\Theta_j^{n+1} - \Theta_j^{n-1})/2\Delta t = \Lambda[\beta\psi_j^{n+1} + (1-2\beta)\psi_j^n + \beta\psi_j^{n-1}]K_{wy}^o - T_{ij}^n; \quad (33)$$

$$V_{yi}^n \cdot \Delta y = K_{wj}^n (\psi_j^n - \psi_{j-1}^n); \quad (34)$$

$$K_{wj}^n = K_\phi \exp(-\alpha\psi_j^n); \quad (35)$$

$$(\Theta_j^n - \Theta_m)/(\Theta_0 - \Theta_m) = \exp(-\gamma\psi_j^n); \quad (36)$$

$$-(\Theta_i^{n+1} - \Theta_i^{n-1})/2\Delta t = \Lambda[\beta\psi_i^{n+1} + (1-2\beta)\psi_i^n + \beta\psi_i^{n-1}]K_{wx}^o - T_{ij}^n; \quad (37)$$

$$V_{xi}^n \Delta x = K_{wi}^n (\psi_i^n - \psi_{i-1}^n). \quad (38)$$

где i , j , n — номера узлов конечно-разностной сетки (рис. 17);

α , γ — эмпирические константы;

V_y , V_x — скорость миграции;

K_ϕ — коэффициент фильтрации;

Θ_0 — влажность полной влагоемкости;

Θ_m — влажность прекращения движения воды в жидкой форме;

β — параметр, позволяющий изменять точность вычислений [224].

$$\Delta\psi = [a(\psi, t_n)\psi_y]_y, \quad a(\psi, t_n) = 2K_{wj-1}^n K_{wj}^n / (K_{wj-1}^n + K_{wj}^n);$$

$$K_{wy}^o = (K_{wj+1}^n - K_{wj-1}^n)2\Delta y;$$

$$\psi_y = (\psi_{j+1}^n - \psi_{j-1}^n)/2\Delta y.$$

Уравнения (37), (38) описывают перенос в направлении оси x . По своей структуре они аналогичны зависимостям (33), (34). Двухмерное решение получено посредством чередования в программе вычислений по указанным зависимостям.

Граничные условия приняты в виде

$$\begin{aligned} V_{y_{y=0}} &= \Delta h_i/\Delta t & t < \tau+1 \\ \Theta_{y=0} &= \Theta_m & t \leq \tau+1 \end{aligned}$$

Начальное условие

$$\Theta_{t=0} = \Theta_m.$$

Уравнения (33) и (37) представляют собой конечно-разностный аналог уравнения влагопереноса для расчетов на сетке с шагом Δx , Δy , Δz . В первом приближении значения коэффициента влагопроводности в узлах конечно-разностной сетки полагались подчиненными одному из простых способов выражения этого параметра по уравнениям (35), (36) через объемную влажность Θ и потенциал почвенной влаги ψ с учетом особенностей почвы (α , γ) [45, 184, 252, 254, 255].

В результате вычислений получены данные о двухмерном распределении термодинамического потенциала почвенной влаги в пределах расчетного элемента x_1 — x_2 поверхности. Установлено, что особенности строения микрорельефа сухой степи, учтенные соотношениями (29), (31), существенным образом сказываются на результатах расчета.

Варианты вычислений по системе уравнений (32) — (38) для различных исходных a_1 , a_2 , a_3 , N , α , γ позволили оценить изменчивость результатов, характеризующих режим влажности в зависимости от того, какие свойства предполагаются у моделируемого почвенного массива.

В частности, упомянутый выше вариант расчета h_1 , который при больших значениях N приводил к нивелированному увлажнению поверхности, при обработке согласно системе уравнений (32) — (38) дал практически стереотипное распределение ψ по любому сравниваемым вертикальным профилям участка x_1 — x_2 . Подобный результат получен и при назначении высокого K_f . Обсуждаемые варианты имеют простую интерпретацию. Здесь по разным причинам зафиксировано минимальное перераспределение влаги и, следовательно, ее однообразное распределение по вертикальному профилю в расчетном пространстве. Однако эти экстремальные варианты для условий почвенного покрова каштановой зоны нехарактерны. При больших значениях N формирование растительного покрова необходимой густоты для устранения поверхностного стока невозможно в условиях сухого климата. Назначение высоких K_f предполагает наличие у почв высокой водопроницаемости, что не соответствует почвообразующим породам региона.

Остальные варианты были получены в результате изменения K_f , Θ_0 , Θ_m . При этом расчетные значения термодинамического потенциала отличались не только зарегистрированной в предыдущих вариантах вертикальной изменчивостью, но и зависели от горизонтальной координаты в пределах профиля. При этом характер дифференциации h_1 по элементам Δx обуславливал особенности влагопереноса, которые, согласно учтенным закономерностям, заключаются в существенном проявлении, а иногда (некоторые варианты) и в преоб-

ладании горизонтальных градиентов потенциала почвенной влаги.

Для характеристики этого явления по полученным данным были проведены расчеты с целью идентификации направлений миграций влаги в двухмерном случае. Использованы известные зависимости для нахождения ортогональных траекторий эквипотенциальных линий. Семейство эквипотенциалов элемента x_1 — x_2 образовано линиями, описывающими расположение в двухмерном пространстве однопараметрического семейства кривых

$$u(x, y) = \Delta\psi n,$$

где u — уравнение эквипотенциали;

x, y — координаты;

$\Delta\psi$ — фиксированная разность термодинамических потенциалов почвенной влаги на смежных эквипотенциалах;

$\Delta\psi n$ — значение потенциала на данной эквипотенциали [137];

n — номер эквипотенциали в пределах расчетного участка.

Ортогональными траекториями к семейству эквипотенциалов почвенного слоя являются гидравлические линии тока, в направлении которых, согласно расчету, происходит влагоперенос. Уравнения линий тока находят из дифференциального уравнения эквипотенциали

$$F(x, y, dy/dx) = 0$$

с учетом того, что между угловыми коэффициентами касательной к эквипотенциали линии dy/dx и перпендикулярного к ней направления касательной к линии тока dy_T/dx существует соотношение

$$dy/dx = -1/(dy_T/dx).$$

Дифференциальное уравнение ортогональных траекторий (в нашем случае — линий тока) представлено следующим образом:

$$F[x, y - 1/(dy_T/dx)] = F(x, y, dy_T/dx) = 0. \quad (39)$$

На основе зависимости (39) с использованием результатов расчета по системе уравнений (32) — (38) был получен массив данных, характеризующий эквипотенциали почвенной влаги и гидравлические линии тока (направление миграции) для моделируемого каштано-солонцового комплекса сухой степи. В большинстве вариантов эти линии можно графически охарактеризовать следующим образом: эквипотенциали под отрицательными (относительно средней плоскости) элемен-

тами поверхности близки по форме к параболе с отрицательным экстремумом, а под положительными — имеют подобную форму, но ветви кривой более пологие, и она обращена выпуклостью вверх. Под промежуточными позициями микро-рельефа для эквипотенциалей характерен существенный наклон. Соответственно линии тока берут начало в расчетном слое под отрицательными элементами и характеризуются такой направленностью, что некоторые из них имеют тенденцию выхода к поверхности на элементах с нулевыми или близкими к нулю геодезическими отметками. Остальные линии тока заканчиваются на небольшой глубине под положительными элементами поверхности.

Использование системы уравнений (32) — (38) для моделирования фактора формирования режима влажности почвенного слоя в зоне каштановых почв с учетом двухмерного перераспределения влаги позволяет получить новую информацию о проявлении процессов влагопереноса, которая свидетельствует о комбинации процессов вертикального и горизонтального массопереноса. Особенность их сочетания под индивидуальными участками поверхности коррелирует с изменчивостью дневной поверхности в случае расчета ее увлажнения по зависимости (29) при соответствующем выборе a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , N . Очевидно воздействие характера поверхности на формирующийся под ней режим почвенной влажности, что подтверждает обоснованность введения второй пространственной координаты при моделировании этого влияния.

В процессе влагопереноса в каждом элементе объема устанавливается динамическое равновесие содержания элементов и ионов в твердой и жидкой фазах. На этой основе возможно рассчитать параметры солепереноса, сорбции и ионообмена в ППК вдоль линий тока, что позволит выяснить результирующее, относительно стационарное распределение компонентов в двухмерном пространстве.

Моделируемая обстановка, кроме охарактеризованного зависимостями (32) — (38) режима влажности, отличается важным значением характера миграции и аккумуляции легкорастворимых солей в связи со значительным засолением почвенного слоя как существенной региональной черты сухих степей. Для моделирования солевого режима использовали массив данных, описывающий характер линий тока в двухмерном случае. В связи с этим соответствующий фрагмент системы уравнений КМ, характеризующий солеперенос, записывается следующим образом:

$$\epsilon \partial c_i / \partial t = q \partial c_i / \partial l + \epsilon D_i \partial^2 c_i / \partial l^2, \quad (40)$$

$$\partial c_{in} / \partial t = D_i \partial^2 c_i / \partial n^2, \quad (41)$$

где q — конвективный перенос вдоль трубки тока;
 $\partial / \partial l$ — производная вдоль линии тока;
 $\partial / \partial n$ — производная по эквипотенциали.

В отличие от одномерных КМ возможно увеличить степень приближения к реальным процессам посредством учета пространственной неоднородности влагосолепереноса, определяемой видом гидродинамической сетки. Так, уравнение (40) записано для линии тока, а уравнение (41) — для эквипотенциали. В первом из них конвективный перенос устанавливался для элементарной трубки тока соответственно принятой площади ее сечения и полученным по зависимостям (34), (38) значениям скорости миграции в жидкой фазе. Второе уравнение системы наряду с первым учитывает процессы диффузионного характера, однако уже в направлении n , перпендикулярном к линиям тока, и характеризует только обмен между смежными элементарными трубками. Таким образом, выбранная нами система уравнений (40), (41) позволяет описать специфику солевого режима комплексного почвенного покрова с учетом криволинейности изолиний термодинамического потенциала почвенной влаги. Нами сделана попытка учесть влияние ассоциации ионов на дифференциацию их подвижности. Для этого предусматривалось варьирование индивидуальных D_i в соответствии с данными о подвижности ионов [8, 23, 163, 174], что повысило аппроксимирующую способность математической модели.

Для проведения расчетов уравнения (40), (41) были представлены в конечно-разностной форме. Вычисления выполнялись на сетке с шагом Δt , Δl (Δn) с поочередным использованием этих зависимостей. Кроме того, в каждом узле конечно-разностной сетки проводился анализ соотношения фаз по известным уравнениям материального баланса для элемента объема. Учитывалось двухмерное соотношение между компонентами миграции и аккумуляции, C_i . Этот расчет был основан на термодинамических константах равновесия и изотермах ионного обмена и выполнялся согласно зависимостям, которые приводят М. Б. Минкин, А. П. Ендовицкий и др. [153, 154], Я. А. Пачепский, Е. В. Мироненко, Е. Г. Моргун, А. А. Поинзовский [184], К. Дараб, М. Редли [76].

Первоначально граничные и начальные условия для элементарной трубки тока принимались однородными. Такое предположение соответствует представлениям многих авторов, занимающихся исследованиями комплексного почвенного покрова, о его однообразной в пространстве исходной засоленности в качественном и количественном отношении. На основании данных, получаемых из системы уравнений (32) — (38), по исходу момента времени τ установлены циклы расчета параметров (25 дней по системе уравнений (40) — (41)),

учитывающие соотношения материального баланса и продолжительность сухого периода.

Обычно распределение отдельных компонентов C_i в конце цикла было близким к установившемуся, т. е. заданный зависимостью (32) режим расхода влаги с поверхности и из почвы определял интенсивность замедления расчетного массового переноса.

Граничные и начальные условия каждого последующего цикла расчета солепереноса при выбранном варианте режима влажности принимались аналогичными распределению мигрантов, полученному на конец предшествующего этапа.

Оценка качества аппроксимации при моделировании комплексного почвенного покрова системами уравнений (32) — (38), (40), (41) с учетом уравнений материального баланса выполнена по массивам расчетных данных и соответствующим реальным свойствам элементов поверхности. Использованы натурные данные, полученные при изучении ЭПА каштановой зоны юго-востока Ростовской области микропрофильным методом в пределах ключевых участков. Эти данные отобраны методом рендомизации из общего объема выборки, полученной при изучении статистических закономерностей формирования СПП сухой степи [119]. В процессе выбора натурных данных для исключения субъективного фактора при идентификации модели было обеспечено условие дискриминации.

Количественная проверка выполнена по минимуму критерия качества аппроксимации:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - C_i/C_i)^2}, \quad (42)$$

где N — число данных массива;

C_i — наблюдаемое значение i -го параметра;

$\bar{C}_i$ — расчетное значение i -го параметра.

Коэффициенты корреляции между экспериментальными и теоретическими значениями были получены из соотношения для пяти микропрофилей

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \bar{C}_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \sum_{i=1}^N \bar{C}_i}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N \bar{C}_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N \bar{C}_i)^2][\sum_{i=1}^N C_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N C_i)^2]}} \quad (43)$$

Значения d 0,26—0,38 (профили 1—3) показывают слабую связь расчетных и реально наблюдаемых данных. Кроме того, на двух оставшихся микропрофилях значение d было ниже 0,25, т. е. модель массопереноса оказалась недостоверной.

Следующий шаг моделирования уточняет зависимости, составляющие систему уравнений математической модели. В частности, для расчета коэффициента влагопроводности в узлах конечно-разностной сетки было использовано уравнение (36). При обосновании закономерностей переноса влаги, моделируемого по системе уравнений (32) — (38), нами было указано, что зависимость (36) не учитывает пространственной изменчивости свойств субстрата переноса. Однако при вычислениях по уравнениям (32) — (38), (40), (41) на первом шаге моделирования установлена существенная дифференциация количества поглощенного Na^+ (I_{Na}) в двухмерном расчетном пространстве. Поэтому на втором шаге моделирования расчеты скорректировали введением коэффициента $t = \text{Ixp}(- (I_{\text{Na}} + I_{\text{Mg}}) \cdot 0,024)$ в уравнение (36), который учитывает снижение влагопроводности почвы при повышении уровня ее солонцеватости.

В результате второй шаг моделирования позволил получить достоверные данные о соответствии модифицированной модели пяти микропрофилей, причем значения коэффициента $d=0,31—0,47$ были выше, чем в первом случае. Улучшение аппроксимирующей способности модели в результате корректирования параметров свидетельствует о ее перспективности.

Аналогичный результат получен при расчетах влагопереноса по разработанной КМ для опытной емкости, в которой моделировалась пространственная неоднородность условий почвообразования сухой степи. На втором шаге моделирования зафиксировано близкое распределение расчетных и на-

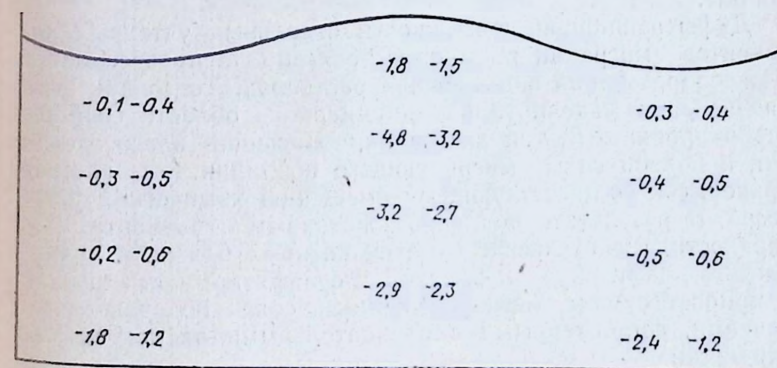


Рис. 18. Термодинамический потенциал почвенной влаги в опытной емкости (схема): цифры справа — расчетное значение; слева — наблюдаемое

блюдаемых значений термодинамического потенциала почвенной влаги (рис. 18).

Проведем анализ отдельных параметров, зафиксированных в расчетах и наблюдаемых на почвенных микропрофилях (табл. 13). Результаты моделирования двухмерного увлажнения, формирующегося в почвенном слое солонцовых комплексов, показывают, что специфичностью переноса является преобладание горизонтального перераспределения влаги между почвами, соответствующими противоположным по относительной высоте элементам поверхности. Согласно гидродинамической сетке под отрицательными элементами поверхности преобладают нисходящие движения почвенной влаги, которые постепенно сменяются горизонтальным переносом под нулевыми отметками, и, наконец, под повышенными участками возникают локальные восходящие токи влаги.

Такой характер переноса в сочетании с изменчивостью термодинамического потенциала почвенной влаги и варьированием ионной силы раствора вдоль расчетных гидравлических линий тока определяет метаморфизацию состава почвенного раствора в направлении миграции, размер и особенности химизма засоления отдельных элементов почвогрунта.

В частности, почвы отрицательных элементов поверхности, а также смежные зоны, в которых отмечается влияние перераспределившейся по поверхности $H=f(x)$ избыточной влаги, отличаются высокими значениями потенциала ψ ($pF=1,8$) и малой ионной силой раствора. При этом, согласно химическим закономерностям, учетным нами в уравнениях материального баланса, практически все компоненты почвенного раствора характеризуются значительной подвижностью.

Дифференциация подвижности отдельных учтенных компонентов миграции во многом связана с процессом комплексообразования в почвенных растворах. Тогда как зонам разбавления моделируемой двухмерной области свойствен гидрокарбонатный тип засоления, изменение влагосодержания и ионной силы мигрирующего по линии тока раствора приводит к соответствующему смещению химических равновесий. В результате под промежуточными элементами поверхности, геодезические отметки которых близки к нулю, в расчетах зафиксирован близкий к сульфатному тип химизма и прирост суммы легкорастворимых солей по сравнению с почвами, сопряженными с отрицательными элементами поверхности.

Специфический результат зафиксирован для вертикального почвенного профиля на положительных элементах поверхности. Здесь расчетная ионная сила почвенного раствора достигала высоких значений. В связи с этим в прилегающей

Таблица 13
Фрагмент результатов расчета по двухмерной КМ массопереноса в зоне аэрации солонцовых комплексных почв и соответствующие натурные параметры

Элемент конечного разностного массива по оси Y, см	Расчетные параметры				Данные по почвенному микропрофилю					
	pF	G	μ	Cl/SO ₄	e _{Na} , %	pF	G	μ	Cl/SO ₄	e _{Na} , %
H = +0,20 м										
0-5	3,6	0,22	0,069	0,4	4	3,2	0,12	0,038	0,3	6
10-15	3,8	0,25	0,121	0,5	10	3,9	0,20	0,092	0,4	12
20-25	4,0	0,29	0,153	0,6	23	4,2	0,34	0,180	0,7	19
50-55	4,4	1,08	0,386	1,4	11	4,0	0,87	0,401	1,6	10
70-75	4,3	1,06	0,504	1,3	6	3,7	1,34	0,468	1,2	7
110-115	4,1	1,1	0,417	0,9	—	3,6	1,07	0,513	0,8	—
155-160	3,9	1,02	0,342	0,6	—	3,6	0,96	0,435	0,5	—
H = 0,00 м										
0-5	3,3	0,13	0,023	0,2	2	3,2	0,15	0,060	0,2	5
10-15	3,4	0,20	0,050	0,3	6	3,3	0,23	0,044	0,2	6
20-25	3,5	0,31	0,092	0,5	10	3,3	0,29	0,057	0,4	9
50-55	3,7	0,49	0,219	0,8	10	3,4	0,53	0,153	0,5	8
70-75	3,6	0,81	0,262	0,7	5	3,3	0,71	0,301	0,6	1
110-115	3,4	0,93	0,251	0,5	—	3,2	1,01	0,320	0,4	—
155-160	3,7	0,80	0,215	0,4	—	3,4	0,90	0,285	0,3	—
H = -0,30 м										
0-5	2,8	0,08	0,011	0,4	2	2,8	0,14	0,015	0,3	—
10-15	2,6	0,10	0,008	0,4	1	2,3	0,13	0,014	0,3	—
20-25	2,1	0,1	0,014	0,4	2	2,1	0,21	0,011	0,2	4
50-55	1,8	0,10	0,019	0,4	3	1,9	0,25	0,017	0,4	4
70-75	2,0	0,12	0,024	0,5	—	1,6	0,16	0,020	0,4	—
110-115	2,3	0,12	0,041	0,5	—	1,8	0,16	0,028	0,3	—
155-160	2,6	0,19	0,060	0,5	—	1,5	0,16	0,067	0,5	—

Примечание. Y — для натуральных данных — глубина взятия образцов; pF = $lg \psi/\psi_0$; G — сухой остаток, %; μ — ионная сила почвенного раствора; e_{Na}, % — процент поглощенного натрия в ППК; H — высота поверхности относительно нулевой плоскости сравнения.

к таким участкам зоне ощутимую способность миграции сохраняют лишь самые подвижные ионы. Во-первых, это связано с общим снижением скорости миграции (V_x , V_y) вдоль трубки тока согласно зависимостям (34), (38); во-вторых, обусловлено сочетанием этого фактора с режимом эвапотранспирации; в-третьих, подвижность ионов определенного вида, особенно в растворах со столь значительной ионной силой (табл. 13), является функцией комплексообразования, характер аккумуляции в рассматриваемой зоне отличается преимущественным накоплением ионов Na^+ и Cl^- , которые практически не связываются в комплексы.

Наряду с дифференциацией засоления по элементам почвенного покрова горизонтальный солеперенос определяет двухмерное варьирование полученного по уравнениям изотерм многокомпонентного обмена количества поглощенного натрия (e_{Na}). Расчетная доля Na^+ в почвенном поглощающем комплексе была наибольшей на глубинах 20—50 см под положительными элементами поверхности. Это связано с описанными особенностями метаморфизации почвенного раствора, когда в концевых участках трубки тока ион Na^+ приобретает практически внеконкурентную способность внедрения в ППК, поскольку его количество в составе катионов преобладает, что зависит от особенностей процессов ионообмена. Согласно принятой в наших исследованиях изотерме обмена

$$K_{\text{Na}, \text{Ca}} = I_{\text{Na}} \cdot C_{\text{Ca}}^{1/2} \cdot f_{\text{Na}} / C_{\text{Na}}^{1/2} \cdot f_{\text{Ca}}, \quad (44)$$

где $K_{\text{Na}, \text{Ca}}$ — константа обмена;
 $I_{\text{Na}}, I_{\text{Ca}}$ — количество поглощенного катиона;
 $C_{\text{Na}}, C_{\text{Ca}}$ — количество катионов в растворе;
 $f_{\text{Na}}, f_{\text{Ca}}$ — соответствующие коэффициенты активности, при снижении влажности увеличивается сорбция иона Na^+ в сравнении с Ca^{2+} .

Подтверждением такой точки зрения является характер изменчивости соотношения Cl/SO_4 в моделируемой области, максимум которого зафиксирован на глубинах 40—80 см под выпуклыми участками поверхности, что доказывает о преобладании иона Cl^- , а следовательно, и Na^+ .

Существенным фактором расчетной солонцеватости положительных и промежуточных по высоте элементов является то, что принятый в модели процесс эвапотранспирации по уравнению (31) в сочетании со слабым увлажнением (h_1) рассматриваемых позиций приводит к локальным восходящим миграциям почвенных растворов. Их характер подчинен процессу метаморфизации состава мигранта. В связи с этим возможно интенсивное воздействие иона Na^+ на состав погло-

щенных катионов и, таким образом, на другие параметры большей части почв в пределах конкретного участка поверхности, на котором моделируют условия сухой степи.

Следует отметить, что массивы расчетных данных для некоторых 25-дневных циклов отражают тенденцию процессов миграции, которые следует полагать подчиненными воздействию существенных градиентов химического потенциала. Направление этих градиентов противоположно массопереносу вдоль линий тока. Это подтверждает точку зрения некоторых авторов о засолении профиля зональных каштановых почв под влиянием солевых аккумуляции смежных в пространстве солончаковых солонцов [196, 195]. Однако следует иметь в виду, что такое ослабление влияния конвективного члена q зависимости (40), как правило, возможно при низких значениях ψ , когда движение мигрантов замедлено. При свойственном каштановой зоне мехсоставе почв, характере миграции и аккумуляции солей массоперенос под действием градиента химического потенциала будет иметь подчиненное значение.

Кроме того, зафиксирована тенденция перераспределения гравитационной влаги в горизонтах 0—30 см положительных элементов поверхности в направлении промежуточных позиций, характеризующихся высокими расчетными значениями потенциала ψ в этом слое по сравнению со смежными и нижележащими горизонтами. Такая направленность отмечена для варианта модели, полученного на втором шаге итерации, где учитывалось снижение K_w при повышении солонцеватости. Это согласуется с данными [196], поскольку процессу переноса сопутствует диффузионное обогащение мигрирующего раствора ионом Na^+ из слоев 30—50 см как механизма осолонцевания почв, расположенных поблизости микроповышений. Следует учитывать, что сущность этого процесса полностью обусловлена основным массопереносом, идентифицированным с помощью разработанной модели.

Критерии качества аппроксимации модели, использованные в расчетах в виде $H=f(x)$ микропрофили, были взяты из материалов, полученных в результате статистического анализа параметров почв сухой степи.

Как указывалось, почвы ключевого участка имеют следующие особенности. Солонцы характеризуются содержанием обменного натрия в ППК 14—20%, наличием солевого горизонта хлоридного химизма засоления на глубине 30—70 см, типичными отрицательными агрофизическими свойствами и слабым увлажнением. Установлено, что чередование солей по профилю этих почв имеет ярко выраженный «аномальный» (согласно терминологии В. В. Егорова [92]) тип: максимум отношения Cl/SO_4 приходится на глубину, соответ-

ствующую первому солевому горизонту (подсолонцовый слой), а ниже по профилю возрастает доля сульфатного иона. Каштановые почвы также отличаются солонцеватостью, однако обладают значительно лучшими, чем солонцы, агрофизическими свойствами. Солевые аккумуляции здесь располагаются ниже по профилю, значение сухого остатка и отношение Cl/SO_4 меньше, чем в соответствующих горизонтах солонцов. Однако в некоторых случаях на фоне общего сульфатного или хлоридно-сульфатного химизма засоления, свойственного каштановым почвам, зарегистрирована тенденция прироста Cl/SO_4 с приближением к дневной поверхности. Наконец, лугово-каштановые почвы характеризуются опресненным профилем гидрокарбонатного химизма и в результате существенного увлажнения имеют густой растительный покров и довольно значительную гумусированность.

Анализ расчетных данных для отдельных элементов поверхности свидетельствует о сопряженности модели второго шага расчета и объекта моделирования. Приведенная характеристика отдельных почвенных индивидов, локализованных на специфических позициях микрорельефа, показывает значительную согласованность их параметров и соответствующих значений, полученных в расчетах для сходных элементов поверхности.

Соответствие, установленное на основании расчета коэффициентов детерминации, кроме того, подтверждается тем, что изложенные особенности распределения размеров и типов химизма, промоделированных и соответствующих им по высотному признаку реальных почвенных профилей, с точки зрения общепринятой качественной характеристики почвенных процессов имеют одинаковую природу. Таким образом, с помощью разработанной нами математической модели формирования почвенной микрокомплексности возможно выявить важнейший механизм формирования специфических свойств почв каштановой зоны.

Полученные данные позволяют определить некоторые направления оптимизации КМ пространственно-неоднородного почвенного покрова. В частности, необходимо учитывать влияние растительности на характер увлажнения посредством введения функциональной зависимости коэффициента шероховатости поверхности от высотного положения точки.

Как следует из приведенных данных, причиной глубокой пространственной изменчивости параметров отдельных ЭПА рассматриваемого региона является особый механизм двусторонней генетической взаимосвязи между почвами, локализованными на смежных позициях микрорельефа. Природа этого механизма обусловлена перераспределением атмосферных осадков и искусственно подаваемой влаги по поверх-

ности в связи с особенностями водопроницаемости почв каштановой зоны. Однако она является причиной интенсивного переноса вещества от микропонижений к микроповышениям в почвенно-грунтовой слое, что в сочетании со свойственной региону засоленностью зоны аэрации вызывает устойчивое, не зависящее от грунтовых вод засоление и осолонцевание выпуклых элементов микрорельефа, а частично и промежуточных позиций.

На этом основании рассматриваемая ПК с точки зрения представлений о СПП по генетико-геохимическому содержанию входит в разряд структур водно-миграционного характера перемещения масс между элементами СПП с дифференциацией по увлажнению и минеральному составу. Кроме этого, она дефинирована в пределах семейства автоморфных, дифференцированно-солонцово-засоленных комбинаций и принадлежит к генетико-геохимической серии структур, обусловленных геоморфологическим строением (микрорельефом) со сложной микроструктурой пятнистого характера [227].

Проведенные нами исследования, в которых при изучении солонцовых комплексов учтено двухмерное распределение почвенных параметров, свидетельствуют об основополагающей роли СПП в формировании, развитии и поддержании региональной солонцеватости почв. Однако в настоящее время при изучении этих почв и проектировании их мелиорации принимаются во внимание лишь морфологические и физико-химические особенности почвенного профиля отдельных ЭПА. При этом не учитываются пространственные особенности взаимодействия почв и исход мелиоративных мероприятий, обоснованных для конкретного ЭПА почвенной комбинации, для всей ПГС является неопределенным.

Таким образом, результаты наших исследований свидетельствуют о том, что успешная работа по мелиорации солонцовых комплексных почв возможна на основе данных о СПП, которые могут быть адекватно охарактеризованы только с использованием КМ массопереноса в зоне аэрации.

2. СОВРЕМЕННЫЕ АГРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕЛИОРАЦИИ

Солонцы и солонцовые почвы на территории СССР расположены в самых различных климатических, гидрогеологических и гидрохимических условиях. Они различаются между собой по режиму увлажнения, составу поглощенных катионов, мощности гумусового горизонта, глубине залегания карбонатов, гипса, количественному и качественному составу водорастворимых солей. Однако все они имеют низкое естественное плодородие, обусловленное наличием на определен-

ной глубине от поверхности (от 3 до 20 см) особого иллювиального горизонта с неблагоприятными агрономическими показателями: тяжелым механическим составом, низкой фильтрационной способностью, высокой набухаемостью и липкостью при увлажнении, большой твердостью, слитостью в сухом состоянии.

Солонцы встречаются чаще всего пятнами среди зональных почв (черноземов, каштановых, бурых, сероземов). Размер пятен может быть от нескольких квадратных метров до гектара и больше. Доля участия солонцов в комплексе с другими почвами составляет до 30—50% и выше.

Наличие пятен солонцов в пашне затрудняет своевременность проведения полевых работ (из-за неравномерности физического созревания поля) и резко снижает урожай. Ежегодный недобор зерна со всей площади пашни на солонцовых землях составляет не менее 3 млн т.

Около 80% солонцовых земель используется под сенокосы и пастбища. Продуктивность их очень низкая. С таких угодий в лучшие по увлажнению годы получают 2—3 ц/га, реже — 3—5 ц/га сена многолетних трав. Качество сена плохое, себестоимость высокая.

Солонцовые почвы в пределах мелноративных районов разнообразны по типу водного и солевого режима, содержанию поглощенного натрия, пептизируемости, мощности генетических горизонтов, содержанию гумуса, карбонатов и гипса, механическому составу, гомогенности пахотного слоя, по характеру использования и другим признакам. Различные сочетания указанных признаков создают множество комбинаций солонцовых почв с различными свойствами неодинакового мелноративного значения. Учет особенностей всех возможных комбинаций ограничивается числом известных мелноративных приемов: химическим, агротехническим и комплексным. Поэтому освоение солонцовых почв в настоящее время базируется на принципах интеграции до определенного уровня различных комбинаций свойств солонцов в целях эффективного применения современных приемов коренной мелиорации этих земель.

Мелноративная группировка солонцовых почв проводится на основе генетической их классификации с учетом особенностей мелноративного района, характера комплексности почвенного покрова и типа сельскохозяйственных угодий.

Выбор наиболее эффективного метода определяется физико-химическими особенностями солонцов и условиями проведения мелиораций (орошение, богара).

2.1. Агротехнические мелиорации и новые орудия для их осуществления

В настоящее время известно несколько способов основной обработки при мелиорации солонцовых почв.

1. Трехъярусная вспашка с оставлением на месте верхнего гумусированного горизонта.

2. Плантажная вспашка с оборотом пласта.

3. Вспашка с оборотом пласта на глубину гор. А с доуглублением до 40—45 см плугом с почвоуглубителями.

4. Безотвальное рыхление до глубины 30—50 см по методу Т. С. Мальцева или чизельными плугами, а также стойкой СиБИМЭ.

Трехъярусная вспашка с оставлением на поверхности гумусового горизонта и перемешиванием солонцового и карбонатного проводится на глубину 40—50 см. Мощность карбонатно-солевого горизонта, вовлекаемого в пахотный слой этими плугами, должна быть равной мощности солонцового, но не менее 10—15 см.

Ввиду того, что солонцы имеют морфологические различия и на мелиорируемом поле могут встречаться несколько их видов, глубина вспашки уточняется в каждом конкретном случае. Правильно установленные корпуса каждого слоя обеспечивают качественную пахоту. Верхний надсолонцовый горизонт обрабатывается корпусом первого слоя, оборачивается и укладывается на поверхности. Корпус второго слоя, идущий вслед за первым, подрезает, крошит и сбрасывает на дно борозды третьего корпуса плотный солонцовый горизонт. Корпус третьего слоя, смещенный вправо на ширину захвата, подрезает карбонатный горизонт, поднимает его и укладывает поверх солонцового, частично перемешивая их. По такой технологической схеме выполнялась мелноративная вспашка плугом ПТН-40, агрегатируемым с трактором класса ОМ тяги 3. Производительность агрегатов не превышала 1,0—1,5 га за смену, пашня получалась гребнистой, глыбистой, частично утрачивался плодородный слой почвы.

Двухъярусная вспашка может выполняться плугами ПТН-40, ПТН-3-40 в двухъярусной наладке. При переналадке плуга ПТН-40 на двухъярусную вспашку с него снимают корпус второго слоя, а на его место устанавливают корпус третьего слоя с укороченным отвалом.

Двухъярусные плуги могут выполнять пахоту:

с оставлением верхнего гумусированного слоя почвы с глубиной до 20 см на поверхности и перемешивание нижележащих слоев на глубину до 40—45 см с оставлением их в борозде;

с заделкой верхнего слоя почвы в нижний; с подъемом и

укладкой на поверхность без оборота нижнего слоя. Такие схемы применяются для обработки почв с обесструктуренным верхним слоем.

Плантажная вспашка выполняется плугами ППН-40, ППН-50, ППУ-50А и переоборудованными ярусными плугами ПТН-40, ПТН-3-40 на глубину до 45—50 см. Эта вспашка принципиально отличается от ярусной тем, что генетические горизонты перемешиваются, а верхний гумусовый горизонт сбрасывается при этом на дно борозды. Для его восстановления требуется длительный период.

Вспашка с оборотом пласта на глубину гумусированного горизонта с доуглублением до 40—45 см проводится плугами общего назначения с почвоуглубителями. Этот способ рекомендуется применять в комплексе с гипсованием. Он отличается от обычного тем, что одновременно с обработкой верхнего слоя подпахотный слой разрыхляется.

Безотвальное рыхление на глубину 30—50 см проводится по методу Т. С. Мальцева или чизельными плугами, а при их отсутствии — обычными плугами со снятыми отвалами на максимальную глубину. Такая обработка не обеспечивает качественное крошение солонцового горизонта. Она только разрушает твердые подпахотные слои, что облегчает последующую обработку плугами общего назначения на увеличенную глубину.

В настоящее время для выполнения мелиоративных вспашек промышленность выпускает трехсекционный плуг ПТН-3-40, агрегируемый с тракторами класса тяги 5—6. Производительность агрегатов составляет 5—6 га за смену.

Однако технология мелиоративной вспашки, выполняемая этим плугом, не полностью соответствует агротехническим требованиям. Нижние горизонты плохо крошатся и перемешиваются. Количество глыб размером более 10 см составляет 30—35%. Возрастание рабочих скоростей более 7 км/ч увеличивает вынос солонцов на поверхность поля до 30—50%. Наблюдается утрата плодородного слоя почвы в результате его просыпания в нижние горизонты.

В Ростовской области для повышения производительности мелиоративных вспашек в хозяйствах, в которых сохранились трехъярусные плуги ПТН-40 или их рабочие органы, применяют спаренные или строенные плуги этого типа для тракторов К-701.

Плуг состоит из рамы и трех корпусов первого, второго и третьего ярусов, двух опорных колес, подвески, включающей две стойки, гибкую тягу и кронштейны. Рама плуга изготовляется из элементов рам списанных плугов общего назначения и плугов ПТН-40. Колеса используют с этих плугов без изменения.

Конструкция предусматривает настройку плугов на пять различных технологических схем: трехъярусная с оставлением верхнего слоя на поверхности; двухъярусная с оставлением верхнего слоя на поверхности; двухъярусная с заделкой верхнего слоя на дно борозды, открытое корпусом третьего слоя; плантажная; трехъярусная с оставлением верхнего слоя на поверхности при вспашке со скоростью от 8 до 12 км/ч.

Многолетние научные и производственные исследования показали, что у рассмотренных мелиоративных плугов возникают отклонения от технологического процесса. В результате утрачивается часть гумусового горизонта (до 30%), а вынос солонцового на поверхность достигает 40%. Кроме того, поверхность пашни получается глыбистой и маловыровненной.

Совершенствование конструкции мелиоративных плугов позволит устранить указанные недостатки.

Ниже-Волжским НИИСХ предложена модернизация строенного плуга ПТН-40, заключающаяся в следующем [222]:

корпус первого яруса сдвигают в сторону пашни и устанавливают на одной линии с корпусом второго яруса;

на корпус первого яруса устанавливают удлиненный отвал ПМЕ 01.510;

расстояние от плоскости установки корпуса первого яруса до правого кронштейна навески должно быть не менее 600 мм.

Модернизация плуга позволяет работать по более совершенной технологии: при втором проходе орудия корпус третьего яруса приподнимает карбонатный горизонт и сдвигает его в сторону пашни, в то время как корпус первого яруса укладывает на него гумусовый горизонт, а корпус второго яруса подсыпает под него солонцовый горизонт. В результате на поверхности сохраняется до 90% гумуса, а вынос солонцового горизонта не превышает 10%.

Модернизированный плуг ПТН-3-40М может также работать по двухъярусной технологии с сохранением гумусного горизонта на поверхности, двухъярусной технологии с заделкой гумуса на дно борозды и плантажной технологии.

Модернизированный плуг ПТН-3-40А СКБ завода «Алтайсельмаш» имеет рабочие органы захватом 45 см и может комплектоваться по следующим схемам:

рабочими органами с рыхлителем перед корпусом третьего слоя;

отвальными корпусами, располагаемыми в секции фронтально;

скоростными рабочими органами.

По первой схеме корпуса первого, второго и третьего

слоев располагаются на одной линии по ходу плуга. При этом корпус первого слоя обрабатывает с оборотом пласта верхний гумусный горизонт на глубину 14—24 см и укладывает его на взрыхленный слой предыдущего прохода. Рыхлитель, установленный за корпусом первого слоя, подрезает солонцовый горизонт на глубину 9—19 см и взрыхляет его. Корпус второго и третьего слоев подрезает подсолонцовый горизонт на глубину до 45 см, рыхлит и перемешивает его с солонцовым горизонтом и оставляет в борозде.

По второй схеме корпуса первого, второго и третьего слоев располагаются в секции фронтально, со смещением на ширину захвата. Корпус первого слоя подрезает верхний слой почвы глубиной 13—28 см, который перемещается по отвалу в направлении корпуса второго и третьего слоев, опирается на пласт почвы, поднятый этим корпусом, и укладывается с оборотом на поверхности пашни. Корпус второго и третьего слоев подрезает солонцовый и подсолонцовый горизонты, рыхлит их, укладывает в борозду предыдущего прохода.

По третьей схеме корпуса первого, второго и третьего слоев устанавливают на одной линии действия по ходу движения плуга. Корпус первого слоя подрезает, рыхлит и оборачивает гумусный горизонт почвы глубиной 15—25 см и укладывает его на поверхность пашни (в борозду после корпуса второго и третьего слоев). Корпус второго и третьего слоев (скоростной) подрезает солонцовый и подсолонцовый горизонты на глубину до 45 см, рыхлит, перемешивает их и оставляет в борозде.

Всесоюзным НИИ зернового хозяйства предложен ярусный солонцовый плуг ПЯС-1,4, предназначенный для мелиоративной обработки целинных и распаханых (с ненарушенным гор. В₁) солонцовых почв без предварительной разделки дернины при сохранении на поверхности пашни верхнего плодородного слоя, крошения и перемешивания солонцового горизонта с карбонатным.

ПЯС-1,4 — навесной конструкции, агрегатируется с тракторами К-701 и К-701М. Плуг состоит из рамы с присоединительным треугольником, четырех черенковых ножей, четырех верхних и нижних плужных корпусов, опорного колеса с механизмом регулировки.

При работе плуга черенковый нож разрезает пласт и корневую систему верхнего плодородного слоя почвы в вертикальной плоскости впереди верхнего корпуса, который подрезает этот слой, поднимает его, крошит и смещает в сторону.

Нижний плужный корпус идет после верхнего корпуса в открытой от плодородного слоя борозде, рыхлит и перемешивает солонцовый и подсолонцовый горизонты.

Регулирование глубины обработки (до 45 см) с помощью механизма регулирования колеса, а верхних плужных корпусов — ступенчато, с помощью отверстий, расположенных на стойках. Ширина захвата — 1,4 м [189].

Применение плуга ПЯС-1,4 по сравнению с ярусным навесным плугом ПТН-3-40А снижает затраты труда на 14,6%, удельную материалоемкость — на 22,4%, прямые эксплуатационные издержки — на 14,6%. Годовой экономический эффект 902 руб. Проект оптовой цены 1037 руб.

Донским СХИ разработано и прошло испытания новое мелиоративное орудие ПС-3-40, которое проводит вспашку с оставлением гумусового слоя на поверхности и рыхлением нижележащих солонцового и карбонатного слоев с одновременным их перемешиванием [231].

Орудие состоит из рамы с опорными колесами, механизма навески и рабочих органов, устанавливаемых трехсекционно. Каждая секция представлена двумя плужными корпусами, первый из которых предназначен для обычной обработки верхнего слоя. Его конструкция аналогична конструкции корпуса плуга общего назначения. Корпус устанавливают на раме плуга с возможностью изменения (в зависимости от мощности гумусового слоя) его положения по высоте. Второй корпус устанавливают по следу движения первого и фиксируют на раме в одном положении, соответствующем максимальной глубине обработки.

Корпус состоит из опорной стойки, на которой смонтированы верхний отвал и лемех с левооборачивающей отвальной поверхностью, выполненной в виде наклонного цилиндра и закрепленной у бороздного обреза. К полевым доскам корпуса крепят правооборачивающие отвальные поверхности в виде горизонтальных цилиндров.

Технологический процесс обработки солонцовых почв орудием ПС-3-40 осуществляется следующим образом. При движении агрегата верхний гумусовый слой солонцовых почв обрабатывается передним плужным корпусом. Нижележащие слои (солонцовый и карбонатный) подрезаются лемехом, который разрыхляет их. При этом часть почвенного потока вступает на верхний отвал опорной стойки и отбрасывается им назад, вправо по ходу орудия. Другая часть потока направляется лемехом под углом вступления его к лезвию, попадает на левооборачивающую отвальную поверхность и отбрасывается ею на направление центрального потока и встречно направленного потока со стороны вырезного отвала. Почвенные потоки совмещаются и перемешиваются.

В результате проведенных испытаний на Зерноградской МИС установлена высокая степень перемешивания солонцо-

вого и карбонатного горизонтов без их выноса на поверхность.

Расчет экономической эффективности показывает, что применение орудия ПС-3-40 повысит производительность труда в сравнении с ПТН-3-40 на 12—15%. Окупаемость 1 руб. дополнительных затрат 1,43 руб.

Во Всесоюзном НИИЗХ в содружестве с СКБ завода «Алтайсельмаш» создан мелниоративный плуг ПМР-1,6М [189]. Плуг снабжен рамой, на которой установлены право- и левосдвигающие цилиндрические отвалы, предназначенные для отделения верхнего плодородного слоя от солонцового и формирования его в виде вала. Непосредственно за левосдвигающим отвалом расположены плужные корпуса, которые крошат и перемешивают солонцовый и карбонатный слои. В задней части плуга расположен лопастный метатель, предназначенный для разделяния и равномерного распределения плодородного слоя почвы, отделенного цилиндрическим отвалом, по обработанной плужными корпусами полосе.

Испытания этого плуга в сравнении с плугами ПТН-2-40 показали, что новое орудие значительно превосходит по качеству работы промышленные образцы машин.

Кроме орудий с пассивными рабочими органами, в последнее время большое внимание уделяется и активным.

Исследованиями установлено, что качество обработки солонцовых почв в соответствии с агротехническими требованиями наиболее полно обеспечивается машинами с активными или пассивными рабочими органами.

Поставлена на производство машина МСП-2 для обработки солонцовых почв активными рабочими органами с приводом от ВОМ трактора. Машина имеет раму с опорными колесами, глубокорыхлители-плоскорезы, два фрезерных рабочих органа, редуктор привода. Глубокорыхлители-плоскорезы разрушают почвенный слой на глубину до 40 см, активные рабочие органы проводят подпочвенное крошение и перемешивание солонцового и подсолонцового горизонтов с оставлением стерни на поверхности. Изготовитель — объединение «Целиноградсельмаш».

Для условий Казахстана, где плужные и другие пассивные рабочие органы почвообрабатывающих машин не обеспечивают требуемого крошения солонцов и сохранения надсолонцового слоя на поверхности, более эффективно применение машин, совмещающей обработку плоскорезными рабочими органами с дополнительным крошением и перемешиванием нижних горизонтов ротором. Образцы такого орудия разработаны Целинным НИИМЭСХ совместно с ГСКБ ПЭТ [221].

Машина в агрегате с трактором К-701 шириной захвата 2 м обрабатывает целинные солонцы в обычных условиях.

В особо тяжелых условиях орудие переоборудуется на ширину захвата 1,3 м, для чего машина снабжается сменным ротором. Проверка опытных образцов показала, что в процессе обработки степных и лугово-степных столбчатых солонцов машина обеспечивает крошение до 74%, перемешивание нижних слоев достигает 70%, а вынос солонца на поверхность не превышает 5%. В этих условиях показатели обработки плугом ПТН-2-40 были значительно хуже.

К солонцам, требующим для окультуривания агротехнического метода, относятся мало- и остаточноподзолистые автоморфные и полугидроморфные с залеганием карбонатов, а иногда и гипса выше 40 см.

Если такие солонцы занимают до 10—25%, то они могут быть улучшены периодическим применением глубокого безотвального рыхления на глубину 40—45 см в сочетании с глубокой отвальной вспашкой на 27—30 см и внесением навоза 40 т/га на солонцовые пятна.

На старопахотных и целинных средних и некоторых глубоких солонцах (<25% площади) предлагается трехъярусная вспашка. На корковых и мелких солонцах применяется плантажная вспашка. Необходимо проводить влагонакопительные мероприятия: посев кулис из горчицы или сорго, снегозадержание, парование, щелевание.

При мелниорации солонцовых комплексов с солонцами глубокими и средними, использование которых предполагается в полевых севооборотах, необходимо вносить азотно-фосфорные удобрения и навоз по 30—40 т/га.

Комплексы с солонцами глубокими и средними, занимающими от 25 до 50% площади, после их мелниорирования целесообразно включать в полевые севообороты, а при площади солонцов свыше 50% — в кормовые севообороты.

Комплексы, в которых средние и мелкие солонцы занимают 25—50% площади, необходимо использовать в полевые и кормовые севообороты, а если свыше 50% — то в кормовые и пастбищные севообороты.

2.2. Химическая мелниорация

Химический метод мелниорации необходимо применять в первую очередь на безгипсовых и глубокогипсовых хлоридных и сульфатно-хлоридных солонцах. В качестве мелниорантов следует использовать гипс, фосфогипс, глиногипс, серную и азотную кислоты, отходы промышленности. Вносить гипс и фосфогипс рекомендуется в паровое поле, где накапливается большое количество влаги. Многократная обработка паром обеспечивает хорошее перемешивание внесенного мелниоранта с солонцовым горизонтом почвы.

Вследствие различной глубины залегания солонцового горизонта целесообразны следующие способы внесения гипса (глиногипса) в почву на: глубоких солонцах и их комплексах — в один прием; средних солонцах и их комплексах — 3/4 нормы под основную вспашку, а 1/4 — после ее проведения под культивацию.

В условиях Ростовской области научными опытами и практикой сельскохозяйственного производства установлено, что гипсование степных солонцов каштановой зоны эффективно, если в год выпадает более 380—400 мм осадков. В районах, где осадков выпадает меньше, гипсование применяют при орошении.

Для обоснования норм внесения гипса следует учитывать, что половина поглощенного натрия (5—10%) в степных солонцах каштановой зоны неактивна. Поэтому предлагалось, что расчет дозы гипса (Г) в тоннах на гектар можно проводить на 50% содержания Na.

$$Г = 0,086 (PNa - 0,05E) \cdot H \cdot d,$$

где 0,086 — значение 1 мг-экв. гипса; PNa — содержание поглощенного натрия, мг-экв. на 100 г почвы; 0,05 — доля «неактивного» натрия; E — сумма поглощенных катионов, мг-экв. на 100 г почвы; H — мощность мелиорируемого слоя, см; d — плотность горизонта, г/см³.

Гипсованию солонцов на больших массивах способствует наличие в зоне каштановых почв области природных залежей гипса, получивших название глиногипсов.

Глиногипс представляет собой мелкокристаллический светло-серый порошок, содержащий 70—80% гипса. В разведанных месторождениях он имеет мощность от 0,8 до 1,5—2,0 и даже 3 м и залегает близко от поверхности (0,2—0,5 м), что позволяет вести добычу в открытых карьерах.

Другим важным химическим мелиорантом для окультуривания солонцов является фосфогипс.

Фосфогипс — тонкоразмолотый порошок с частицами диаметром не более 0,1 мм. В нем содержится 85—90% гипса, до 5% фосфорных соединений и до 1,5% различных микроэлементов. Влага в свежем фосфогипсе содержится 35—45%. При хранении в отвалах влажность его понижается до 20% [21]. В таком состоянии фосфогипс хорошо вносить разбрасывателями.

Особенностью фосфогипса является его кислая реакция. В связи с этим, вероятно, определенная роль в устранении солонцовых свойств почв при внесении фосфогипса принадлежит ионам водорода, присутствующим в его составе. К сожалению, в литературе нет сведений о доле участия ионов фосфора фосфогипса в обменных реакциях между мелиоран-

том и почвенным поглощающим комплексом (ППК). Характеризуя фосфогипс как кислый мелиорант, приводят значения pH, что, по нашему мнению, отражает лишь актуальную кислотность, т. е. присутствие свободных кислот — фосфорной, серной, кремниевой, кремнефтористой — и не позволяет объективно судить о количестве ионов водорода, способных перейти к акцептору.

Для зоны Северного Кавказа основным поставщиком фосфогипса является Невинномысское ПО «Азот». В отвалах этого объединения в настоящий момент накоплено около 3 млн т фосфогипса-дигидрата, который используется для мелиорации солонцов в Ставропольском крае, Азербайджанской ССР и Ростовской области. Водородный показатель этого фосфогипса 2,8—3,2, и, если рассматривать его кислотную основу с общепринятых позиций, то участие ионов водорода мелиоранта в нейтрализации почвенной щелочности и обменных реакциях с ППК представляется незначительным. Однако наряду с активной кислотностью фосфогипс проявляет буферные свойства, которые до настоящего времени не изучены. Буферные соединения, входящие в состав фосфогипса, по нашему мнению, прежде всего определяют его кислотную мелиорирующую основу. Поэтому величина буферной емкости является более необходимой характеристикой кислотности мелиоранта, чем pH.

М. Б. Минкиным и В. И. Корниенко [158] установлено, что фосфогипс обладает значительной буферностью, обусловленной различными соединениями, входящими в состав фосфогипса.

Для выяснения коагулирующей способности ионов водорода фосфогипса на суспензии солонцов авторами поставлен лабораторный опыт, в котором использовали кислый и нейтральный фосфогипс. Нейтральный фосфогипс был получен взаимодействием исходного мелиоранта с NH₄OH и последующим высушиванием в щадящем температурном режиме (t=60°C) для предотвращения структурных изменений гипса мелиоранта. Суспензии почв были приготовлены из образца степного малонатриевого солонца (поглощенный натрий составил 10% суммы обменных оснований) при отношении почва:раствор 1:2,5. Процесс коагуляции почвенных частиц изучали в стеклянных цилиндрах вместимостью 0,5 л. В цилиндры двух серий было внесено по 2, 3, 4 и 6 г из расчета на 1 кг почвы соответственно кислого и нейтрального фосфогипса. Суспензии тщательно перемешивали.

Скорость и полноту осаждения илстых частиц определяли по изменению оптической плотности верхнего слоя. Для этого пипеткой осторожно отбирали 0,1 л суспензии из верхней части цилиндра. Коагуляционная устойчивость суспензии

определялась турбодиметрическим методом, по осветлению суспензии.

Установлено, что водородные ионы фосфогипса заметно влияют на осаждение суспензии соленцов. Нейтрализация кислотности фосфогипса способствует снижению его коагулирующей способности. Действие 3 г кислого фосфогипса на суспензию солонца практически равноценно коагулирующему действию 4 г нейтрального фосфогипса. Это позволяет предположить, что доля участия ионов водорода в мелiorативном эффекте фосфогипса составляет около 0,25 от коагуляции, вызываемой непосредственно гипсом [138]. В настоящее время это обстоятельство не принимают во внимание при расчетах доз фосфогипса по вытеснению поглощенного натрия. Проведенные нами исследования показали, что с учетом присутствия ионов водорода в мелiorативном процессе расчетная традиционная доза фосфогипса может быть снижена приблизительно на 25%.

Очевидно, что определение эффективной дозы фосфогипса в каждом конкретном случае будет зависеть от его буферных свойств.

Для проверки этого факта изучены количественные зависимости катионного обмена при взаимодействии мелiorанта с поглощающим комплексом соленцов. С этой целью к 150 почвы добавили необходимое количество мелiorанта, рассчитанное на полное вытеснение обменного натрия и нейтрализацию вторичной щелочности почвенного раствора. Влажность почвы поддерживали на уровне 80% полевой влагоемкости. После четырехмесячного взаимодействия мелiorанта с почвой в твердой и жидкой фазах определяли содержание соответствующих ионов. Количество ионов в почвенном растворе (Г) на 100 г абсолютно сухой почвы, мг-экв, рассчитывали по уравнению

$$Г = C (V_0 - V_n) \cdot 10^{-3}, \quad (45)$$

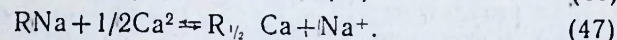
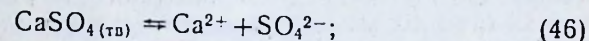
где С — концентрация ионов в почвенном растворе, мг-экв;

V_0, V_n — содержание общей и нерастворяющейся влаги, пересчете на 100 г абсолютно сухой почвы.

Почвенный раствор выделяли путем центрифугирования при 20 тыс. мин⁻¹ на центрифуге ЦВР-1. Активность ионов натрия в равновесном растворе определяли с помощью Na-селективного электрода. Для исследования ионного обмена было взято два различных типа солонца: автоморфный глубокий средненатриевый хлоридно-сульфатный (совхоз «Верхне-Серебряковский», Зимовниковского района, Ростовской области) и гидроморфный средний многонатриевый сульфатно-содовый (совхоз «Ольгинский», Аксайского района

Ростовской области). Состав поглощенных оснований определяли по методу Пфеффера.

Известно, что если в двухфазную систему, состоящую из CaSO_4 и ее насыщенного раствора, ввести почву, содержащую поглощенный натрий, то в результате ионного обмена катионы соли связываются с почвой, а в раствор переходят ионы натрия:



Равновесие, выраженное уравнением (46), нарушается, и новые порции сульфата кальция будут переходить в раствор. Соли будут растворяться до тех пор, пока в системе не установится равновесие между водным раствором и обменными твердыми фазами. В соответствии с этим в момент равновесия должны быть соблюдены два условия.

1. Число ионов кальция, поглощенных почвой из раствора в единицу времени, должно быть равно числу ионов натрия, вытесненных из почвы за тот же промежуток времени.

2. Равновесные концентрации (активности) ионов $a_{\text{Ca}} \cdot a_{\text{SO}_4}$ должны удовлетворять произведению растворимости сульфата кальция L_{CaSO_4} .

Таким образом, растворимость сульфата кальция при взаимодействии с почвой следует определять, с одной стороны, произведением растворимости соли, а с другой — обменной способностью почвы и селективностью ионного обмена.

Исследуя ионообменное равновесие в системе CaSO_4 ППК, В. М. Левченко, М. Б. Минкин и П. Т. Духнина [142] показали, что константа обмена ($K_{\text{Ca, Na}}$) может быть выражена уравнением

$$K_{\text{Ca, Na}} = \frac{10^{-6} \cdot a_{\text{Na}}^4 \cdot (V/g)^2}{4L_{\text{CaSO}_4} \cdot \left(\frac{(b_k - 10^{-3}a_{\text{Na}} \cdot V)}{g} \right)^2}, \quad (48)$$

где V — объем раствора, л;

g — навеска почвы, г;

L_{CaSO_4} — произведение растворимости (активности);

b_k — емкость поглощения введенного количества солонца;

a_{Na} — активность иона натрия в равновесном растворе.

Для расчета катионного обмена при химической мелiorации солонцов возможно использование уравнения (48), при соблюдении следующих условий:

1. Обмен каждой пары ионов должен не зависеть от находящихся в системе.

2. Константы катионного обмена должны быть постоянны.
3. Должно отсутствовать значительное количество карбонатов.

Первое условие, как показали исследования Е. Н. Гапона [6], Б. П. Никольского [166], Ю. А. Полякова [191], выполняется в широком интервале ионной силы раствора (μ). Второе условие может быть принято вплоть до $\mu=0,1$ [157]. Такие относительно высокие значения μ не достигаются даже при химической мелиорации солончаковых солонцов. Как показали результаты статистической обработки основных морфолого-генетических характеристик солонцов юго-востока Ростовской области, глубина вскипания от 10% HCl наиболее широко распространенных средних солонцов составляет около 35 см [155]. Таким образом, при внесении химических мелиорантов под обычную вспашку на глубину 20—22 см выполняется и третье условие [196].

Результаты исследований, представленные в табл. 14, показывают, что внесенные из расчета полного вытеснения поглощенного натрия химические мелиоранты по-разному изменяют состав поглощенных катионов.

Таблица 14

Количественная характеристика катионного обмена при химической мелиорации солонцов

Вариант	рН	Поглощенные катины, мг-экв/100 г				Na % от сум- мы	K _{Ca, Na}
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	сумма		
Солонец средненатриевый хлоридно-сульфатный							
Контроль (без мелно-рантов)	8,3	13,5	11,7	5,3	30,5	17,4	5,31
Глиногипс	7,6	18,3	9,7	3,4	31,4	10,1	7,45
Фосфогипс	6,8	18,8	8,6	2,4	29,8	8,0	12,32
Нейтральный фосфогипс	7,3	18,7	9,3	2,9	30,9	9,4	9,37
Солонец многонатриевый сульфатно-содовый							
Контроль	9,7	6,7	14,8	19,9	41,4	48,4	1,27
Глиногипс	8,2	21,2	11,7	6,9	39,8	17,3	3,88
Фосфогипс	7,7	26,2	9,9	4,2	40,3	10,5	8,41
Нейтральный фосфогипс	8,0	23,4	12,3	5,9	41,6	14,2	6,23

Наибольшее снижение рН и замещение поглощенного натрия отмечено на вариантах с фосфогипсом. Характерно, что чем выше рН, тем больше сродство сорбента с поглощенным натрием. Так, на контроле без внесения химических мелио-

рантов на содовых солонцах константа обмена $K_{Ca, Na}$, рассчитанная по уравнению (48), приблизительно равна 1, т. е. относительное сродство сорбента с этими ионами практически одинаковое. В то же время в средненатриевом солонце относительная сорбируемость иона кальция более чем в пять раз выше, чем натрия. При внесении химических мелиорантов в связи с резким снижением рН значительно увеличивается сорбция ионов кальция в сравнении с натрием.

Одной из причин более высокой эффективности фосфогипса является достигаемое при его использовании существенное снижение рН. Чем больше значение рН, тем менее растворимы соли двухвалентных катионов, что приводит к увеличению сорбции ионов натрия без мелиорации. Результаты исследований катионного обмена подтверждают вышеприведенные данные о возможности снижения дозы фосфогипса на 25% по сравнению с традиционно применяемым гипсом. Таким образом, суммарную дозу мелиоранта (Г) в тоннах на гектар определяют по формуле

$$Г = 0,086 \frac{\left[\frac{Na - 0,05E}{K_1} + (S - M)K_2 \right] K_3 h d \cdot 100}{P}, \quad (49)$$

- где Na — содержание обменного натрия, мг-экв на 100 г почвы;
 0,05 — коэффициент, учитывающий содержание неактивного натрия;
 E — сумма поглощенных катионов, мг-экв на 100 г почвы;
 K_1 — коэффициент использования глиногипса и фосфогипса; равный 0,75;
 S — сумма $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ в водной вытяжке, мг-экв;
 M — сумма $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в водной вытяжке, мг-экв;
 K_2 — предельное значение пересыщения $CaCO_3$, равное 2,0;
 K_3 — коэффициент, учитывающий кислотные свойства мелиоранта (для глиногипса $K_3=1$, для фосфогипса $K_3=0,75$);
 h — мощность мелиорируемого слоя, см;
 d — плотность, г/см³;
 P — содержание гипса в мелиоранте, %.

Таким образом, уравнение (49) отражает более полно физико-химические процессы, происходящие при мелиоративном освоении солонцов, а также особенности химических мелиорантов.

3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОРОШАЕМЫХ СОЛОНЦОВЫХ КОМПЛЕКСОВ — ОСНОВНОЕ УСЛОВИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МЕЛИОРАТИВНОГО ПРОЦЕССА

3.1. Технология и технические средства регулирования гидрологического режима почв

Наличие подсолонцового сильнозасоленного горизонта является, по мнению В. В. Егорова [92, 98, 100], постоянным резервом обменного натрия, который обеспечивает относительную устойчивость солонца в природе и возможность восстановления солонцовых свойств. Там, где в процессе мелиорации мало изменяется солевой режим, сохраняются предпосылки для реставрации солонцовых свойств. Нестабильный режим влажности почвы у поверхности обуславливает формирование знакопеременных вертикальных градиентов потенциала влаги и химического потенциала раствора, которые способствуют непрерывным миграциям легкоподвижных ионов по профилю солонца.

Описанный механизм в значительной степени определяет солонцеватость и тех почв, которые приурочены к промежуточным позициям микрорельефа и являются зоной частичной разгрузки капиллярно-пленочного потока растворов, мигрирующих от понижения.

Результаты описанного модельного опыта свидетельствуют о том, что специфика актуальной СПП сухой степи устанавливается тесным пространственным взаимодействием почв комплекса. Причины устойчивости характерных параметров отдельных ЭПА, составляющих рассматриваемую ПК, определяются не столько наличием или отсутствием связи с грунтовыми водами, размерами исходного засоления почвообразующих пород, сколько интенсивным пространственным массообменом. При этом большое значение приобретает характер обратной связи между взаимодействующими объектами. Например, согласно данным А. А. Роде [209], на черноземах водопроницаемость понижений микрорельефа значительно ниже, чем микроповышений. Автор приводит данные о коэффициенте фильтрации целинных мощных черноземов, занимающих различные элементы микрорельефа, причем водопроницаемость повышенний составляет 180—292 мм/ч, а понижений — 27—60 мм/ч. При равной интенсивности дождя поступление влаги в почву значительно большее в районе повышенний. Роль микрорельефа как фактора перераспределения влаги резко снижается, поскольку характерная дифференциация водопроницаемости является механизмом, работающим в обратном направлении, способствуя нивелированию

увлажнения. Это одна из причин гомогенности почвенного покрова. Таким образом, между почвами повышенний и понижений микрорельефа в зоне черноземов обычно формируется отрицательная обратная связь по влажности, способствующая конвергенции характеристик реципиентного и донорного ЭПА и минимальной контрастности ПГС (пятнистость).

В зоне сухих степей за счет осолонцевания повышенний и резкого снижения их водопроницаемости перераспределение влаги между элементами микрорельефа прогрессивно возрастает. Таким образом, возникает положительная обратная связь в системе лугово-каштановая почва понижения — зональная каштановая почва на промежуточных геодезических отметках микрорельефа — солончаковатый солонец на микроповышении, которая, с одной стороны, усиливает дифференциацию между элементами комбинации в связи с описанными особенностями массообмена, а с другой — поддерживает механизм взаимодействия всех элементов почвенного комплекса в неизменном виде.

Существующие приемы мелиорации солонцов практически не устраняют сложившийся микрорельеф и поэтому слабо влияют на гидрологический режим комплексного почвенного покрова. Лишь в начальный период в результате увеличения водопроницаемости повышенний возможно некоторое снижение горизонтального перераспределения почвенных растворов. В дальнейшем, вследствие значительного уплотнения почвенной массы, снижается водопроницаемость и восстанавливается прежний гидрологический режим.

Такой подход объясняет отмечаемые во многих случаях факты реставрации неблагоприятных свойств солонцовых почв в богарных и особенно в орошаемых условиях [97, 168, 195]. В последнем случае гидрологический режим изменяется в еще более неблагоприятную сторону, так как усиливается перераспределение оросительной воды по микрорельефу с последующим углублением дифференциации увлажнения и интенсификацией солепереноса в условиях высоких значений потенциала почвенной влаги.

Все это указывает на несовершенство общепринятой модели мелиоративного процесса на солонцах и свидетельствует о недостаточной эффективности разработанных на ее основе мероприятий.

Следовательно, для достижения эффекта от мелиорации солонцовых почв необходима трансформация в нужном направлении СПП почвенно-географического пространства сухой степи посредством регулирования гидрологического режима всех представленных в рамках конкретной ПК ЭПА.

Нивелированное увлажнение обеспечит пространственную выравниваемость потенциала почвенной влаги, поэтому существ-

венно воздействовать на солевой режим будут вертикальные градиенты потенциала, а горизонтальный массообмен прекратится. В таких условиях мероприятия, направленные на увеличение запаса влаги в почве, дадут возможность провести необратимое выщелачивание легкорастворимых солей из-под солонцового горизонта, способствующее успешному прохождению мелиоративного процесса.

На базе количественных закономерностей выше показано, что сухостепной зоне каштановых почв свойственно развитие разнообразных форм микрорельефа.

В частности, солонцы занимают микроповышения ($H=5-20$ см), лугово-каштановые — микропонижения ($H=10-40$ см), каштановые почвы — промежуточные позиции рельефа.

Характерно, что при вовлечении солонцовых земель в сельскохозяйственный оборот микрорельеф существенно влияет на свойства почв. Поскольку почвы каштаново-солонцовых комплексов обладают низкой водопроницаемостью, перераспределение оросительной воды и атмосферных осадков по поверхности согласно микрорельефу определяет уровень влагообеспеченности различных компонентов комплекса. Улучшение водно-физических свойств почв при осуществлении химического или комплексного методов мелиорации не ликвидирует предпосылки перераспределения влаги между почвами, так как микрорельеф остается практически неизменным.

В связи с этим в обычных условиях и в мелиоративный период неравномерность увлажнения почв определяет горизонтальное передвижение влаги от относительно более увлажненных почв западин к менее увлажненным почвам повышенный микрорельефа. Горизонтальный поток влаги проходит в слоях 40—120 см, которые в орошаемых почвах сухой степи отличаются большим содержанием легкорастворимых солей. Эти соли с горизонтальным потоком влаги поступают к почвам выпуклых элементов микрорельефа. Особенно интенсивно такое перемещение наблюдается для ионов Na^+ и Cl^- . Поэтому в почвах микроповышений постоянно существует, а иногда даже возрастает содержание легкорастворимых солей в слое 40—80 см. Их удаление с оросительной водой затруднено в результате слабого промачивания. Наличие этих солей устанавливает периодическое диффузионное поступление натрия в солонцовый горизонт, что обуславливает устойчивость солонцовых свойств и возможность их восстановления в последствии гипсования или комплексного метода мелиорации, что снижает мелиоративный эффект.

Таким образом, эффективность мелиорации орошаемых солонцовых комплексов в значительной степени связана с закономерностями пространственного взаимного влияния почв

солонцового комплекса, т. е. определяется характером СПП.

В Донском СХИ разработан способ интенсификации мелиоративного процесса посредством регулирования гидрологического режима [156]. Способ состоит из простых агромероприятий, направленных на ликвидацию перераспределения осадков и оросительной воды по поверхности почвы. При этом достигается нивелирование увлажнения компонентов солонцового комплекса, что позволяет устранить причины горизонтального внутрипочвенного передвижения влаги и солей от более увлажненных почв к менее увлажненным, поскольку при регулировании гидрологического режима они приобретают практически равное промачивание.

Регулирование гидрологического режима улучшает мелиоративный процесс на микроповышениях, занятых солонцами. Повышенное по сравнению с химическим или комплексным методами увлажнение этих элементов микрорельефа ускоряет протекание обменных реакций в почвенном поглощающем комплексе, обеспечивает интенсивный вынос продуктов обмена из солонцового и подсолонцового горизонтов в нижележащие слои.

Главным фактором положительного влияния регулирования гидрологического режима на свойства солонцового комплекса является преобразование СПП. Такая возможность определяется тем, что предлагаемый прием позволяет ликвидировать причины стабильности солонцовых свойств — повышенное содержание легкорастворимых солей, и в основном $NaCl$ в подсолонцовом горизонте. Это происходит потому, что нивелированное в пространстве увлажнение почв препятствует боковому накоплению солевых аккумуляций микроповышений. Следовательно, регулирование гидрологического режима, в отличие от известных приемов мелиорации, не только повысит продуктивность окультуриваемых почв, но и обеспечит необратимость мелиоративного эффекта.

Регулирование гидрологического режима следует проводить во время вегетации сельскохозяйственных культур и в осенне-зимний период.

Окончательный выбор приемов регулирования необходимо выполнять на основании наиболее оптимального сочетания приемов регулирования гидрологического режима с рекомендуемыми в зональных системах земледелия элементами технологии возделывания сельскохозяйственных культур.

Гидрологический режим солонцовых комплексных почв регулируется посредством орудий, создающих на поверхности почвы замкнутые углубления, ограничивающие сток с микроповышений расстоянием 1—1,5 м. Реализуется эффект одностороннего в пространстве увлажнения. Для регулирования на фоне химического или комплексного метода мелиорации со-

Навесной бороздатель-щелерез БЩН-3 конструкции ЮЖНИИГИМа при обработке поля в двух взаимно перпендикулярных направлениях образует систему прерывистых щелей емкостью 250—300 м³/га (рис. 22) [143, 203].

Ежегодная осенняя обработка щелерезом регулирует гидрологический режим осенью и зимой. Весной после посева, когда семена достаточно закрепились в почве, или за 2—3 недели до посева выполняется щелевание в междурядьях (перпендикулярно к первоначальному направлению щелевания). В этом варианте ячейки не образуются. Однако высокая водопроницаемость междурядий из-за наличия борозд способствует быстрому переводу поверхностного стока, возникающего при поливах, во внутрипочвенный. Поперечные щели с высокой водопроницаемостью ограничивают сток расстоянием 0,7—0,9 м (расстояние между стойками щелереза) и рассредоточивают влагу равномерно по почвенному слою.

При достаточной устойчивости щелей в почве можно выполнять только весеннюю (осеннюю) обработку щелерезом с чередованием ее направления.

Преимущество использования этого варианта регулирования гидрологического режима заключается в том, что он активизирует природные процессы синтеза почвенного тела. Искусственные трещины (щели) являются активными зонами современного почвообразования. Они обеспечивают экспансию почвенного профиля вниз, что особенно актуально при характерном для сухой степи мехсоставе почв и грунтов, где трещины превращаются в ареалы основного почвообразования.

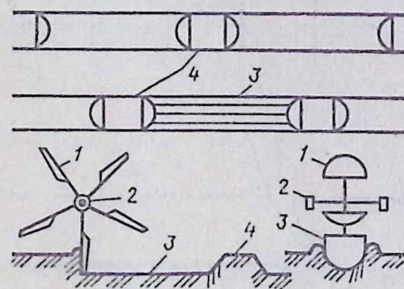


Рис. 23. Схема работы бороздопрерывателя ППБ-0,6:
1 — роторная перемычкообразующая секция; 2 — вал;
3 — прерывистая борозда;
4 — перемычка на борозде

Прицепной бороздопрерыватель ППБ-0,6 конструкции ЮЖНИИГИМа образует корытообразные углубления длиной 0,6—1,2 м общей емкостью 350 м³/га посредством рабочих органов роторного типа в междурядьях пропашных культур (рис. 23) [143]. Обработка орудием ППБ-0,6 проводится по зяби и обеспечивает осенне-зимнее регулирование гидрологического режима. Весенняя культивация совмещается с выравниванием регулирующей сети осенне-зимнего сезона. Весной поделка прерывистых борозд выполняется перед первым поливом, а затем совмещается с культивациями междурядий.

Однако описанные орудия используют не по прямому назначению, так как на малоуклонных землях большинства ирригационных систем юга ЕТС регулируют только гидрологический режим.

К числу почвообрабатывающих орудий, создающих на поверхности замкнутые углубления для борьбы с водной эрозией и нивелирования пространственного увлажнения почв, относится разработанный нами полосоперерыватель [20]. Прототипом его явилось устройство для прерывистого бороздования на базе закрепленной на валу многолопастной крыльчатки с механизмом включения [3, 181]. Недостатком прототипа, который создает неудобства для других почвообрабатывающих орудий, работающих после устройства для прерывистого бороздования, является некачественное формирование искусственного микрорельефа в связи с неравномерностью вращения крыльчатки. Формируются ячейки, размер значительной части которых велик настолько, что позволяет размещать колеса трактора и орудия и вызывает вибрацию. Вибрация происходит также и из-за различной высоты перемычек, размер которых конструктивно не ограничивается.

В качестве аналога разработанного устройства использован бороздопрерыватель [2], несколько отличающийся от орудия ППБ-0,6. Он содержит раму, регулируемые по высоте опорно-приводные колеса, рабочий орган в виде плоских стреловидных скребков, закрепленных на поводках с выступами, и кулачковый вал. Недостаток аналога — сложность и ненадежность механизма включения в виде кулачкового вала с зубчатой передачей вращения, высокая импульсная разгрузка на детали устройства в момент подъема скребка, недостаточная устойчивость формируемых устройством валков и их нерегулярная высота.

Полосоперыватель улучшает микрорельеф полос, формируя устойчивые валки заданной высоты. При достаточной регулирующей емкости для приема оросительной воды и атмосферных осадков искусственная шероховатость поверх-

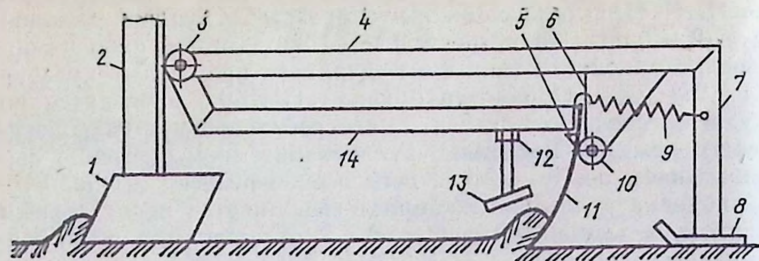


Рис. 24. Полосоперыватель. Исходное положение

ности поля оказывается относительно небольшой, а валики остаются достаточно устойчивыми за счет уплотнения.

Полосоперыватель (рис. 24) содержит раму с рабочим органом в виде скребка на поводке. Скребок укреплен подвижно относительно горизонтальной оси поводка и фиксируется шарнирно закрепленной на раме запорной скобой с пластиной, регулируемой по высоте валика, а на поводке выполнены стойки с лыжей.

Полосоперыватель состоит из рамы 2 со стреловидным отвалом 1, к которой через шарнир 3 крепятся поводок 4 и запорная скоба 14. В задней части поводка имеются две стойки 7, к нижним частям которых крепится лыжа 8. На поводке перед стойками укреплена горизонтальная ось 10, на которой шарнирно закреплен скребок 11. Скребок соединен со стойками возвратными пружинами 9. В задней части запорной скобы перед скребком укреплена пластина 13, регулируемая по высоте винтами 12. Упор 5 на скребке ограничивает смещение запорной скобы вниз, упор 6 на поводке ограничивает обратное смещение скребка в положении полосоперывателя по рис. 26.

Полосоперыватель работает следующим образом. При движении полосоперывателя закрепленный на раме 2 стреловидный отвал 1 формирует продольные валики полосы и планирует ее дно. Режущая кромка скребка 11 срезает задаваемый высотой расположения пластины 13 слой 20—30 см почвы. Эта почва транспортируется по ходу движения скребком, который удерживается в положении транспортирования закрепленной скобой. Увеличение массы транспортируемой скребком почвы приводит к тому, что она начинает оказывать давление на пластину (рис. 25). Пластина через регулировочный механизм жестко связана с запорной скобой. Поднятие пластины вместе с запорной скобой приводит к тому, что последняя приподнимается и освобождает скребок. Скребку, край режущей кромки которого упирается в осно-

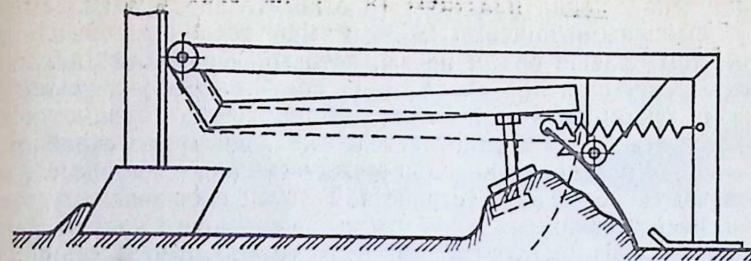


Рис. 25. Полосоперыватель. Формирование валика

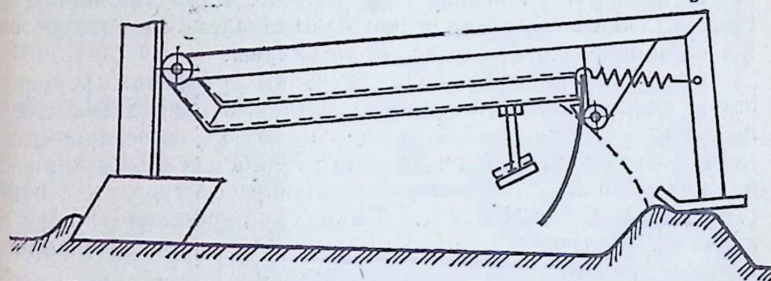


Рис. 26. Полосоперыватель. Профилирование валика

вание валика, сообщается усилие, которое проворачивает его против хода часовой стрелки относительно продолжающей движение вместе с поводком горизонтальной оси скребка. Скребок преодолевает сопротивление возвратной пружины и огибает валик сверху.

При этом запорная скоба опирается на верхнюю часть скребка, занимая ждущее положение под действием силы тяжести. Поверхность скребка опирается на огибаемый валик, причем поводок, на котором закреплен скребок, приподнимается, проворачиваясь относительно шарнира на раме. Размеры скребка, его расположение на поводке выбраны таким образом, что сразу после скребка на валик наезжает лыжа (рис. 26).

По мере того как лыжа, в свою очередь, огибает валик, скребок выводится из соприкосновения с почвой, собранной в валик, и «зависает». Пружина 9 возвращает освободившийся скребок по часовой стрелке вокруг горизонтальной оси в исходное положение к упору 5. Затем запорная скоба под действием силы тяжести опускается на упор 6 и фиксирует скребок в исходном положении.

Высота валика регулируется посредством изменения уров-

ня расположения пластины 13 относительно дна полосы регулировочными винтами 12. Чем выше расположение пластины, тем больше объем почвы, который необходимо накопить перед скребком для обеспечения подъема запорной скобы, и выше сформированный валик. Устойчивость валика достигается тем, что он уплотняется огибающими его скребком и лыжей. Уплотнение валиков между смежными полосами может быть достигнуто устройством лыжи с боковыми уступами, расположенными на 50 мм выше основного уровня лыжи. Масса лыжи достаточна для того, чтобы преодолеть сопротивление сжатию узкой полосы разуплотненного грунта, частично сбрасываемого справа и слева от стрелковидного отвала. Уступы лыжи скошенными вперед кромками (как и у лыжи по рис. 26) уплотняют продольный валик и задают его высоту. Таким образом, все выпуклые элементы искусственного микро рельефа достаточно устойчивы.

Как будет показано в последующих разделах, регулирование гидрологического режима является оптимальным, если влажность солонцов не более чем на 2—3% ниже влажности лугово-каштановых почв. При этом абсолютные значения влажности почвы после полива должны составлять соответственно 22—24 и 24—27%. Такое промачивание почв комплекса характеризует близкий к нивелированному гидрологический режим солонцового комплекса.

Объектами глубокого мелнипоративного рыхления являются широко распространенные в Нечерноземной зоне минеральные почвы тяжелого механического состава, почвы каштаново-солонцовых комплексов сухой степи, слитые почвы, тяжелые засоленные луговые пойменные почвы, переувлажненные мочаристые почвы склонов.

Только в европейской части РСФСР и Казахстана земли, нуждающиеся в улучшении водно-физических и химических свойств путем глубокого рыхления, распространены на площади более 30 млн га, из них более 1 млн га — на орошаемых массивах.

Ниже приведены варианты глубокого рыхления в качестве компонента технологических схем.

1. Разуплотнение тяжелых слитых почв и грунтов посредством глубокого рыхления.
2. Ликвидация переувлажнения посредством кротования.
3. Рыхление и кротование в целях повышения скорости и качества промывки засоленных слабодопроницаемых почв.
4. Разуплотнение для ускорения химической мелниорации солонцовых почв.
5. Рыхление и кротование эрозийно опасных земель.
6. Локальное рыхление и кротование переувлажненных

почв склонов в целях оптимизации режимов грунтовых вод и верховодки и для ускорения их рассолонцевания.

7. Предзимнее разуплотнение тяжелых почв, снижающее энергозатраты при зимнем строительстве мелнипоративных объектов.

8. Культурно-технические мероприятия на вновь вводимых орошаемых землях (очистка пахотного горизонта от камней, древесных остатков).

Значительная часть действующих оросительных систем и большинство проектируемых приурочены к землям, на которых в основном представлены солонцы. Если орошение этих земель предусматривается без каких-либо мероприятий, поддерживающих плодородие, то деградация почв наступает через 2—5 лет после начала поливов. Опыт, подтверждающий вероятность подобных явлений, накоплен в Поволжье, на Украине, Северном Кавказе. Согласно исследованиям Почвенного института им. В. В. Докучаева, Южгипроводхоза, ДСХИ, ЮЖНИИГИМа, сложившаяся обстановка обусловлена недостаточным учетом особенностей комплексных почв каштановой зоны как объекта орошения [95, 100, 112, 122, 167].

Повышенное увлажнение, наличие натрийсодержащих минералов в почвах способствуют протеканию щелочного гидролиза минералов, который усиливает щелочную реакцию почвенных растворов и ускоряет разрушение структуры почвы.

Плотность солонцов каштановой зоны в условиях орошения достигает 1,62—1,69 г/см³ в слое 0—40 см.

Неблагоприятным фактором является и пространственная неоднородность почвенного покрова, которая, в частности, проявляется в приуроченности солонцов к участкам орошаемых земель с особенно тяжелым механическим составом. При орошении это способствует потере плодородия на этих элементах почвенного покрова.

Наиболее распространены химический и комплексный методы мелниорации, которые в настоящее время рекомендуются не только в качестве меры, направленной на восстановление продуктивности деградированных солонцовых земель, но и в качестве превентивного приема, предотвращающего усиление отрицательных агрофизических свойств орошаемых солонцовых почв в эксплуатационный период.

Несмотря на большое количество примеров позитивной роли этих приемов в окультуривании почв, их использование требует уточнения. В частности, отсутствие надежного отвода продуктов обменных реакций, происходящих в ППК при внесении химических мелниорантов, может вместо окультури-

вания вызвать усиление осолонцевания, причем в слое, мощность которого превышает исходную.

Как показала практика, тяжелые, слабоводопроницаемые засоленные и солонцовые почвы, на которых большей частью размещаются рисовые севообороты, плохо поддаются промывке даже при культуре затопляемого риса на фоне дренажа. Зона действия дренажа глубиной 2—2,5 м ограничена слабой депрессией и составляет 50—70 м, что значительно меньше нормативного междренья.

Возникает вторичное осолонцевание и ошелачивание, так как легкорастворимые соли в лучшем случае вытесняются в нижнюю часть зоны аэрации и, как правило, чрезвычайно слабо удаляются в дренаж. Положение осложняется конечной мощностью водопроницаемых слоев из-за близости водупорных и водопрочных слоев на большинстве рисовых оросительных систем.

Кроме того, идут процессы ошелачивания, утяжеление механического состава, слитизация почв.

Во многих случаях слитые почвы являются результатом длительного орошения черноземов с достаточно высоким исходным плодородием. Ирригационно их профиль трансформируется, утяжеляя механический состав и особенно повышая плотность, упаковки агрегатов структуры. В связи с этим должна предусматриваться глубина рыхления 0,89 м или предельная для имеющейся модели глубокорыхлителя. Для стабильности эффекта глубокого рыхления необходимы меры, повышающие устойчивость создаваемой структуры почвы. Как указывалось, слитизация обычно сопровождается гидролизом и ошелачиванием на фоне роста степени осолонцевания. Поэтому в качестве превентивной меры необходимо внесение кислых и кальцийсодержащих химмелиорантов, в частности, эффективно гипсование дозой 3—4 т/га с внесением гипса под глубокое рыхление.

Глубокое рыхление пойменных почв при их высокой плотности является не только мерой оптимизации этого параметра. Особую важность имеет открывающаяся возможность управлять вертикальной составляющей динамикой водного баланса пойменных почв. В этом смысле глубокое рыхление обеспечивает ускоренную инфильтрацию поступающей сверху вниз влаги атмосферных осадков, паводковых, талых и оросительных вод. Однако восходящее движение засоленных грунтовых вод ослабляется, поскольку в разуплотненном почвенном слое раньше устанавливается влажность разрыва капиллярной связи и значительно быстрее падает влагопроводность. Таким образом, глубокое рыхление пойменных почв создает эффект уменьшения критической глубины грунтовых

вод и снижает отрицательное воздействие их актуальных уровней на почвы.

Рыхление пойменных почв ослабляет свойственную им, особенно при орошении, неоднородность промачивания, уменьшает микрокомплексность почвенного покрова.

Следует отметить, что на слабо- и средnezасоленных почвах в условиях непостоянного уровня грунтовых вод дождевание в сочетании с глубоким рыхлением (до 50 см) и дренажом способствует значительному рассолению почв.

На оршаемых комплексах каштановых солонцовых почв глубокое рыхление решает ряд проблем. Несмотря на то, что современные проекты оросительных систем на каштановых почвах предусматривают обязательное проведение почвенных мелиораций, современные данные показывают недостаточную эффективность этой меры.

Внесение химических мелиорантов под обычную вспашку, как это предусматривается, наряду с возможностью быстрого протекания обменных реакций в ППК при орошении, не в полной мере решает задачу выщелачивания продуктов обменных реакций из почвенного профиля в дренаж. Причиной является усиливающаяся при орошении глубокая иллювинованность профиля, обуславливающая высокую степень водупорности слоя почвы 30—80 см.

Это ослабляет промачивание при дождевании в связи с формированием микростока, а при поверхностном поливе — в связи с отставанием фронта инфильтрации на солонцах по сравнению с окружающими почвами, служащими индикатором окончания полива. Однако недостаточное промачивание ослабляет протекание мелиоративного процесса из-за отсутствия выщелачивания. Наконец, мелиоративный эффект не проходит стадию фитофиксации, поскольку корневая система занимает преимущественно слой 0—30 см.

Кроме перечисленных, существует еще один важный аспект, требующий дополнительного к химической мелиорации воздействия на орошаемые солонцовые почвы с целью стабилизации высоких ирригационных параметров. Длительность мелиоративного эффекта при окультуривании орошаемых солонцовых почв определяется не только распределением мелиоративно значимых параметров по их почвенному профилю, но и пространственной неоднородностью почвенного покрова.

Чередование на орошаемых массивах пятен солонцов, зональных каштановых почв, лугово-каштановых почв и других компонентов солонцовых комплексов приводит не только к пестроте урожая, но и является дополнительным фактором, поддерживающим отрицательные агрофизические и химические свойства многих типов почв, входящих в комплекс.

Резко выраженное чередование различных типов почв на расстоянии 6—30 м сказывается на протекании мелiorативных процессов по следующим причинам. Во-первых, солонцы, занимая микроповышения, из-за слабой водопроницаемости теряют значительную часть влаги на сток в микропонижения, где формируются лугово-каштановые почвы с хорошими агрофизическими свойствами. Во-вторых, из-за разной влажности между этими типами почв возникает боковое движение влаги и растворенных в ней солей от лугово-каштановых почв к солонцам. Последние, как фитили, подтягивают к поверхностным горизонтам вместе с влагой легкорастворимые соли.

Такой характер пространственного расположения почв каштановой зоны в богарных и в особенности орошаемых условиях обуславливает резко выраженное их взаимное влияние. Это затрудняет протекание мелiorативного процесса и является одной из причин снижения мелiorативного эффекта на солонцовых почвах в длительном последствии.

Возможность реставрации отрицательных агрофизических свойств солонцов связана с медленным, но постоянным поступлением иона натрия в поверхностные горизонты вместе с горизонтальным потоком легкорастворимых солей.

Гипсование, мелiorативные вспашки не устраняют сложившийся микрорельеф и в связи с этим недостаточно влияют на гидрологический режим комплексного почвенного покрова.

В связи с этим реализация комплексного метода мелiorации орошаемых солонцовых почв, который включает гипсование и трехъярусную вспашку на 45—50 см, возможна при сочетании химической мелiorации и глубокого рыхления. В таком случае решается задача трансформации состава почвенно-поглощающего комплекса, обеспечивается быстрое и эффективное выщелачивание продуктов обменных реакций, поскольку глубина обрабатываемого слоя возрастает от 45—50 до 80 см и более. Наконец, необходимость в обработке с оборотом пласта на малогипсовых солонцах отсутствует. Важным преимуществом сочетания глубокого рыхления с внесением химических мелiorантов орудиями РУМ-5, РУМ-8 (доза 8—16 т/га) по сравнению с другими способами мелiorации является решение задачи стабилизации мелiorативного эффекта, поскольку открывается возможность одновременного регулирования гидрологического режима мелiorируемых массивов. Последнее обеспечивается при периодическом повторении глубокого рыхления во взаимно перпендикулярных направлениях через 1—3 года в составе элементов технологий возделывания орошаемых культур.

Очередные глубокие рыхления солонцовых комплексов обеспечивают формирование замкнутых зон высокой водопрони-

цаемости в почве и нивелированное в пространстве увлажнение. Это является основным условием устойчивости мелiorативного эффекта в соответствии с представлениями о регулировании гидрологического режима и делает использование глубокого рыхления на орошаемых солонцовых почвах особенно актуальным.

Смысл регулирования гидрологического режима реализуется посредством планировки методом буртования с гипсованием. Это обусловлено тем, что обычное строительное мероприятие — кулисная планировка, используемая для повышения качества полива и сохранения плодородия верхних горизонтов почвы в условиях орошения, при комплексности почвенного покрова приобретает новый характер. Согласно исследованиям В. В. Егорова [97, 98], проведенным в Поволжье, при строительных планировках под орошение на солонцовых почвах следует отдавать предпочтение планировке методом буртования, которая сочетается с одновременным внесением по всей поверхности мелiorируемой территории гипса. Технологическая схема в этом случае несколько отличается от типовой схемы кулисной планировки и заключается в том, что верхний 15—20-см наиболее плодородный слой почвы транспортируется в бурты, а освобождающийся грунт подвергается планировке. Почва иллювиального горизонта при этом измельчается, смешивается с каштановой почвой, а проявление солонцовых свойств ослабляется.

Необходимо отметить, что планировка методом буртования не полностью устраняет горизонтально-боковое движение почвенных растворов. Это связано с тем, что при планировке обнаженной после буртования гумусного слоя поверхности срезке в первую очередь подвергаются, как правило, иллювиальный и карбонатно-солевой горизонты в связи с приуроченностью солонцов к микроповышениям. На вскрытую поверхность укладывается слой гумусового грунта, ранее уложенного в бурты. В новых условиях, вследствие большого промачивания этих участков, воздействие просадочности выражено в большей степени, чем на окружающем пространстве, где промачивание остается на близком к исходному уровню и просадки отсутствуют.

Существенно и то, что в варианте с использованием планировки на поверхности почвы отсутствуют препятствия для нераспределения влаги согласно вновь созданному микрорельефу. Складываются предпосылки дальнейшего локального углубления промачивания на участках с наибольшей просадкой по типу положительной обратной связи. За счет этого резко ускоряется мелiorативный эффект на бывших микроповышениях. Однако одновременно происходит постепенная рес-

таврация плоскозападинного микрорельефа и бывшие неза-
соленные почвы постепенно засоляются.

Изложенные выше результаты экспериментальных иссле-
дований и математическое моделирование показали, что мик-
рокомплексность почвенного покрова юго-востока Ростовской
области определяется неоднородностью режима увлажнения
смежных в пространстве почв. В связи с этим следующей за-
дачей наших исследований является разработка различных
приемов регулирования гидрологического режима солонцов
на фоне рекомендуемых методов их мелиорации: химического
и комплексного.

Для химического метода использованы местные залежи
глиногипса. Комплексный метод включал глубокую мелио-
ративную трехъярусную вспашку с целью мобилизации каль-
циевых солей почвы и дополнительное внесение глиногипса.
Этот метод рекомендован в первую очередь на высокомоло-
гипсовых сульфатно-хлоридных солонцах, у которых запасы
гипса в слое 0—40 см недостаточны для вытеснения обмен-
ного натрия из ППК солонцового горизонта [203].

Производственный эксперимент (опыт 1) проведен в сов-
хозе «Новогашунский», Дубовского района, Ростовской об-
ласти, согласно существующим методикам на слабовыражен-
ной второй надпойменной террасе р. Б. Гашун. Участок вход-
ит в состав Верхне-Сальской оросительно-обводнительной
системы. Грунтовые воды хлоридно-сульфатно-кальцево-на-
триевого типа химизма засоления имеют минерализацию 8—
15 г/л. В пределах опытного участка коллекторно-дренажная
сеть поддерживает уровень грунтовых вод на глубине 3,5—
4,5 м. Для регулирования гидрологического режима солонцо-
вых комплексных почв в условиях орошения дождеванием
применены четыре системы орудий.

Ниже приведена схема опыта 1 (на всех участках возде-
лывается кукуруза на силос).

1. Обычная вспашка + 8 т/га глиногипса (контроль 1).
2. Трехъярусная вспашка + 8 т/га глиногипса (контроль 2).
3. Обычная вспашка + 8 т/га глиногипса + ПЭК-1,6.
4. Обычная вспашка + 8 т/га глиногипса + ЛД-10 + СЗС-2,1.
5. Обычная вспашка + 8 т/га глиногипса + БЩН-3.
6. Обычная вспашка + 8 т/га глиногипса + ППБ-0,6.
7. Трехъярусная вспашка на 40—45 см + 8 т/га глиногип-
са + ПЭК-1,6.
8. Трехъярусная вспашка на 40—45 см + 8 т/га глиногип-
са + ЛД-10 + СЗС-2,1.
9. Трехъярусная вспашка + 8 т/га глиногипса + БЩН-3.
10. Трехъярусная вспашка + 8 т/га глиногипса + ППБ-0,6.
11. Планировка методом буртования + 8 т/га глиногипса.

В вариантах 7—10 технология регулирования гидрологи-
ческого режима аналогична вариантам 3—6.

В вариантах 3, 4, 7, 8 возделывание кукурузы осущест-
вляется с применением гербицида 2,4-Д, иначе при проведе-
нии культиваций нарушается регулирующая сеть и теряется
смысл регулирования гидрологического режима.

Опыт 2 проведен в совхозе «Новоселовский», Орловского
района, Ростовской области. Цель опыта — изучить влияние
режима движения дождевального агрегата на водно-физиче-
ские свойства почв.

Орошаемый участок совхоза «Новоселовский» имеет по-
стоянную оросительную сеть в железобетонных лотках пара-
болического сечения пропускной способностью до 1 м³/с. Пов-
семестно обеспечено командование не менее 0,3 м, отсутству-
ют обратные уклоны. Временная оросительная сеть выполне-
на в земляном русле и оборудована закрытыми водовыпуска-
ми, выполненными из железобетона. Коллекторно-дренажная
сеть глубиной около 2,5 м характеризуется пониженной про-
пускной способностью в связи с оборудованием откосов и за-
растанием.

Несмотря на это, уровень дренированности большей части
орошаемых земель является удовлетворительным из-за нали-
чия достаточно глубоких местных базисов эрозии и коллек-
торно-дренажная сеть выполняет преимущественно коллек-
торную роль. Представляет особую опасность ирригационная
верховодка, формирующаяся при локальных переполюсах и
определяющая тенденцию пятнистого засоления от третичных
глин, местами расположенных близко к поверхности. Средняя
глубина грунтовых вод 3—4 м. Сухой остаток 4—7 г/л.

Почвенный покров участка соответствует подзоне кашта-
новых почв. Он представлен комплексами различной степени
дифференцированности, состоящими из зональных каштано-
вых почв, каштановых солонцеватых почв, каштановых силь-
носолонцеватых почв, глубокосолончаковых солонцов, со-
лончаковых солонцов, темноцветных почв, лугово-темно-
цветных почв (табл. 15).

Степень дифференцированности заключается в следую-
щем: 25% орошаемой территории представлено относительно
слабодифференцированной почвенной комбинацией, в кото-
рой господствующими являются каштановые солонцеватые
почвы (90% площади комплекса), 65% орошаемой террито-
рии занято комплексом из каштановых почв (25% площади),
каштановых солонцеватых почв (30% площади), глубокосо-
лончаковых солонцов (20% площади), солончаковых со-
лонцов (10% площади), лугово-темноцветных почв (15%
площади).

Была выполнена морфологическая характеристика пред-

ставленных в составе комплексов орошаемого участка почв (табл. 15). Данные отражают значительную вариабельность

Таблица 15

Морфологическая характеристика почв орошаемого участка совхоза «Новоселовский»

Показатель	Почва						
	1	2	3	4	5	6	7
Мощность гор. А, см	24,1	23,7	16,4	13,7	11,9	40,5	47,2
Мощность гор. В ₁ , см	21,3	20,6	21,0	19,2	18,7	24,7	27,5
Верхняя граница вскипания, см	48,6	41,1	39,5	35,1	30,7	120,1	129,9
Белоглазка, см	59,5	54,8	48,4	42,5	41,8	134,2	168,1
Верхняя граница гипса и легкорастворимых солей, см	84,1	63,2	50,0	53,5	47,1	170,6	—

Примечание. 1 — каштановая; 2 — каштановая солонцеватая; 3 — каштановая сильносолонцеватая; 4 — солонец глубокосолончаковатый; 5 — солонец солончаковатый; 6 — темноцветная; 7 — лугово-темноцветная.

свойств компонентов комплексов и обосновывают подход к их мелиорации на основе представлений о пространственной неоднородности почвенного покрова.

Как указывалось, почвам совхоза «Новоселовский» свойственно проявление различных стадий деградации, которая отражается на водно-физических свойствах (табл. 16).

Согласно табл. 16 интенсивность коркообразования наибольшая на глубокосолончаковатых и солончаковатых солонцах и наименьшая на темноцветных и лугово-темноцветных почвах. Мощность корки на последних почвах наименьшая, несмотря на относительно повышенное поступление влаги в виде искусственного дождя и поверхностного микростока при поливе.

В солонцах в гор. В₂ сухой остаток превышает 0,5%, велик он и в соответствующих слоях подтипов каштановых почв. Количество поглощенного натрия в различных видах солонцов составляет 15—20% емкости обмена. Каштановые почвы также солонцеваты.

В связи с тем, что комплексы ирригационно-полугидроморфных каштаново-солонцовых почв характеризуются неблагоприятными агрофизическими свойствами, изучена роль техники полива в формировании этих свойств.

Производственные опыты 2—4 предусматривали изучение на одном объекте различных комбинаций мелиоративных

Таблица 16

Физико-химическая характеристика ирригационно-полугидроморфных почв

Показатель	Горизонт	Почва						
		1	2	3	4	5	6	7
Гумус, %	А	4,10	4,05	3,51	3,27	2,86	4,82	5,04
	В ₁	3,81	3,54	3,00	2,69	2,21	4,00	4,39
	В ₂	2,17	2,05	1,50	1,30	1,16	2,81	2,95
Сумма поглощенных катионов, мг-экв на 100 г почвы	А	28,1	26,0	24,1	20,2	18,8	30,3	34,5
	В ₁	34,2	36,2	36,7	35,8	32,7	32,1	33,3
	В ₂	30,8	31,5	30,9	30,6	27,8	32,0	31,5
Na, % от суммы поглощенных катионов	А	3,0	2,5	10,0	16,9	18,4	2,0	2,3
	В ₁	5,9	10,1	12,5	19,8	20,1	2,0	2,7
	В ₂	5,9	8,7	12,4	16,1	15,0	2,5	2,2
Сухой остаток, %	А	0,11	0,11	0,13	0,13	0,18	0,06	0,05
	В ₁	0,18	0,18	0,22	0,24	0,33	0,08	0,08
	В ₂	0,29	0,32	0,39	0,48	0,65	0,09	0,11
Плотность, г/см ³	Корка	1,60	1,57	1,65	1,65	1,68	1,48	1,58
	А	1,29	1,29	1,39	1,38	1,42	1,24	1,27
	В ₁	1,34	1,40	1,52	1,56	1,56	1,30	1,30
	В ₂	1,45	1,47	1,60	1,63	1,65	1,36	1,35
	С	1,57	1,60	1,64	1,69	1,68	1,42	1,44

Примечание. 1 — каштановая; 2 — каштановая солонцеватая; 3 — каштановая сильносолонцеватая; 4 — солонец глубокосолончаковатый; 5 — солонец солончаковатый; 6 — темноцветная; 7 — лугово-темноцветная.

воздействий с целью выбора их совокупности. Предусматривалось управление режимом техники полива, составом ППК, регулирование гидрологического режима.

Техника полива дождеванием с использованием дождевального агрегата ДДА-100МА определяется детализацией схемы его движения при заданной поливной норме. В настоящее время, особенно в связи с расширяющимся использованием широкозахватной дождевальной машины «Кубань» и ее модификаций, расширяется использование импульсного режима дождевания.

Этот режим давно апробирован и зарекомендовал себя положительно на стационарных системах дождевания. На этом основании он внедрен на машине «Кубань» и реализован таким образом, что при постоянной скорости движения 120 м/с в режиме смены позиций средняя скорость регулируется соотношением фаз «движение — остановка». Чем больше длительность последней фазы, тем ниже средняя скорость движения и выше подаваемая поливная норма. Бли-

зость значений мгновенной интенсивности искусственного дождя машины «Кубань» и агрегата ДДА-100МА, соответственно 1,1 и 2,5 мм/мин, часто применяется в качестве обоснования перехода на импульсный режим и в последнем случае.

Производственный опыт 2 проведен по следующей схеме: импульсный, длительность остановки 18 мин; импульсный, длительность остановки 12 мин; импульсный, длительность остановки 6 мин; непрерывный, бьеф 100 м, число проходов 5; непрерывный, бьеф 100 м, число проходов 7; непрерывный, бьеф 200 м, число проходов 9.

Данные табл. 16 указывают на то, что необходимо вносить химические мелиоранты в большинство почв, являющихся компонентами солонцовых комплексов на орошаемом участке совхоза «Новоселовский».

Управление составом ППК осуществлялось в производственном опыте 3.

Были изучены химические мелиоранты — способы расчета их доз, предложенные в разд. 2.

В качестве химических мелиорантов применены: глиногипс Николаевского месторождения, глиногипс местного месторождения (землепользование совхоза «Новоселовский»), фосфогипс Воскресенского химкомбината.

Предполагаемые к осуществлению химической мелиорации источники гипса для реализации обменной реакции в ППК являются удовлетворительными (табл. 17). Относительно повышенное количество хлора в условиях орошения не имеет решающего значения, исходя из возможности выщелачивания при влагозарядке и поливах.

Таблица 17

Характеристика мелиорантов

Источник мелиоранта	P ₂ O ₅ , %	Гипс, %	Хлор, %	Физическая глина, %	Расчетная доза, т/га
Глиногипс Николаевского месторождения	—	64,3	1,2	31,4	18
Глиногипс местного месторождения	—	52,1	1,8	42,7	22
Фосфогипс Воскресенского химкомбината	3,2	86,8	1,3	8,9	14

Вначале предпочтение было отдано местному глиногипсу, как наиболее доступному. На последующих стадиях апробирован фосфогипс Воскресенского химкомбината.

Схема опыта 3 по изучению влияния доз химических мелиорантов на водно-физические и физико-химические свойства солонцов следующая.

Опыт 3.1 — местный глиногипс.

1. 12 т/га (0,75 дозы).
2. 16 т/га (полная доза).
3. 20 т/га (1,25 дозы).
4. 24 т/га (1,5 дозы).
5. Контроль без мелиоранта.

Опыт 3.2 — глиногипс Николаевского месторождения.

1. 8 т/га (0,66 дозы).
2. 12 т/га (полная доза).
3. 16 т/га (1,33 дозы).
4. Контроль без мелиоранта.

Опыт 3.3. — фосфогипс Воскресенского химкомбината.

1. 6 т/га (0,6 дозы).
2. 8 т/га (0,8 дозы).
3. 10 т/га (полная доза).
4. 12 т/га (1,2 дозы).

Во всех вариантах предусмотрено внесение навоза (40 т/га), после чего осуществляется заделка культиватором КП-4 на глубину 10—12 см и вспашка на 27—30 см плугом ПН-5-35 и влагозарядковый полив в два приема общей нормой 1200 м³/га для мобилизации обменных реакций в ППК и вывода продуктов обмена. Фосфорные удобрения применяли только в опытах 3,1 и 3.2.

Производственный опыт 4 поставлен с регулированием гидрологического режима на фоне химической мелиорации фосфогипсом дозами 8 и 10 т/га.

Технология регулирования гидрологического режима осуществлялась бороздопрерывателем ППБ-0,6 по вышеописанной методике. Ниже приведена схема опыта 4.

1. Фосфогипс — 8 т/га.
2. Фосфогипс — 10 т/га (контроль).
3. Фосфогипс — 8 т/га + ППБ-0,6.
4. Фосфогипс 10 т/га + ППБ-0,6.

3.2. Влияние регулирования гидрологического режима на влажность различных типов почв

Данные, характеризующие режим влажности, складывающийся на отдельных ЭПА по вариантам опыта, приведены в табл. 18. Характерно, что в контрольных вариантах в течение всего периода исследований наблюдалась пространственная вариабельность влажности почв [104, 143]. На контроле 1 (опыт 1) в микропонижениях в результате поливов почва промачивалась на глубину более 200 см, причем даже в слое 140—160 см влажность не была ниже 18% массы абсолютно сухой почвы. При этом промачивание микроповышений, занятых, как правило, солончаковатыми солонцами, составля-

Таблица 18

Влажность почв на динамических площадках через 2 сут после вегетационного полива, % массы абсолютно сухой почвы 1982 г.

Слой почвы, см	Вариант											
	3			4			5			6		
	Сн		Кл	Сн		Кл	Сн		Кл	Сн		Кл
	К	Кл	Кл	К	Кл	Кл	К	Кл	Кл	К	Кл	Кл
0—20	20,6	22,1	28,6	23,0	23,4	26,4	23,7	23,1	27,6	24,6	21,4	24,8
20—40	21,3	22,1	28,8	23,8	23,8	27,8	22,8	23,7	27,0	22,0	21,4	24,6
40—60	14,8	18,7	28,8	15,9	19,6	26,4	18,4	20,7	26,8	15,0	14,0	20,1
60—80	13,6	15,9	29,0	12,9	16,0	27,1	15,9	16,4	26,5	14,6	13,0	16,3
80—100	12,7	14,2	27,6	13,1	14,1	24,3	14,1	14,7	25,1	13,1	13,3	15,4
100—120	13,9	13,8	25,1	12,8	14,0	22,1	13,9	14,8	23,8	13,6	12,5	15,0
120—140	13,4	13,9	21,0	12,9	13,0	19,3	12,1	13,1	20,1	12,1	11,4	14,0
140—160	12,0	12,0	19,2	11,9	12,2	18,8	10,4	12,6	17,2	11,3	10,7	13,1

Продолжение

Слой почвы, см	Вариант											
	7			8			9			10		
	Сн		Кл	Сн		Кл	Сн		Кл	Сн		Кл
	К	Кл	Кл	К	Кл	Кл	К	Кл	Кл	К	Кл	Кл
24,1	25,8	26,4	27,4	24,6	24,6	27,1	24,9	25,9	26,4	23,1	23,1	25,0
24,3	24,9	26,9	27,5	24,0	24,9	27,0	24,6	25,4	26,7	22,3	22,3	24,7
22,0	23,9	25,7	25,9	23,3	23,3	25,8	23,8	24,7	25,8	19,4	19,4	23,4
16,4	17,3	19,3	20,4	17,8	20,4	22,9	20,4	20,4	22,0	15,4	15,4	20,1
14,8	16,0	19,4	20,4	15,3	17,2	19,0	16,8	16,9	17,2	14,8	14,8	16,9
14,1	13,0	18,9	19,0	14,9	17,2	15,3	14,0	13,7	14,4	14,1	14,1	13,7
13,7	13,6	16,8	17,1	13,5	13,8	13,9	12,2	11,5	11,9	14,2	14,2	15,1
13,7	11,8	14,9	15,5	13,2	12,7	13,0	11,0	10,2	11,5	11,9	11,9	12,6

Примечание. Сн — солонец, К — каштановая почва; Кл — лугово-каштановая почва.

до лишь 20—30 см. Кроме этого наблюдался поверхностный сток и с промежуточных по высоте плоских позиций. В результате локализованные здесь зональные каштановые почвы увлажнялись до глубины 60—65 см, что несколько ниже расчетного уровня (75—80 см), соответствующего размеру поливной нормы.

Характер процессов увлажнения при комплексном методе мелиорации (контроль 2) отличался от изложенного (контроль 1). В результате механического измельчения иллювиального горизонта на солонцовых ЭПА отмечалось увеличение глубины промачивания от 20—40 до 40—60 см [119]. Как известно, зональные почвы также отличаются определенным уровнем солонцеватости. Поэтому комплексный метод позитивно сказался и на их увлажнении, увеличилась глубина промачивания на 20 см по сравнению с контролем 1. Однако на контроле 1 и контроле 2 уровень промачивания микропонижений был значительно выше, чем у остальных почв. Таким образом, комплексный метод мелиорации наряду с определенным позитивным изменением пространственного режима влажности не обеспечивает его полного качественного преобразования [197, 198]. Вариабельность содержания влаги в почвах смежных ЭПА ниже, чем при химическом методе, однако остается на таком уровне, который способствует существенному проявлению взаимного влияния почв. Важное значение имеет возникающая за счет этого тенденция прироста вариабельности режима влажности в мелиоративный период. Согласно полученным в исследованиях данным, разница во влажности в слое 60—80 см между этими почвами в 1979 г. составляла 10,1%, а в 1982 г. — 12,2%. Это обусловлено постепенным уплотнением подвергнутых мелиоративной вспашке горизонтов и увеличением перераспределения оросительной воды по микрорельефу.

Установлено, что эффективность воздействия регулирования гидрологического режима на влажность в профиле отдельных компонентов почвенного комплекса зависит от того, на каком виде основной обработки было применено разработанное мероприятие. Приемы регулирования недостаточно воздействуют на характер пространственного режима влажности при использовании в качестве фона обычной вспашки с гипсованием (варианты 3, 4, 6). Опыт показывает (табл. 18) значительную изменчивость влажности на отдельных ЭПА, что связано с отсутствием механического разрушения солонцового горизонта.

В условиях относительно высокой интенсивности дождя ДДА-100М при незначительной водопроницаемости почв происходило переполнение регулирующей сети ячеек, лунок, прорывистых борозд и перераспределение части воды по микро-

рельефу, которое в вариантах 3, 4 в течение вегетационного периода увеличивалось, поскольку размывались поврежденные локальной ирригационной эрозией неустойчивые перемычки искусственного нанорельефа. На контроле 1 отмечалось перераспределение влаги в виде внутрипочвенного стока согласно микрорельефу по плужной подошве, располагающейся в пределах иллювиального горизонта, что усугубляет ее негативную роль. Таким образом, на рассмотренных вариантах гидрологический режим по качественному признаку приближался к исходному.

Исключение из вариантов регулирования на обычной вспашке представляет вариант, где применялся БЩН-3. Это орудие, в отличие от остальных, оказывает весьма заметное влияние на поверхностное поступление влаги и в особенности на ее распределение в почвенном слое. При этом боковое подпитывание из щелей значительно улучшает поступление влаги в иллювиальный и подсолонцовый горизонты и ускоряет мелниоративный процесс. Кроме того, обработка щелерезом выполняется периодически, что улучшает промачивание микроповышений и переходных позиций. В результате в рассматриваемом варианте пространственная изменчивость увлажнения почв была ниже, чем на контроле 1. Отмечено также ее снижение за четыре года исследований.

Следует отметить, что использованные орудия не обеспечивают полного регулирования гидрологического режима на фоне обычной вспашки. Так, перепад влажности между солонцовыми и лугово-каштановыми ЭПА в вариантах 3—6 составлял 10,4—14,0% в слое 60—100% (табл. 18).

В вариантах 7—10, где регулирование гидрологического режима применено в сочетании с комплексным методом мелниорации, большое значение приобретает улучшение агрофизических свойств и в особенности значительное увеличение водопроницаемости. Интенсивность дождя ДДА-100М лишь немного превосходит скорость впитывания даже на ЭПА комплекса с наименьшей водопроницаемостью. Поэтому отсутствует переполнение регулирующей сети и не происходит перераспределения влаги по поверхности. Лишь в вариантах 7, 8, где регулирующая сеть отличается малой устойчивостью, наблюдается незначительное перераспределение влаги. Кроме того, как и в вариантах 3, 4, сказывается уплотнение поверхностных горизонтов почвы в результате механического воздействия рабочих органов орудий, создающих углубления при вдавливании выступов в почву ПЭК-1,6; СЗС-2,1. В вариантах 3, 4, 7 в поверхностном слое отмечается некоторое снижение водопроницаемости и скважности и прирост объемной массы по отношению к контрольным вариантам (табл. 19). Однако влияние уплотнения имеет ограниченную глубину и в

Таблица 19

Влияние различных приемов регулирования гидрологического режима на физические свойства солонцов (1982)

Вариант	Глубина, см	Водопроницаемость, мм за 6 ч	Плотность, г/см ³	Скважность, %
1	0—10	193	1,32	49
	20—30	161	1,38	46
	40—50	158	1,56	40
2	0—10	234	1,25	52
	20—30	201	1,30	50
	40—50	187	1,43	45
3	0—10	178	1,37	47
	20—30	160	1,42	45
	40—50	163	1,52	41
4	0—10	174	1,35	48
	20—30	162	1,40	45
	40—50	151	1,56	40
7	0—10	244	1,22	53
	20—30	221	1,30	50
	40—50	189	1,37	47
8	0—10	199	1,34	48
	20—30	211	1,38	47
	40—50	193	1,43	45
5	0—10	193	1,30	50
	20—30	208	1,30	50
	40—50	184	1,45	44
10	0—10	241	1,25	52
	20—30	233	1,27	51
	40—50	191	1,37	47

слое 40—50 см практически не прослеживается. В вариантах, где для создания регулирующей сети использовались БЩН-3 и ППБ-0,6, которые не вызывают уплотнения поверхности, плотность почвы мало отличалась от контрольной.

Складывающийся при регулировании гидрологического режима на фоне комплексного метода мелниорации характер поверхностного поступления влаги определяет особенности промачивания отдельных ЭПА. В отличие от рассмотренных выше вариантов опыта, пространственная вариабельность глубины увлажнения почв была существенно снижена, а абсолютная величина изменчивости составляла от 0,2—0,25 м в варианте 7 и до 0,05—0,1 м в варианте 10. Согласно данным табл. 18, в вариантах 7—10 различие в содержании влаги после полива в соответствующих горизонтах микроповы-

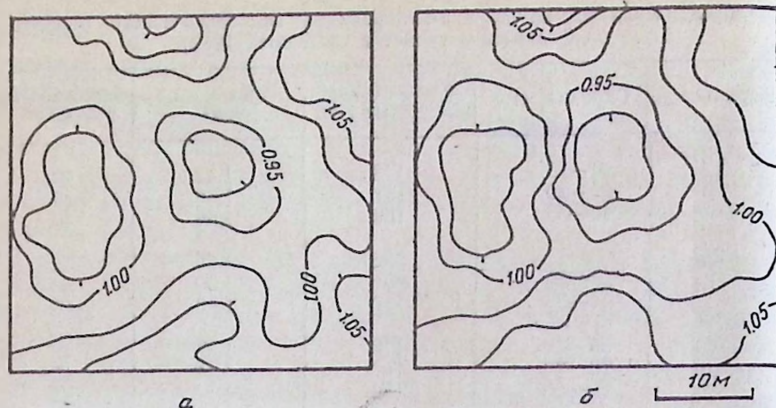


Рис. 27. Строение поверхности почвы в варианте «трехъярусная вспашка+8 т/га глиногипса»: а — 1979 г.; б — 1982 г.

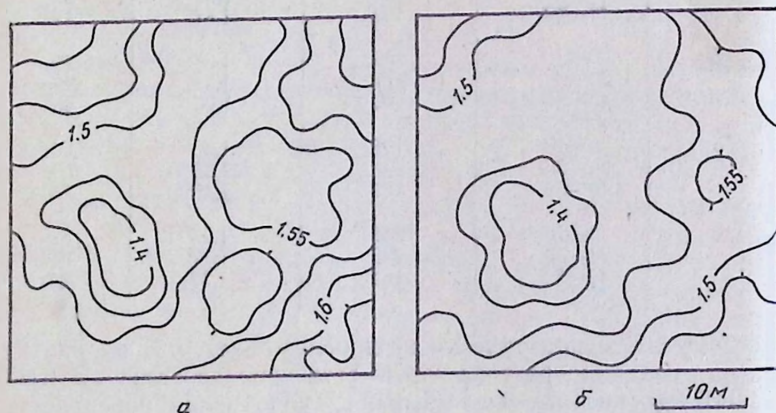


Рис. 28. Строение поверхности почвы в варианте «трехъярусная вспашка+8 т/га глиногипса+ППБ-0,6»: а — 1979 г.; б — 1982 г.

шений и микропонижений было на порядок ниже, чем в вариантах 3, 4, 6.

В связи с тем, что в условиях комплексного почвенного покрова микрорельеф является важным фактором пространственной дифференциации водного режима смежных ЭПА, сделана попытка определить характер изменения формы поверхности в зависимости от приемов регулирования гидрологического режима. Для этого использовались крупномасштаб-

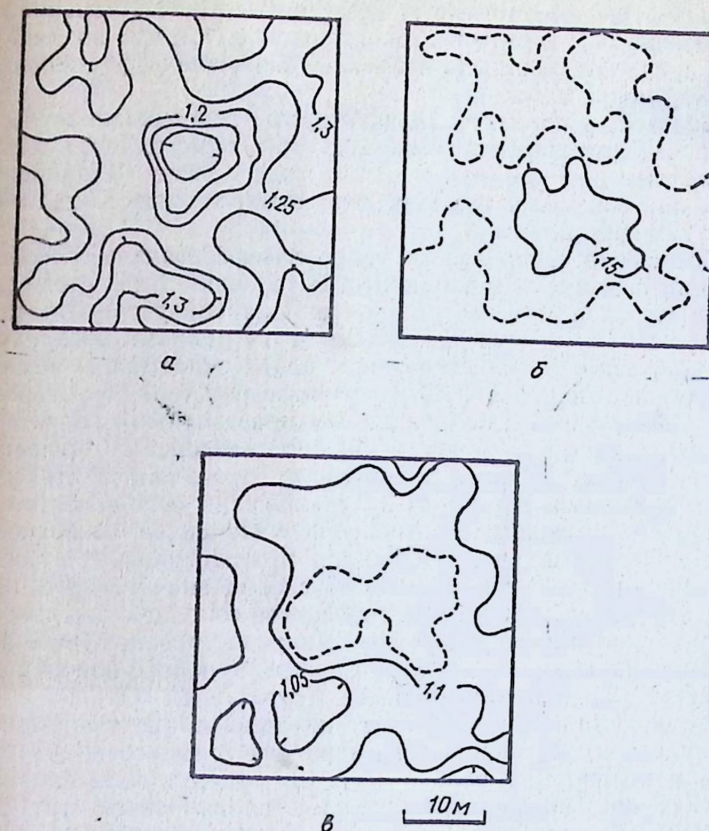


Рис. 29. Строение поверхности почвы в варианте «планировка методом буртования+8 т/га глиногипса»: а — 1979 г. до планировки; б — 1979 г. после планировки; в — 1982 г.

ные планы с сечением рельефа горизонталями через 0,05 м, построенные по материалам топографических съемок 1979 и 1982 гг. (рис. 27—29). На контроле 1 изменчивость микрорельефа не зафиксирована, подобный результат образуется и на контроле 2. Некоторые несовпадения горизонталей одного номера на рис. 22 в этом случае можно отнести за счет вариабельности поверхности в связи с обработкой почвы.

Характер строения поверхности почвы за период исследований в вариантах 3, 4, 6 оставался стабильным.

В вариантах регулирования на фоне комплексного метода мелиорации зарегистрировано существенное снижение вариа-

бельности микрорельефа (рис. 28). Высота микроповышений уменьшилась, их форма стала менее отчетливой, изменилась интенсивность перераспределения влаги там, где по каким-либо причинам возникало временное снижение эффективности регулирующей сети.

Наконец, в варианте 11, в котором первоначально было обеспечено отклонение геодезических отметок от нулевой плоскости $\pm 3-5$ см, через четыре года после планировки (рис. 29) снизились геодезические отметки поверхности на участках срезки.

Специфика изменчивости микрорельефа связана с особенностями почвообразующих пород. В условиях сухой степи они в значительной степени представлены карбонатно-сульфатными лессовидными сильнозасоленными суглинками и глинами, которые, как известно, склонны к просадочности под воздействием увлажнения в результате рекомбинации структурных отдельностей и выщелачивания легкорастворимых солей.

Просадочные явления в связи с введением орошения (1971) к моменту закладки опыта уже закончились. Поэтому в тех вариантах, где характер увлажнения был качественно близким к исходному, соотношение элементов поверхности изменилось мало (рис. 27). Гидрологический режим, который применим в вариантах 7—10, обусловил значительный прирост промачивания глубоких горизонтов солонцов, это способствовало некоторому снижению микроповышений (рис. 29). Рассматриваемая особенность почвообразующих пород проявилась также и при планировке буртованием. Однако здесь просадочность была значительно интенсивней. В то время как в вариантах регулирования гидрологического режима просадкам подвергался только слой 40—80 см (зона прироста глубины промачивания), в варианте с планировкой этот слой был значительно больше. При планировке обнаженной после буртования гумусного слоя поверхности срезке в первую очередь подвергаются иллювиальный и карбонатно-солевой горизонты (около 40 см) в связи с приуроченностью солонцовых ЭПА к микроповышениям (рис. 29а). На вскрытую поверхность в месте прежней локализации микроповышений непосредственно укладывался слой 15—20 см гумусового грунта из буртов (рис. 29б). При нивелированном в пространстве увлажнении большее промачивание этих участков определяет интенсивную просадочность. На окружающем пространстве промачивание остается близким к исходному уровню и просадки отсутствуют (рис. 29в).

Существенно то, что в варианте с использованием планировки на поверхности почвы отсутствуют препятствия для перераспределения влаги согласно формирующемуся микрорельефу. Складываются предпосылки дальнейшего локально-

го углубления промачивания на участках с наибольшей просадкой по типу положительной обратной связи. Поэтому наблюдается резкое ускорение мелиоративного эффекта на бывших микроповышениях. Однако одновременно происходит постепенная реставрация плоскозападного микрорельефа. В таких случаях характер последствий рассматриваемого приема на почвенной комбинации в целом оказывается неопределенным, поскольку не исключена параллельная реставрация и других сопряженных параметров микрокомплексности почвенного покрова. Характерно, что повторная съемка 1986 г. не выявила существенных изменений микрорельефа с 1982 г., что свидетельствует о релаксации неомикрорельефа в течение 4—5 лет.

Важным фактором, который наряду с регулированием гидрологического режима определяет протекание мелиоративного процесса при окультуривании солонцовых почв, является и техника полива. Общей чертой многочисленных способов реализации поверхностного полива и дождевания каштановых почв является высокая вероятность обесструктурирования и уплотнения почв, которая проявляется на любой глубине грунтовых вод. Разрушение исходной комковато-ореховатой структуры увеличивает плотность пахотного слоя от 1,2—1,25 до 1,4—1,45 г/см³. Формирующаяся ирригационная корка изменяет технологические свойства почв, препятствует нормальному росту сельскохозяйственных культур на ранних стадиях развития, неблагоприятно сказывается на урожайности в целом. Корка определяет характер мелиораций. Это обусловлено протеканием в почве двух процессов — мелиоративного и обесструктурирования, причем первый, в силу их противоположной направленности, значительно ослабляется. Коркообразование приводит к необходимости более раннего, чем требуется для нормального промачивания почв, прекращения полива, замедляющего обменные реакции в ППК, и снижающие интенсивность выщелачивания продуктов реакции.

Наконец, резко ослабляется эффективность регулирования гидрологического режима, поскольку вероятность переполнения формирующейся сети и ее разрушения при коркообразовании существенно повышается.

Полученные данные свидетельствуют о взаимосвязи пространственной неоднородности промачивания почв и режима дождевания. Более неравномерное распределение увлажнения почв орошаемого солонцового комплекса установлено: для машины «Кубань» в режимах «стоянка 60% и более, движение 40% и менее», для машины «Фрегат» в режимах «продолжительность оборота 120 ч и более», для агрегата ДДА-100МА в режимах «импульс 3—6 мин и более», «бьеф 100 м и менее».

Параметры почвы после полива при различных режимах движения

Режим движения	Пв		Пп		Пн	
	А	В	А	В	А	В
1	30	1,8	70	0,8	190	0,6
2	33	1,8	62	0,6	160	0,3
3	28	1,2	60	0,5	140	0,4
4	44	0,5	56	0,3	100	—
5	48	0,5	59	0,4	95	0,2
6	44	0,7	62	0,3	130	0,2

Примечания: 1. Пв — повышение микрорельефа; Пп — промежуточная позиция микрорельефа; Пн — понижение микрорельефа; А — слой промачивания, см; В — мощность ирригационной корки, см. 2. Режимы движения: 1 — импульсный (Т=18 мин); 2 — импульсный (Т=12 мин); 3 — импульсный (Т=6 мин); 4 — непрерывный (Б=100 м, П=5); 5 — непрерывный (Б=100 м, П=7); непрерывный (Б=200 м, П=9).

микрорельефа связан с характером подачи оросительной воды. Импульсный режим при выбранных длительностях импульса приводит к недопустимой неравномерности полива. Кроме того, происходит интенсивное образование корки. Мощность корки, несмотря на относительно малый слой промачивания, наибольшая на солонцах, занимающих повышения микрорельефа. Это обусловлено наименьшей прочностью агрегатов и микростоком с этих позиций микрорельефа, который усугубляет воздействие высокой интенсивности дождя. В режимах 4—6 обеспечивается приближение средней интенсивности дождя за один проход (П) по бьефу (В) к скорости инфильтрации. Однако при большем числе проходов (6-й режим) это соотношение ухудшается. Вместе с тем даже изменение режима движения агрегата не обеспечивает оптимального с точки зрения протекания мелиоративного процесса [156, 102] промачивания компонентов солонцового комплекса. Режим влажности элементов солонцового комплекса в опыте 3 (фазы 1—3) в основном определяется тем, что во всех вариантах опыта был выбран непрерывный режим движения ДДА-100МА, П=7; Б=200 м.

Дифференциация промачивания происходила по типу режимов 5—6 и изменялась согласно природной дифференциации свойств ЭПА внутри таксонов с некоторой тенденцией к инвентированию увлажнения в фазе опыта 3.3, что связано с большей эффективностью воздействия фосфогипса на водопроницаемость почв.

И. Н. Антипов-Каратаев [15] располагает поглощенные ка-

Если задана низкая средняя скорость движения машины «Кубань» или большая длительность оборота машины «Фрегат», то происходит существенное перераспределение оросительной воды по микрорельефу между почвами, являющимися компонентами солонцового комплекса.

В первом случае диапазон изменчивости промачивания 0,35—1,4 м. Во втором, в силу более высокого качества искусственного дождя, 0,4—1,2 м.

Неблагоприятный режим увлажнения проявляется при использовании агрегата ДДА-100МА. Изменчивость промачивания 0,25—1,6 м, причем довольно интенсивное поверхностное перераспределение оросительной воды за пределы поливного участка определяет недовыполнение поливной нормы.

На орошаемых почвах каштаново-солонцовых комплексов не допускается выбирать приемлемые только на почвах легкого механического состава режимы работы дождевателей с длительной концентрацией номинального расхода над участком мгновенного охвата дождем.

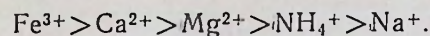
Обеспечение качества полива (изменчивость глубины промачивания 0,5—0,8 м) даже при условии регулирования гидрологического режима требует соблюдения следующих режимов полива: машина «Кубань» — движение 50% и более, стоянка 50% и менее, выдача заданной поливной нормы за 2—3 прохода; машина «Фрегат» — длительность оборота 100 ч и менее, выдача заданной поливной нормы за 2—4 оборота; агрегат ДДА-100МА — работа в движении 500 м/ч, бьеф 150 м и более.

Выполнение перечисленных параметров полива — необходимое условие благоприятного протекания мелиоративного процесса, поскольку прирост глубины промачивания будет обеспечен на солонцах, статистически ($r=0,78$) характеризующихся приуроченностью к микроповышениям. Это в сочетании со щадящим режимом искусственного дождя уменьшит коркообразование и ускорит мелиорацию солонцов.

Поскольку последние являются основным лимитирующим фактором, увеличивающим продуктивность орошаемых каштаново-солонцовых почв, очевидно, что регулирование гидрологического режима на фоне химического и комплексного методов окультуривания в сочетании с оптимизацией техники полива обеспечивает эффективную гомогенизацию почвенного покрова и стабильность его высоких мелиоративных свойств.

В табл. 20 представлены схема и результаты опыта 2, выполненного в совхозе «Новоселовский». Изучены режимы движения дождевального агрегата ДДА-100МА в процессе полива. Эксперимент проведен на фоне зональной агротехники возделывания в посевах кукурузы на силос. Данные свидетельствуют, что режим увлажнения различных позиций

тионы по их влиянию на повышение скорости фильтрации следующим образом:



На скорость фильтрации воздействует валентность поглощенного катиона. Опыты Н. П. Панова и Н. А. Гончаровой [180] показали, что насыщение почв и грунтов ионами Na^+ уменьшает скорость фильтрации воды. По данным К. П. Пака [177], оказалось, что увеличение обменного натрия от 2,6% емкости поглощения до 20,5% (т. е. в 8 раз) привело к падению водопроницаемости в 75 раз. Автор объясняет это прежде всего меньшим содержанием водопрочных почвенных агрегатов в солонце.

Значительное сокращение фильтрационной способности грунтов, вызываемое присутствием в них иона Na^+ , объясняется его диспергирующим действием, вследствие чего уменьшается объем пор и увеличивается содержание связанной воды, которая препятствует передвижению свободной воды.

Высокая набухаемость коллоидов в солонцах — главная причина низкой водопроницаемости.

Водопроницаемость почвы в зависимости от способа ее обработки и характера использования также не остается постоянной.

Изучая водопроницаемость почвы под влиянием различных культур, в том числе многолетних трав, И. Б. Ревут [201] пришел к выводу, что наибольшая водопроницаемость у почвы с посевами по пласту. На полях с посевами по обороту пласта водопроницаемость почвы уменьшилась, так как многолетние травы способствуют восстановлению структуры, а многочисленные обработки при возделывании однолетних, наоборот, разрушают ее.

Глубокие мелноративные обработки также улучшают условия водопроницаемости. По данным А. Ф. Вадюниной [41], на второй год после плантажной вспашки на пару водопроницаемость была в 1,5 раза выше, чем при обычной. Однако на седьмой год после вспашки фильтрация на плантажированном солонце имела более низкие значения по сравнению с обычной. Исследованиями А. Ф. Большакова [33] выявлено положительное влияние плантажа и вспашки с почвоуглублением на улучшение водопроницаемости солонцов, которая приблизилась к водопроницаемости зональных светло-каштановых почв, особенно под посевом люцерны.

Результаты исследования влияния глиногипса на водопроницаемость солонцов приведены в табл. 21 (опыт 3.1).

Как видно из табл. 21, солонцы обладают низкой водопроницаемостью. Этим в значительной мере обуславливается

Таблица 21

Водопроницаемость солонцов в зависимости от доз глиногипса, мм

Доза глиногипса, т/га	Часы наблюдений			Всего профильтровано за 3 ч
	1-й	2-й	3-й	
Контроль	22,4	20,5	12,1	55,0
12	36,7	27,4	15,7	79,8
16	40,1	30,3	22,4	92,8
20	50,4	43,3	38,7	127,4
24	48,3	41,1	38,2	130,6

постоянный дефицит влаги, особенно в подпахотном слое. В то же время способность почвы поглощать и накапливать влагу в полной мере определяет рост и развитие растений. Поэтому любой прием, направленный на повышение плодородия солонцов, должен оцениваться с точки зрения своего влияния на водный режим.

Необходимо отметить, что гипсование существенно образом повысило водопроницаемость почв. Характерно, что более высокие дозы глиногипса соответственно в большей степени улучшили водопроницаемость.

Неодинаковая реакция растений на плотность почвы, разное изображение ее оптимальных значений на разных типах почв, почвенных разновидностей и большое влияние, которое она оказывает на водные, воздушные и биологические свойства, позволили считать ее основным первичным и определяющим элементом физики почв.

Плотность почвы обуславливает количество доступной для растений влаги, так как при уплотнении происходит ее иммобилизация. Отмечена почти пропорциональная зависимость между количеством недоступной для растений влаги и степенью уплотнения почвы. Плотность влияет на водный, воздушный и тепловой режимы, на интенсивность микробиологических процессов, а следовательно, и на обеспечение растений элементами питания. Некоторыми учеными было установлено снижение полевой всхожести семян, начиная с плотности, равной 1,34 г/см³. Основные причины этого снижения — высокое механическое сопротивление, оказываемое корнями при проникновении их вглубь, и слабая воздухопроницаемость. Изменчивость корневой системы проявляется в зависимости от плотности почвы. Оптимальная плотность почвы для большинства сельскохозяйственных растений 1,0—1,25 г/см³. Увеличение плотности сверх этого предела снижает урожайность сельскохозяйственных культур. По заключению М. Г. Чижевского [229], при плотности более

1,3 г/см³ агрегатность не проявляется и такие почвы требуют вспашки. Любая обработка столбчатых солонцов обуславливает значительные изменения плотности и соответствующее увеличение общей порозности. Глубокая безотвальная обработка улучшает водно-физические свойства солонцов только в год освоения, а в последующие годы происходит уплотнение почвы, восстановление морфологического профиля солонцов, что увеличивает плотность и уменьшает общую порозность почвы уже на второй год мелиоративного освоения.

При мелиорации солонцов Волгоградской области на богаре отмечалось снижение плотности при трехъярусной обработке. Н. К. Балябо [21], изучая динамику плотности, показал, что даже в условиях орошаемого земледелия по фону мелиоративной вспашки в слоях глубже 20 см сохраняется более рыхлое сложение (1,3—1,5 г/см³), чем на контроле (1,5—1,6 г/см³). Только при мелиоративных обработках целинных черноземных степных солонцов существенно уменьшалась плотность и увеличивалась порозность аэрации.

Исследуемые нами почвы обладают высокой плотностью. В естественном состоянии на целине плотность верхнего (0—20 см) слоя составляет 1,27—1,30 г/см³. В иллювиальном и карбонатно-солевом горизонтах она увеличивается до 1,40—1,50 г/см³ и более. На пашне, ранее освоенной обычным способом, в отдельные годы пахотный слой уплотняется еще больше, чем на целинных землях. Исследования влияния различных способов разовой мелиоративной обработки на значение плотности солонцов и зональной почвы показали, что оно различно (опыт 3.1).

Как видно из приведенных данных (табл. 22), вспашка солонцов, ранее освоенных обычным способом на глубину

Таблица 22

Изменение плотности солонцов в зависимости от дозы мелиоранта, г/см³

Вариант	Год исследования	Слой, см				
		0—10	10—20	20—30	30—40	40—50
Контроль	1986	1,26	1,30	1,45	1,54	1,62
	1987	1,24	1,28	1,47	1,57	1,60
Глиногипс —	1986	1,24	1,27	1,42	1,56	1,63
12 т/га	1987	1,22	1,25	1,45	1,60	1,62
Глиногипс —	1986	1,27	1,25	1,44	1,54	1,60
16 т/га	1987	1,20	1,22	1,40	1,50	1,57
Глиногипс —	1986	1,23	1,26	1,43	1,55	1,62
20 т/га	1987	1,18	1,20	1,32	1,38	1,54
Глиногипс —	1986	1,25	1,27	1,44	1,57	1,64
24 т/га	1987	1,18	1,20	1,33	1,36	1,56

20—22 см, обеспечивает более или менее оптимальную для роста сельскохозяйственных растений плотность только пахотного слоя, ежегодно подвергаемого обработке. В солонцовом и подсолонцовом горизонтах плотность почвы за период исследований практически не изменялась.

Гипсование несколько снижает плотность пахотного (0—20 см) слоя почвы, куда вносился мелиорант. Низкие дозы глиногипса практически не изменили плотность подпахотного слоя, лишь высокие дозы (20—24 т/га) снизили ее в слоях 30—40 и 40—50 см.

Режим влажности элементов солонцового комплекса в опыте 4 представлен в табл. 23. При химической мелиорации фосфогипсом различия влажности были, как и в опыте 3. Градиенты влажности, хотя они и не являются прямыми индикаторами интенсивности интритпочвенного массопереноса, довольно близки к значениям, зарегистрированным в опыте 1. С учетом близости почв двух объектов исследования, идентичности техники полива, химического характера мелиоративного воздействия (имеются в виду соответствующие варианты опыта 1), данные о влажности табл. 18 и 23 доказывают общность процессов массопереноса в орошаемых солонцовых почвах юга ЕТС без использования регулирования гидрологического режима.

Особенность данных опыта 4 состоит в том, что тенденция усиления дифференциации промачивания почв в последствии химической мелиорации не зарегистрирована. Возможно, что это определяется большим возрастом ландшафта на объекте «Новоселовский», геоморфологически приуроченном к относительно повышенной и более гидрографически проработанной части Ергенинской возвышенности, чем возраст ландшафта объекта «Новогашунский». В последнем случае геохимический вклад современного горизонтального массопереноса в характер ландшафта более существенен.

Необходимо отметить, что, изучив в течение трех лет режим влажности и последствия химической мелиорации на объекте «Новоселовский», возможно констатировать, с одной стороны, совпадение интенсивностей тенденции повышения водопроницаемости почв и нивелирования увлажнения компонентов солонцового комплекса при орошении дождеванием в условиях химической мелиорации, а с другой — тенденции дифференциации их водно-физических свойств в связи с воздействием горизонтально-бокового массопереноса. Этим соотношением, видимо, и объясняется успех и результатность химической мелиорации на различных объектах.

При регулировании гидрологического режима в опыте 4 получены следующие результаты: изменчивость глубины промачивания почв комплекса 0,05—0,20 м, без регулирования

Влажность почв солонцового комплекса при их мелиорации фосфогипсом
(опыт 4)

Слой, см	Контроль			Фосфогипс — 8 т/га			Фосфогипс — 10 т/га			Фосфогипс — 8 т/га + ГПБ = 0,6			Фосфогипс — 10 т/га + ГПБ = 0,6		
	Сп	К	Кл	Сп	К	Кл	Сп	К	Кл	Сп	К	Кл	Сп	К	Кл
0—20	22,0	25,1	33,6	24,5	26,8	30,9	23,1	28,2	30,8	25,4	28,1	33,1	26,7	26,0	30,5
20—40	20,9	23,5	31,4	21,8	23,0	31,3	24,3	29,4	30,9	26,9	26,4	30,8	27,8	27,1	30,8
40—60	15,0	18,4	30,6	15,6	19,1	26,4	16,6	16,9	26,4	20,6	19,1	24,5	20,9	20,4	27,5
60—80	13,9	13,4	21,5	14,9	14,2	19,3	15,3	14,1	20,1	15,1	16,1	19,1	16,4	16,9	19,0
80—100	13,4	12,6	20,4	13,1	11,6	19,9	14,1	13,5	16,5	12,8	12,9	13,6	12,3	13,1	14,8
100—120	10,8	11,3	16,9	11,8	13,0	15,6	10,4	12,1	17,1	11,0	11,9	11,0	11,3	11,4	15,6
120—140	11,5	10,8	15,1	12,1	11,5	13,1	11,0	11,3	13,3	12,4	11,3	13,3	11,0	12,3	13,0
140—160	11,9	11,6	12,7	13,0	10,4	12,0	10,3	12,1	11,4	12,5	10,9	12,0	11,4	10,4	11,9

при тех же дозах промачивание составляло 0,5—1,2 м, а его варьирование — 0,4—0,7 м, независимо от гидрологического режима опыт 4 отличается стабильностью постмелиоративного гидрологического режима.

В последствии мелиорации регулирование гидрологического режима обеспечивало минимальную пространственную изменчивость влажности почв (табл. 23). При зарегистрированных горизонтальных градиентах влажности термодинамика процесса массопереноса будет определяться не столько этими малыми различиями, сколько находиться под влиянием спонтанных отличий индивидуальных почвенных профилей и их характеристик водоудерживания. Утверждение доказывает, что возможна горизонтальная миграция влаги при любой степени однородности промачивания почв из-за присущей им анизотропности.

3.3. Управление солевым режимом — основное условие интенсификации мелиоративного процесса

Главной особенностью солонцовых почв является наличие близко расположенного к поверхности солевого горизонта. Тип засоления преимущественно хлоридно-сульфатный, реже сульфатно-хлоридный. Это связано с высоким засолением почвообразующих и подстилающих пород.

В тесной связи с водным режимом находятся солевые процессы. Столбчатая, или призмовидная, структура солонцового горизонта в первый момент позволяет проникнуть влаге осадков до солевого слоя, а затем питать тонкокапиллярную систему солонца раствором.

Как указывает В. В. Егоров [98], там, где в процессе мелиорации мало изменяется солевой режим, сохраняются постоянные предпосылки для реставрации солонцовых свойств. Засоленный подсолонцовый горизонт является постоянным резервом обменного натрия, обеспечивая относительную устойчивость солонца в природе.

Поэтому возникает вероятность постепенного затухания мелиоративного процесса в вариантах 1—4 и 6 опыта 1, проведенного в совхозе «Новогашунский». Это обусловлено тем, что складывающийся здесь режим увлажнения повышенный не ликвидирует воздействия солевых аккумуляций на верхнюю часть почвенного профиля (табл. 24).

В то же время регулирование гидрологического режима на фоне комплексного метода мелиорации обеспечивает не только однородность режима увлажнения различных ЭПА, но и определяет интенсификацию увлажнения преимущественно солонцов. Складываются оптимальные условия для протекания мелиоративного процесса за счет выноса солей и продук-

Влияние приемов регулирования гидрологического режима на состав водной вытяжки из почв

Слой почвы, см	3				5				Контроль 1				11, солонец			
	1979		1985		1979		1985		1979		1985		1979		1985	
	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄
0—20	0,090	1,1	0,062	0,9	0,125	0,9	0,100	0,7	0,113	0,4	0,090	1,1	0,123	0,6	0,038	0,3
20—40	0,272	1,3	0,197	1,0	0,309	1,2	0,154	0,7	0,341	1,7	0,251	1,3	0,539	0,6	0,091	0,3
40—60	0,559	1,6	0,489	1,2	0,793	1,6	0,456	0,8	0,672	2,0	0,644	1,0	1,294	0,5	0,351	0,3
60—80	1,252	1,1	1,267	1,1	1,309	1,0	1,015	0,7	1,344	1,4	1,137	1,3	1,789	0,4	0,487	0,3
80—100	1,596	0,6	1,356	0,7	1,808	0,5	1,694	0,6	1,849	0,7	1,754	0,6	1,537	0,3	0,700	0,3
100—120	1,394	0,3	1,539	0,4	1,724	0,4	1,897	0,4	1,431	0,3	1,496	0,4	1,481	0,3	1,058	0,4
120—140	1,687	0,3	1,798	0,3	1,534	0,3	1,652	0,5	1,792	0,4	1,847	0,3	1,816	0,4	1,523	0,4
140—160	2,281	0,4	2,131	0,4	1,907	0,4	1,839	0,3	2,147	0,3	2,110	0,3	2,225	0,2	1,755	0,3

Продолжение табл. 24

Слой почвы, см	8				10				Контроль 2				11, лугово-каштановая почва			
	1979		1985		1979		1985		1979		1985		1979		1985	
	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄	сухой оста- ток, %	Cl/SO ₄
0—20	0,068	0,7	0,050	0,7	0,051	0,6	0,027	0,3	0,072	0,8	0,060	0,7	0,020	0,2	0,040	0,2
20—40	0,193	0,9	0,136	0,7	0,161	0,5	0,094	0,3	0,201	1,0	0,170	0,8	0,014	0,2	0,031	0,2
40—60	0,482	0,7	0,351	0,8	0,398	0,6	0,319	0,3	0,526	1,1	0,501	1,0	0,027	0,2	0,094	0,3
60—80	1,107	0,9	0,914	0,7	0,986	0,5	0,655	0,4	1,207	1,4	1,040	1,3	0,022	0,1	0,216	0,6
80—100	1,309	0,5	1,414	0,5	1,422	0,4	1,204	0,4	1,538	0,7	1,507	0,7	0,031	0,2	0,499	1,0
100—120	1,517	0,3	1,495	0,4	1,136	0,3	1,217	0,3	1,406	0,4	1,496	0,5	0,023	0,2	0,422	0,7
120—140	1,621	0,3	1,431	0,3	1,386	0,3	1,357	0,4	1,395	0,3	1,555	0,4	0,042	0,1	0,215	0,4
140—160	1,713	0,2	1,816	0,3	1,945	0,2	2,007	0,3	2,001	0,4	1,897	0,4	0,037	0,3	0,178	0,3

тов обменных реакций в нижележащие горизонты и тем самым исключается снижение мелиоративного эффекта.

Солевые процессы в рассматриваемой почвенной комбинации не ограничиваются вертикальным взаимодействием в профиле солонцово́й почвы на глубинах 30—60 см. Существенно воздействует на солевой режим трехмерная неоднородность термодинамического потенциала почвенной влаги. Изменчивость его связана с неравномерностью промачивания и разнообразна по вариантам опыта. Направление процессов переноса под воздействием градиентов термодинамического потенциала почвенной влаги обычно удовлетворительно аппроксимируется системой ортогональных траекторий эквипотенциалей и линий тока. Согласно нашим исследованиям, без регулирования гидрологического режима гидравлические линии тока имеют существенную тенденцию горизонтальной направленности. Соответственно зона преимущественного влаго-солепереноса начинается в слое 80—120 см микропонижения, а заканчивается в слое 40—80 см микроповышения.

Поскольку в условиях сухой степи верхние почвенные горизонты подвергаются значительному иссушению, на микроповышениях происходит резкое снижение потенциала влаги после полива или выпадения атмосферных осадков. Значительные градиенты потенциала вдоль линий тока формируются в связи с высокими значениями потенциала в нижних (80—160 см) горизонтах западин. Это в сочетании с существенной площадью зоны переноса определяет высокую интенсивность процессов солепереноса [117, 122]. Поэтому при неизменности общего запаса солей в почвенном слое происходит засоление микроповышений за счет смежных в пространстве почв (рис. 30а).

Расход влаги на физическое испарение и транспирацию вдоль линий тока ведет к росту ионной силы мигрирующего

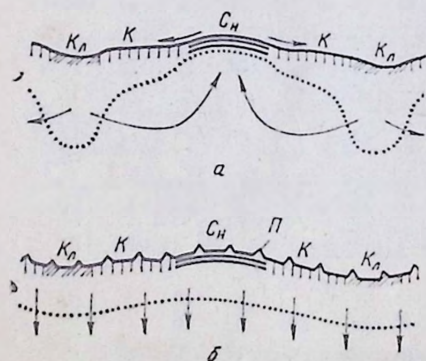


Рис. 30. Схема увлажнения почв солонцового комплекса: а — в природных условиях; б — при регулировании гидрологического режима; —→— направление движения влаги и солей; П — перемычки на борозде; ... — контур промачивания

раствора. Последняя, как было показано выше, способствует процессу ассоциации ионов, которая определяет формы ионов в почвенных растворах и соответственно тип засоления по участкам зоны переноса. Как известно, генеральная совокупность почв сухой степи отличается разнообразием типов химизма засоления отдельных типов почв и их генетических горизонтов. Рассматриваемый процесс переноса воздействует на несколько сопряженных в пространстве почв, жидкая фаза которых отличается разнообразным ионным составом. В одних условиях образуются относительно малоподвижные ионные пары, электронейтральные: $MgSO_4^0$, $CaSO_4^0$, $MgCO_3^0$, $CaCO_3^0$ и несущие заряд: $NaSO_4^-$, $NaCO_3^-$, $MgHCO_3^+$, $CaHCO_3^+$, в других — не связываемые в комплексы ионы Na^+ и Cl^- , обладающие более высокой подвижностью [153—175]. Вследствие этого вдоль гидравлических линий тока происходит метаморфизация химического состава почвенного раствора: начальный участок зоны солепереноса (микропонижение) — гидрокарбонатный; средний участок (промежуточная позиция) — сульфатный, хлоридно-сульфатный; конечный участок (микроповышение) — сульфатно-хлоридный. В пополнении солевых аккумуляций микроповышений и промежуточных по высоте позиции играет роль миграция наиболее подвижных ионов, которые формируют хлоридный или близкий к нему тип засоления почвы. Поэтому солевой режим комплексного почвенного покрова приобретает особое значение в процессе воздействия аккумуляций подсолонцового горизонта на свойства вышележащих слоев.

В природных условиях наблюдается постоянная миграция к микроповышениям не связываемых в комплексы ионов Na^+ и Cl^- , что обеспечивает устойчивость во времени солонцового процесса. При внесении химического мелиоранта этот процесс несколько ослабляется. Вместе с тем в результате формирования вертикальных градиентов потенциала влаги и химического потенциала раствора с переменным во времени знаком возникает непрерывная миграция натрия по профилю солонцовой почвы. Следовательно, мелиоративный процесс ослабляется и затем появляется возможность реставрации исходных неблагоприятных свойств.

На контроле 2 водный режим почв был несколько изменен в благоприятном направлении по сравнению с контролем 1. В результате углубления промачивания микроповышений на контроле 2 форма гидродинамической сетки (эквипотенциалы и линии тока) изменялась таким образом, что мощность зоны солепереноса уменьшилась, вместе с тем сохранились условия для проявления процесса горизонтального солепереноса. Известно, что для оптимального протекания мелиоративного процесса необходимо выщелачивание легкоподвижных

ных ионов, о чем свидетельствует снижение отношения Cl^3/SO_4 . В то же время это отношение в слое 60—80 см микроповышений, занятых солонцами, даже при комплексном методе мелиорации уменьшилось незначительно (табл. 24). Здесь за счет прироста промачивания максимум Cl/SO_4 сместился вниз только на 15—20 см. Поэтому сохранилась подробно рассмотренная возможность поступления NaCl в иллювиальный горизонт. Очевидно, что и на контроле 2 протекание солевых процессов в последствии мелиоративного приема может привести к восстановлению природных особенностей почвенного покрова [130].

В вариантах 3, 4, 6 регулирование гидрологического режима не смогло обеспечить заметные преимущества в воздействии на распределение солей по сравнению с контролем 1 и 2. Это связано с более значительным влиянием процессов горизонтального солепереноса в сравнении с положительным действием гипсования. 5-й вариант отличается тем, что проявление солепереноса за счет периодического щелчевания было меньше и тенденция к реставрации солевого режима не зарегистрирована. За период исследований наблюдалось увеличение глубины расположения солевых аккумуляций на микроповышениях и определенное снижение в них отношения Cl/SO_4 . Последнее свидетельствует о некотором затухании горизонтального солепереноса (табл. 24).

В отличие от контрольных вариантов при регулировании гидрологического режима на фоне трехъярусной вспашки с гипсованием нивелирование увлажнения дает одинаковый термодинамический потенциал почвенной влаги на равных глубинах сопряженных в пространстве различных типов с преобладанием вертикальных градиентов потенциала. Аналогичным было направление солепереноса. Резкое увеличение глубины солевых аккумуляций на микроповышениях исключало их отрицательное воздействие на протекание мелиоративного процесса. За четыре года исследований отмечалось постоянное снижение отношения Cl/SO_4 в почвенных горизонтах и уменьшение величины сухого остатка в слое 40—110 см по сравнению с состоянием непосредственно после мелиоративной обработки, что указывает на интенсификацию мелиоративного процесса во времени. Следствием регулирования гидрологического режима является ликвидация бокового солепереноса (рис. 30б) и устранение рассмотренного фактора восстановления природного типа генезиса почв, локализованных на повышениях микрорельефа, поскольку выщелачивание легкорастворимых солей и вынос продуктов обменных реакций в ППК при этом становятся необратимыми.

Эффект разработанного нами способа зависит от применяемых орудий. Так, орудия БЩН-3 и ППБ-0,6 более эффек-

тивно воздействуют на режим увлажнения почв, чем СЗС-2,1, ЛД-10 и ПЭК-1,6, поскольку обеспечивают высокую устойчивость регулирующей сети. Соответственно в первых двух вариантах опыта 1 солевой режим существенно не изменился. Это обусловило наивысший мелиоративный эффект.

Характер солевых процессов в варианте 11 значительно отличается от рассмотренных выше. В исходном состоянии непосредственно после проведения планировки процессы влаго-солепереноса в почвенном слое, как и в вариантах 7—10, находились под воздействием вертикальных градиентов термодинамического потенциала почвенной влаги. Затем, по мере формирования просадочных западин, все больше проявлялся горизонтальный перенос вновь возникающей пространственной изменчивости потенциала. Однако в этом случае горизонтальный массообмен между почвами, во-первых, не имел высокой интенсивности и, во-вторых, носил иной по сравнению с контролем 1 характер. Обычно зона влаго-солепереноса заканчивается на микроповышении и является источником пополнения этого элемента рельефа легкорастворимыми солями. При вторичной просадочности засоленные горизонты почвы бывших микроповышений становятся источником солей для прилегающих почв, поскольку они являются уже начальным участком зоны солепереноса. Для солевого режима формирующихся микропонижений это явление благоприятно, так как способствует их дальнейшему опреснению и оптимизации мелиоративного процесса. В то же время возможно развитие в других типах почв спланированной поверхности явлений, которые свойственны участкам зоны солепереноса; Поскольку засоленные участки поверхности просели, процесс перераспределения солей в зоне аэрации влияет на однородное пространственное распределение солей, что не вызывает отрицательных последствий. Однако процесс перераспределения носит случайный характер. Возможно существование участков поверхности с преимущественным поступлением легкоподвижных ионов по сравнению со смежными. В соответствующих почвах, даже если они первоначально отличались опресненностью и благоприятными свойствами, возникают предпосылки для развития солонцового процесса. Проявление результатов такой трансформации замедлено, поскольку она проявляется только после значительного перераспределения солевых масс в зоне аэрации. В почвенных горизонтах, где происходит разгрузка мигрирующих растворов, возможна также метаморфизация химизма засоления от гидрокарбонатно-кальциевого до сульфатно-хлоридно-натриевого, что может привести к их осолонцовыванию.

Регулирование гидрологического режима в вариантах 7—10 непосредственно воздействует на солевые аккумуляции,

устраняет горизонтальный влаго-солеперенос, промывает легко-растворимые соли всех ЭПА.

Таблица 25

Влияние различных приемов регулирования гидрологического режима на содержание поглощенного натрия (% суммы поглощенных катионов) в слоях почвы (опыт 1)

Вариант	0—10		20—30		30—50	
	1979	1985	1979	1985	1979	1985
1	12,2	10,2	13,8	14,0	15,4	16,4
2	11,4	8,3	12,4	11,0	12,8	11,3
4	13,2	9,5	15,7	10,4	14,9	12,0
9	9,2	4,7	11,6	5,0	12,7	6,6
10	9,4	3,8	10,0	4,2	11,8	5,3

Как видно из данных табл. 25, приемы окультуривания солонцовых почв по-разному влияют на состав поглощенных катионов. В частности, в варианте 1 состав поглощенных катионов за шесть лет изменился незначительно: несколько снизилось содержание обменного натрия в слое 0—20 см и незначительно увеличилось в глубоких слоях. Количество обменного натрия при комплексном методе мелниорации оставалось относительно высоким. В варианте 4 регулирование гидрологического режима было недостаточно эффективным.

В то же время в вариантах 9—10 регулирование гидрологического режима было оптимальным. Содержание поглощенного Na^+ в слое 0—20 см снизилось от 9,2—9,4 до 3,8—4,7%.

В производственном опыте 3 солевой режим изучали на стационарных площадках, заложенных на ЭПА солонцов. ЭПА компонентов комплекса выделены посредством почвенно-топографического картирования. Результаты исследования солевого режима представлены в табл. 26, данные которой свидетельствуют о протекании солевых процессов в соответствии с рассмотренным в разд. 3.2. гидрологическим режимом почв. Поэтому в результате химической мелниорации последствие окультуривания характеризуется лишь тенденцией к опреснению почвенного профиля солонца. Утверждение о кардинальном преобразовании солевого профиля солонцовой почвы в процессе ее химической мелниорации, встречающееся у ряда авторов [190, 129], нам представляется излишне категоричным.

Запасы легкорастворимых солей в слое 0—30 см в варианте 1 опыта 1 сократились до 97% исходного запаса, а в ва-

Таблица 26

Солевой режим солонцов при химической мелниорации

Опыт	Вариант	Сухой остаток, %				pH в слое 20—40 см		Cl/SO ₄ в слое 40—80 см	
		0—30 см		0—10 см		1986	1989	1986	1989
		1986	1989	1986	1989				
3.1.	12 т/га	0,186	0,179	0,361	0,368	7,9	8,0	0,9	1,0
	16 т/га	0,243	0,226	0,593	0,581	7,9	7,9	0,8	0,8
	20 т/га	0,200	0,151	0,448	0,412	7,8	7,8	0,8	1,0
	24 т/га	0,216	0,150	0,517	0,472	7,6	7,7	0,9	0,9
3.2.	8 т/га	0,312	0,305	0,611	0,600	7,8	7,8	0,9	0,8
	12 т/га	0,210	0,182	0,387	0,312	7,9	7,8	0,7	0,8
	16 т/га	0,281	0,194	0,445	0,411	7,7	7,9	0,6	0,6
	Контроль	0,216	0,241	0,493	0,510	8,3	8,3	0,7	0,6
3.3.	6 т/га	0,163	0,171	0,417	0,427	7,7	7,8	0,5	0,6
	8 т/га	0,217	0,184	0,603	0,521	7,6	7,6	0,4	0,5
	10 т/га	0,312	0,240	0,505	0,430	7,4	7,5	0,8	0,7
	12 т/га	0,225	0,190	0,856	0,612	7,5	7,4	0,7	0,7
	Контроль	0,284	0,279	0,831	0,805	8,2	8,3	0,9	1,0

рианте 4 — до 84%. Несколько большее снижение наблюдалось в опыте 3.3, особенно предпочтительны варианты 2—4, в которых сокращение запасов легкорастворимых солей в слое 0—30 см в 1989 г. составило 0,71 от уровня 1986 г.

Негативным моментом протекания солевых процессов при химической мелниорации гипсометрически и континуально неоднородных земель отметим практическую неизменность содержания легкорастворимых солей в слое 0—100 см солонцов. Это свидетельствует о том, что возможна реставрация солонцового процесса в мелниорируемой почве согласно представлениям о постмелниоративном дестабилизирующем воздействии запасов легкорастворимых солей нижней части почвенного профиля, развитых В. В. Егоровым [92—102].

Данные длительного стационарного опыта 1 по принципу подобия могут быть экстраполированы на материалы опыта 2 с целью прогноза тенденций солевого режима. Возможна интенсификация засоления описываемых почв, особенно в слое 0—100 см, в случае возобновления горизонтально-боковой миграции легкорастворимых солей. Это связано с тем, что отсутствие выщелачивания продуктов обменных реакций в ППК и легкорастворимых солей почвенного профиля способствует горизонтально-боковой миграции солей и связанному с ней восстановлению отрицательных агрофизических свойств солонцовых почв в последствии.

3.4. Продуктивность орошаемых земель при различных способах регулирования гидрологического режима солонцов

Важным показателем эффективности мелиорации является продуктивность почв, интегрирующая изменения в окультуриваемом почвенном континууме.

В опыте I характер процессов, происходящих при регулировании гидрологического режима, отражается на продуктивности растений. За период исследований (1979—1986) наиболее низкие урожаи отмечены на контроле (табл. 27—35).

На контрольных вариантах рассмотренные выше факторы восстановления исходной биологической продуктивности почв привели к тому, что эффективность комплексного и химического методов мелиорации оказалась недостаточно высокой. Отмечается снижение продуктивности солонцовых комплексных почв в последствии рассматриваемых приемов мелиорации.

Таблица 27

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1979)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	205,4	—	—	—36,4	—17,7
2	241,8	36,4	17,7	—	—
3	231,4	26,0	12,7	—10,4	— 4,3
4	213,5	8,1	3,9	—28,3	—11,7
5	233,2	27,8	14,6	—8,6	— 3,6
6	223,8	18,4	9,0	—18,0	— 7,5
7	259,5	54,1	26,2	17,7	7,3
8	265,1	59,7	29,1	23,3	9,6
9	288,4	83,0	40,5	46,6	19,3
10	269,9	64,5	31,4	28,1	11,6
11	295,0	88,6	43,2	52,2	21,6

$HCP_{0,95} = 11,5$ ц/га

Учет урожая в вариантах 3, 4, 6 показал, что регулирование гидрологического режима на фоне обычной вспашки с гипсованием немного повысило биологическую продуктивность почв по сравнению с первым контрольным вариантом.

Дополнительное увлажнение и улучшение агрофизических свойств почв микроповышений за счет щелчевания в варианте 5 обусловило его преимущество перед вариантами 3, 4, 6. Здесь продуктивность солонцовых почв была близка ко 2-му контрольному варианту, поскольку произошла интенсифика-

Таблица 28

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1980)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	214,5	—	—	—38,2	—17,8
2	252,3	38,2	17,8	—	—
3	201,3	—13,2	— 6,2	—51,0	—20,2
4	229,8	15,4	7,2	—22,5	— 8,9
5	248,2	33,7	15,7	— 3,9	— 1,6
6	236,1	21,6	10,1	—16,2	— 6,4
7	265,4	50,9	23,6	13,1	5,2
8	273,8	59,3	27,6	21,5	8,5
9	279,5	65,0	30,2	27,2	10,8
10	289,6	75,1	34,9	37,5	14,8
11	277,5	63,0	29,3	25,2	10,0

$HCP_{0,95} = 15,1$ ц/га

ция мелиоративного процесса в результате улучшения выщелачивания легкорастворимых солей после очередных щелчеваний.

Из всех вариантов опыта регулирование гидрологического режима на фоне комплексного метода мелиорации наиболее благоприятно воздействовало на процессы, происходящие в почвах, что подтверждается достоверными прибавками урожая силосной массы кукурузы. Однако между приемами ре-

Таблица 29

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1981)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	178,8	—	—	—42,7	—23,8
2	221,5	42,7	23,8	—	—
3	208,4	21,6	16,6	—13,1	— 5,9
4	194,3	16,9	9,4	—27,2	—12,3
5	199,8	21,0	11,7	—21,7	— 9,8
6	189,3	10,5	5,9	—32,2	—14,5
7	237,5	58,7	32,7	16,0	7,2
8	244,1	65,3	36,5	22,6	10,2
9	246,8	68,0	38,0	25,3	11,4
10	255,7	76,9	43,0	34,2	15,4
11	254,8	76,0	42,5	33,3	15,0

$HCP_{0,95} = 9,8$ ц/га

Таблица 30

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1982)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	192,8	—	—	—42,6	—22,0
2	235,4	42,6	22,0	—	—
3	214,3	21,5	11,2	—21,1	— 8,9
4	215,1	22,3	11,6	—20,3	— 8,6
5	224,5	31,7	16,5	—10,9	— 4,7
6	219,7	26,9	14,0	—15,7	— 6,7
7	273,9	81,1	42,1	38,5	16,5
8	279,4	86,6	44,9	44,0	18,8
9	293,2	100,4	52,0	57,4	24,4
10	298,0	106,2	55,1	63,6	27,1
11	281,8	89,0	46,2	46,4	19,7

$НСП_{0,95} = 13,9$ ц/га

гулирования гидрологического режима есть различия. В связи с относительно быстрой потерей устойчивости регулирующей сети в вариантах 7, 8 отношение Cl/SO_4 в почвах микроповышений снижалось довольно медленно. Поэтому несколько замедлялся процесс мелиорации солонцовых ЭПА и увеличение продуктивности почв по сравнению с контролем 1 было относительно невысоким (в варианте 7 в 1979 г. — 7,3%, в 1982 г. — 16,5%, в 1986 г. — 13,5%).

Таблица 31

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1983)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	201,3	—	—	—27,4	—11,9
2	228,7	27,4	13,6	—	—
3	244,0	42,7	21,2	15,3	6,7
4	206,3	5,0	2,5	—22,7	— 9,9
5	232,7	31,4	15,5	4,0	1,7
6	207,6	6,3	3,1	—21,1	— 9,2
7	236,5	35,2	17,4	7,8	3,4
8	259,4	58,1	28,9	30,7	13,4
9	299,8	98,5	49,0	71,1	31,1
10	281,2	79,9	39,6	52,5	22,8
11	265,9	64,6	32,1	37,2	16,3

$НСП_{0,95} = 15,5$ ц/га

Таблица 32

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1984)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	259,5	—	—	—25,3	— 8,9
2	284,8	25,3	9,7	—	—
3	271,4	11,9	4,6	—13,4	— 4,7
4	280,5	21,0	8,1	— 4,3	— 1,5
5	289,4	27,9	11,5	4,6	1,6
6	276,0	16,7	6,4	— 7,2	— 2,5
7	314,1	54,6	21,0	29,3	10,3
8	309,7	50,4	19,4	24,9	8,7
9	331,6	72,1	27,8	46,8	16,4
10	338,5	79,0	30,4	53,7	18,9
11	327,5	68,0	26,2	42,7	15,0

$НСП_{0,95} = 19,4$ ц/га

В вариантах 9 и 10, наоборот, отношение Cl/SO_4 в слоях 40—80 см микроповышений снижалось относительно быстро. Вымывание наиболее подвижных ионов Na^+ и Cl^- ускорило протекание мелиоративного процесса. В отличие от остальных вариантов прирост урожайности получен за счет солонцовых ЭПА, которые при стабильном нивелировании увлажнения являются существенным фактором повышения плодородия мелиорируемых солонцовых комплексных почв.

Таблица 33

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелиорации (1985)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	184,7	—	—	—35,1	—16,0
2	219,8	35,1	19,0	—	—
3	196,0	11,3	6,1	—23,8	—10,8
4	211,4	26,7	14,5	— 8,4	— 3,8
5	254,8	60,1	32,5	25,0	11,4
6	220,9	36,2	19,6	1,1	0,5
7	251,1	66,4	36,0	31,3	14,2
8	241,0	56,3	30,5	21,2	9,6
9	269,1	84,4	45,7	49,3	22,4
10	248,5	63,8	34,5	28,7	13,1
11	234,3	49,6	26,9	14,5	6,6

$НСП_{0,95} = 15,7$ ц/га

Таблица 34

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелниорации (1986)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	240,6	—	—	—11,7	—
2	252,3	11,7	4,8	—	4,6
3	236,0	— 4,6	— 1,9	—16,3	6,4
4	227,7	—12,9	— 5,3	24,6	9,7
5	263,7	23,1	9,6	11,4	4,5
6	253,5	12,9	5,3	1,2	0,4
7	273,1	32,5	13,5	20,8	8,2
8	291,2	50,6	21,0	38,9	15,4
9	329,6	89,0	36,9	77,3	30,6
10	317,8	77,2	32,0	65,5	25,9
11	284,8	44,2	18,3	22,5	8,9

НСР_{0,05} = 22,9 ц/га

Важно отметить, что при регулировании гидрологического режима орудиями ППБ-0,6 и БЩН-3 на фоне комплексного метода мелниорации продуктивность солонцов в последствии не только не снижается, но и возрастает. Наблюдается сближение продуктивности отдельных ЭПА и уменьшение пестроты плодородия. Следовательно, регулирование гидрологического режима способствует гомогенизации почвенного покрова.

Таблица 35

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных приемах мелниорации (1979—1986)

Вариант	Урожай, ц/га	Контроль 1		Контроль 2	
		ц/га	%	ц/га	%
1	209,70	—	—	—32,37	—13,3
2	242,07	32,37	15,4	—	—
3	225,35	15,65	7,4	—16,72	6,9
4	222,30	12,60	6,0	—19,77	8,7
5	243,28	33,58	16,0	— 1,21	0,4
6	228,36	18,66	8,8	—13,71	5,6
7	263,88	54,18	25,8	21,81	9,0
8	270,46	60,76	28,9	28,39	11,7
9	292,25	82,55	39,3	50,18	20,7
10	287,40	77,70	37,0	45,33	18,7
11	277,70	68,00	32,4	35,63	14,7

НСР_{0,05} = 4,64 ц/га

Показателем высокой эффективности приемов регулирования гидрологического режима является прирост урожая в вариантах 9 и 10 за период 1979—1986 гг. Так, прибавка урожая силосной массы кукурузы в варианте 10 по сравнению с контролем 2 в 1979 г. составила 11,6%, в 1982 г. — 27,1%, в 1986 г. — 25,9%.

Вариант 11 имел преимущество перед контрольными вариантами, однако по отношению к вариантам 7—10 давал практически ту же урожайность (табл. 35). При этом продуктивность солонцовых ЭПА была несколько ниже, чем в вариантах 9 и 10. Такой результат, по нашему мнению, обусловлен перемещением значительных масс грунта при планировке. В последующие годы на величину урожая повлияла возникающая при посадках неравномерность увлажнения. Так, в 1979 г. урожай силосной массы кукурузы в этом варианте был 295,0 ц/га, в 1982 г. снизился до 281,8 ц/га, в 1986 г. — 284,8 ц/га.

Результаты изучения приемов регулирования гидрологического режима солонцовых комплексных почв в условиях орошения дождеванием на фоне типовых приемов мелниорации свидетельствуют о преобразовании СПП, которая определяет характер и устойчивость специфических свойств подчиненных ее воздействию компонентов почвенно-географического пространства. При регулировании гидрологического режима СПП приобретает новый характер, причем вместо природного преобладания ее дифференциации происходит гомогенизация почвенного покрова с направленной трансформацией генезиса представленных в рамках ПК ЭПА. Это обеспечивает стабильный во времени рост урожайности на мелнируемых солонцовых ЭПА и повышение общей биологической продуктивности генеральной совокупности почв.

Таблица 36

Прибавка урожая силосной массы кукурузы при различных режимах движения ДДА=100МА

Режим движения	Урожай, ц/га	ц/га	%
Импульс, Т=18 мин	180	—	—
Импульс, Т=12 мин	195	15	8,3
Непрерывный, П=7, Б=100 м	225	45	21,6
НСР _{0,05} = 14,4 ц/га			

В табл. 36 приведены данные об урожае кукурузы на силос по некоторым вариантам режимов движения агрегата ДДА-100МА.

Незначительный общий урожай получен в результате использования сложившегося статистического режима орошения с фактическим размером оросительных норм 1200—1500 м³/га. В режим импульс Т-18 мин проведено два полива, в режимах импульс Т-12 мин и непрерывный, П-7, Б-100 м, подавался одинаковый объем воды (различия урожайности вариантов, не представленных в табл. 36, не обсуждаются ввиду различий водоподачи).

Прибавка урожая кукурузы на силос в двух последних режимах движения (табл. 36) невелика, однако статистическая обработка данных методом дисперсионного анализа ($НСР_{0,95} = 14,4$ ц/га) показывает ее математическую достоверность. При идентичности затрат на каждый режим орошения прибавка урожая в результате повышения равномерности промачивания почв доказывает необходимость непрерывных вариантов полива. Локальный микросток в случае номинальных оросительных норм (около 3000 м³/га за оросительный сезон) привел бы к значительно большим различиям урожая. Причиной этого могло быть переувлажнение почв микропонижений и вероятность общего усиления восходящего и бокового подпитывания остальных почв при протекании описанных выше процессов горизонтального массопереноса на фоне грунтового ирригационного просачивания. Полученные в процессе исследования в совхозе «Новоселовский» результаты свидетельствуют о том, что необходимо регулировать гидрологический режим при окультуривании орошаемых солонцовых почв.

4. ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ ИРРИГАЦИОННОГО ПОЧВЕННОГО МОНИТОРИНГА

4.1. Современная диагностика водного и солевого режимов — фактор управления мелиоративным процессом на орошаемых солонцах

В работах Г. В. Добровольского, Д. С. Орлова, Л. А. Гришиной [85, 86, 140] обосновано введение почвенного мониторинга и сформулированы принципы его организации в нашей стране. Главная цель мониторинга — обнаружить неблагоприятные изменения свойств почв, возникающие в результате многолетнего воздействия однотипных природных или антропогенных внешних факторов. Так, при длительном орошении развивается явление гидроморфизма, наблюдается вторичное засоление, осолонцовывание, ошелачивание, слитизация и коркообразование почв. Острота ситуации обусловлена не только необходимостью своевременного установления наличия или отсутствия требуемых запасов влаги в расчетном слое

промачивания, характера распределения этих запасов в пространстве поливного участка, но и направления миграции влаги. Имеются данные о том, что постполивная дифференциация промачивания почв на черноземах — 0,4—1,6 м, а на каштановых почвах при идеальной технике полива дождеванием — 0,3—1,8 м [102, 156, 208].

В отсутствие надежных и производительных способов мониторинга такие данные могут быть получены на отдельных ключевых участках, однако в силу трудоемкости этого процесса их роль как инструмента управления режимом орошения низкая.

Рационализация общего увлажнения и снижение степени его пространственной неоднородности — основные факторы, повышающие эффективность орошаемого земледелия. Их использование связано не только с необходимостью экономии оросительной воды вследствие значительных ее потерь на инфильтрацию в грунтовые воды при избыточности промачивания отрицательных элементов поверхности, но и с увеличением увлажнения недополиваемых повышенных элементов. Как отмечалось выше, неоднородность увлажнения, особенно в условиях комплексного почвенного покрова, является причиной возникновения горизонтально-бокового влаго-солепереноса, способствующего опреснению почв понижений с одновременным поверхностным засолением почв микроповышений [102, 157].

Согласно выполненным нами исследованиям, главным условием успешного протекания мелиоративного процесса является пространственная однородность промачивания почв [156].

Следует также отметить динамичность «почвенно-мелиоративных констант», определяющих порог ухудшения мелиоративного состояния орошаемой почвы. В частности, критическая глубина грунтовых вод для смежных в пространстве элементарных почвенных ареалов (ЭПА) в силу различий их ирригационного промачивания при равных отметках уровней грунтовых вод может составлять от 2 до 3 м для относительно слабо промачиваемого и достаточно увлажненного ЭПА. Критическая глубина грунтовых вод характеризует предельную равновесность восходящего и нисходящего движений почвенных растворов по профилю почвы. Причем если первый процесс выражен хотя бы 10—15% периода функционирования ирригационной системы, рассматриваемый параметр увеличивается, указывая на ухудшение мелиоративного состояния оросительной системы или ее части.

4.2. Портативный прибор для определения сроков полива солонцовых почв

Нами предпринята попытка усовершенствовать один из важнейших элементов мониторинга орошаемых земель — контроль ирригационной влагообеспеченности почв, в связи с тем, что используемый для этой цели набор приборов и методов достаточно далек от совершенства.

В настоящее время самым распространенным приемом мониторинга, осуществляемым на орошаемых землях, является термовесовой метод, требующий большого объема работы при отборе проб почвы с разных глубин и достаточно длительного высушивания образцов. Кроме того, согласно современным термодинамическим представлениям, определение общего содержания влаги в почве еще недостаточно для оценки роли и поведения воды в почвенных процессах [41, 42].

В связи с этим для определения влажности почв предложены электрометрические, радиометрические, тензиометрические, электромагнитные, различного рода дистанционные методы. Однако они трудоемки, дороги, труднореализуемы в полевых условиях, недостаточно точны, а иногда и малопродуктивны.

Наконец, вышеперечисленные прямые, косвенные и дистанционные методы не позволяют установить характер влаги по почвенному профилю. Идентификация этого процесса более важна, чем простая констатация наличия или отсутствия влаги. Характерно, что при одном и том же абсолютном содержании влаги почвы различного типа и даже почвы в пределах одного поливного участка могут характеризоваться неодинаковыми направлениями движения влаги по почвенному профилю. Вопросы, связанные с направлением движения влаги, приобретают особую актуальность, так как орошаемые почвы в значительной степени подвержены засолению, а в условиях комплексного почвенного покрова из-за неоднородности промачивания — и перераспределению солей в зоне аэрации.

Специфическое строение профиля солонцов с расположением горизонта легкорастворимых солей на глубине 50–80 см непосредственно в нижней части почвенного профиля приводит к тому, что при задержке очередного полива восходящее движение почвенных растворов быстро вовлекает эти соли в активное почвообразование. В их составе представлено Na^+ , обуславливающий интенсивную ирригационную деградацию почв.

Во многих случаях установление факта начала восходящего движения влаги по профилю почвы является основанием для того, чтобы сделать вывод о наличии опасной тенденции

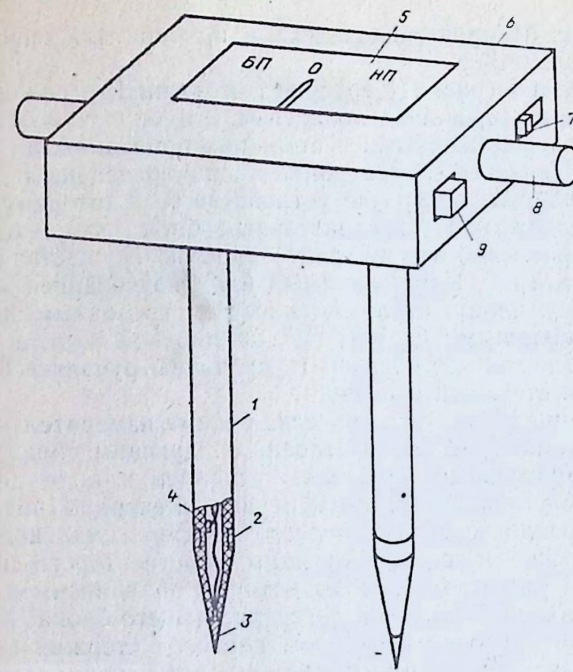


Рис. 31. Прибор для определения сроков полива

ухудшения мелiorативного состояния орошаемых земель. Существующая для этой цели градиентная оценка увлажнения индивидуальных почвенных профилей на базе перечисленных стандартных методов требует, как минимум, двукратного увеличения объема опробований и проведения дополнительных расчетов.

Это явилось основой нашего подхода к разработке портативного, мобильного, простого в обращении и интерпретации результатов измерений прибора, определяющего изменение направления движения влаги с нисходящего на восходящее [173]. В основу действия прибора положен электрический метод. Выбор названного принципа действия обусловлен тем, что электрические параметры пары «электрод-почва» стабилизируются быстрее, чем, например, у термодинамической пары «гипсовый (керамический) блок — почва», что повышает сохранность электрода и устойчивость показаний прибора, а также обеспечивает быстрое выполнение измерений и возможность их предындикационной электронной обработки

с целью повышения репрезентативности индицируемых показаний.

На рис. 31 представлена схема прибора для определения сроков полива.

Устройство (рис. 31) содержит стержни 1, в нижней части которых смонтированы кольцевые 2 и осевые 3 электроды, которые расположенными в стержнях проводниками 4 электрически связаны с электронным измерительным блоком, смонтированным в корпусе устройства 6, к которому присоединены стержни 1. Измерительный блок включают кнопкой 9, управление его чувствительностью осуществляется переключателем 7. Измерительный блок подсоединен к регистрирующему блоку, который снабжен стрелочным индикатором 5 с индексами О, БП, НП на лицевой панели корпуса. На боковых стенках корпуса 1 укреплены рукоятки 8 для заглубления стержней в почву.

Принципиальная электрическая схема измерительного блока устройства (рис. 31) построена следующим образом. Каждый измерительный усилитель выполнен в виде дифференциального усилителя, причем первые электроды подключены соответственно ко входам первого дифференциального усилителя, вторые — к соответствующим входам второго дифференциального усилителя, выходы которых объединены и связаны с первой входной клеммой регистрирующего блока. Кроме того, первый и второй электроды первого стержня связаны с соответствующими входами третьего дифференциального усилителя, а первый и второй электроды второго стержня — с соответствующими входами четвертого дифференциального усилителя, при этом входы третьего и четвертого дифференциальных усилителей соединены и подключены ко второй входной клемме регистрирующего блока.

На рис. 33 изображена принципиальная электрическая схема измерительного дифференциального усилителя А1—А4 по рис. 32 с переключателем чувствительности В (7 по рис. 31). Выбранное построение измерительного дифференциального усилителя обеспечивает высокую температурную стабильность измерительного блока.

Прибор измеряет параметры естественных электрических полей почв. Формирование полей связано, во-первых, с диффузионно-адсорбционными потенциалами, обусловленными перераспределением зарядов в породах и почвах вследствие процессов диффузии и адсорбции ионов, во-вторых, с фильтрационными полями, образующимися в результате переноса влаги в пористых средах и характеризующимися потенциалом протекания.

Установлено, что фильтрационный потенциал при выра-
женном эффекте фильтрации значительно больше влияет на

Рис. 32. Принципиальная электрическая схема измерительного блока

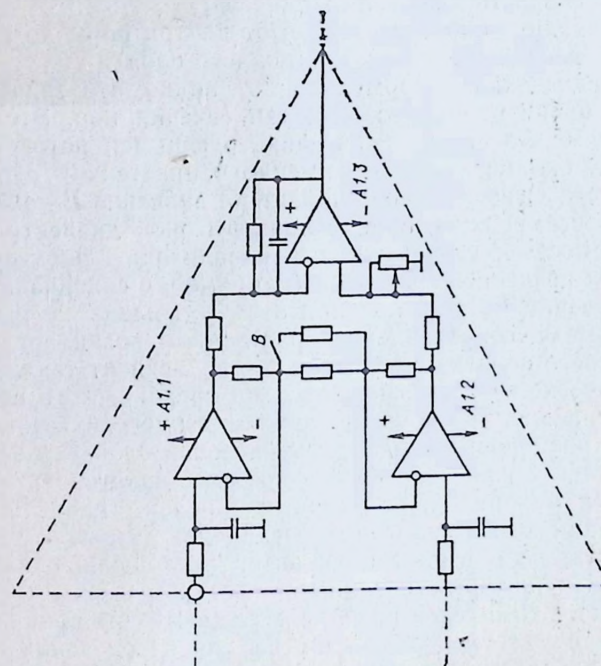
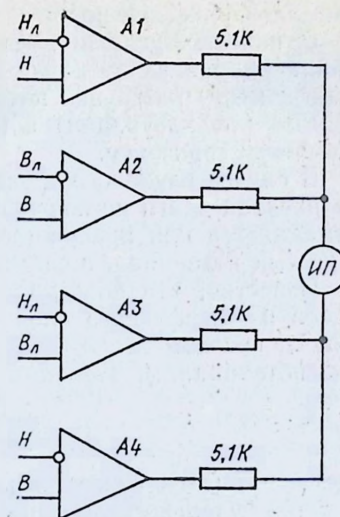


Рис. 33. Принципиальная электрическая схема измерительного дифференциального усилителя

электрические свойства почвы, чем диффузионно-адсорбционные электрические поля.

В полевых условиях градиент фильтрационного потенциала направлен от начальной зоны фильтрации к конечной зоне к месту разгрузки потока или (при вертикальной фильтрации (инфильтрации) в почву) от ее поверхности к водопорному горизонту.

В случае глубокого уровня водопорного горизонта по мере расхода влаги из почвы вертикальное передвижение влаги замедляется или прекращается. При этом исчезает фильтрационный потенциал, а следовательно, и его градиент.

Известно, что потенциал связан с выносом избыточных ионов из диффузного слоя поглощающего комплекса нисходящим потоком влаги в направлении его сброса [233]. Значение потенциала протекания E_Φ определяют по формуле

$$E_\Phi = \frac{2e\rho\zeta}{\pi^2} V_0, \quad (50)$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная воды;

ρ — удельное сопротивление раствора;

ζ — дзета-потенциал;

V_0 — скорость движения жидкости;

r — радиус пор (расстояние от центра поры до границы неподвижного адсорбционного слоя).

Из приведенной формулы (50) видно, что значение E_Φ обратно пропорционально площади сечения пор. Это объясняется тем, что вынос ионов фильтрующимся потоком воды нарушает баланс зарядов именно в пристенном слое, т. е. диффузном. Существенное влияние на значение E_Φ оказывает фильтрующаяся вода, обладающая высокой диэлектрической проницаемостью. Повышенная минерализация фильтрующейся воды и почвенного раствора (например, в солончаках) снижает значение E_Φ , так как при этом уменьшается удельное электрическое сопротивление раствора и возникает эффект «внутреннего короткого замыкания». E_Φ зависит также от минералогического состава и характера органического вещества почв, поскольку, кроме содержания механических частиц коллоидных размеров, двойной электрический слой может возникать в местах разрыва связей и облома пакетов вторичных глинистых минералов, полуторных окислов, кальцита, гипса, диссоциации ионов некоторых соединений гумуса и т. д. Определенную роль играет и характер поглощенных катионов. Однако эти факторы, связанные с составом и свойствами поглощающего комплекса почв, не отражаются на принципиальной возможности использования E_Φ для определения направления передвижения влаги в почве, а следовательно, и установления сроков полива. Значение E_Φ используют для опре-

деления направления потока грунтовых вод, выявления активности дрен, наличия фильтрации из каналов и водоемов.

Эксперимент проводился на монолите ненарушенного строения каштановой слабосолонцеватой тяжелосуглинистой почвы (Зимовниковский район Ростовской обл.) размером в плане $0,2 \times 0,4$ м и высотой 1,4 м. Размеры монолита выбраны с целью преодоления краевых эффектов, обуславливающих неточность электрических измерений. Для обеспечения близкого к природному режима расхода почвенной влаги в опытной емкости был посеян ячмень.

В период эксперимента монолит выдерживали при температуре $23-28^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $50-70\%$. Влажность почвы поддерживали в пределах потребности вегетирующей культуры с назначением полива по состоянию $0,7 \text{ НВ}$ и увлажнением из расчета поливной нормы $800 \text{ м}^3/\text{га}$. В трехкратной повторности осуществлялась диагностика передвижения влаги регистрацией знака и значения электрического потенциала с одновременным отбором образцов для определения влажности термовесовым способом.

Термовесовой способ выполнен по стандартной методике [41]. Предложенный нами способ был реализован в соответствии со следующей методикой. Устройство для определения сроков полива (рис. 31) в вертикальном положении посредством рукояток заглубляется так, чтобы стержни расположились в почве на глубине 10 см. Кнопкой включают измерительный блок, с использованием переключателя чувствительности добиваются установившегося отклонения стрелки, запоминают положение переключателя чувствительности и направление отклонения — к индексам БП или НП (стадия длится $5-20$ с). Затем прибор заглубляют так, чтобы стержни последовательно располагались на глубинах 20, 40, 60 см, причем на каждой глубине выполняется описанный отсчет по регистрирующему блоку. Полив назначается в случае, если в трех и более слоях индицируется НП. Полив не требуется, если НП индицируется в одном слое или индицируется только БП. Отсутствие индикации, ее интенсивные флуктуации обычно соответствуют пересушенной почве, когда потребность в поливе очевидна и без использования прибора.

Индикация потребности в поливе регистрирующим блоком обеспечивается разработанной нами электронной частью устройства. Согласно принципиальной схеме измерительного ($A1-A4$) и регистрирующего (ИП) блоков (рис. 32), инвертирующие и неинвертирующие входы измерительных усилителей $A1-A4$ подсоединены к измерительным электродам устройства таким образом, чтобы индикация на регистрирующем блоке от их выходов происходила в соответствии с аналитическим выражением:

$$E = (H_L - V_L) + (H - V) - (H - H_L) - (V - V_L),$$

где E — индицируемый потенциал;
 V, H — потенциалы соответственно осевого (внутренний) и кольцевого (наружный) электродов стержня;
 L — индекс левого стержня прибора.

Шкала стрелочного индикатора регистрирующего блока тарируется индексами: 0 — исходное положение, БП — полив не нужен, НП — необходим полив соответственно значениям $E=0$; $E<0$; $E>0$.

Ниже мы подробнее остановимся на конструкции датчиков прибора и его измерительной схемы. Приведем результаты первой фазы лабораторной апробации устройства.

Таблица 37

Электрические потенциалы почвы экспериментальной емкости на глубине 40 см

Время после полива, сут	Потенциал, МВ					Влажность почвы, определяемая термовесовым методом в слое 0—80 см, %	Необходимость полива по данным	
	H	V	H	V	E		фильтрационного потенциала	термовесового метода определения
1	+2,4	-4,2	+4,5	-3,9	+12,6	24,2	Нет	Нет
5	+7,2	+4,3	+13,0	-2,5	+19,4	22,0	То же	То же
9	+1,6	-3,9	-1,6	-4,8	+12,8	20,1	»	»
13	-6,6	-0,9	-7,2	+1,6	-16,6	17,2	Да	Да
15	-9,6	-1,4	-10,0	+4,3	-27,8	15,8	То же	То же

Из табл. 37 видно, что по мере расхода влаги на испарение и транспирацию (9—13 сут после полива) меняется знак фильтрационного потенциала, что свидетельствует о возникновении восходящего потока влаги и необходимости полива. Это подтверждают и результаты термовесового определения влаги.

Достаточная сходимость результатов анализа этих двух вариантов свидетельствует о работоспособности разработанного нами метода и его пригодности для назначения сроков полива почв.

Проверка работоспособности прибора в поле обеспечила реализацию рассмотренного способа назначения сроков полива и зафиксировала точность на уровне 56% ($n=140$). Даже с учетом сложной природы объекта такой показатель являет-

ся неприемлемым. Поэтому были проанализированы источники погрешностей.

В качестве первого источника погрешности учтена поляризация металлических электродов (именно такими электродами снабжен прибор). Однако в первом приближении вклад этой составляющей оценен как несущественный. Во-первых, согласно аналитическому выражению, прибор индицирует дифференциальное значение, причем потенциал поляризации электродов суммируется и столько же раз вычитается из общего результата, следовательно, математически уничтожается, а физически — эlimинируется.

Во-вторых, данные [126, 127, 188] о профильной и пространственной динамике потенциала, согласно которым более иссушенная почва (пространственная микронеоднородность электропотенциала) или более иссушенный горизонт (профильная микронеоднородность электропотенциала) имеют более высокий абсолютный электропотенциал и вызывают относительно большую поляризацию металлического электрода. В последнем случае появляется систематическая измерительная погрешность. Подобная нелинейность индикации не только не является измерительной помехой, но, наоборот, увеличивает наводимый на электродах согласно движению почвенной влаги дифференциальный потенциал, повышает четкость индикации потребности в поливе. Третьим важным фактором является влияние засоления и солонцеватости почв.

Эти свойства почвы [74, 127, 188] усиливают поляризацию размещенных в ней металлических электродов по сравнению с незасоленной почвой той же влажности. При назначении срока полива по нашему способу с учетом обычного для засоленных почв юга ЕТС максимума засоления в слое 50—80 см изложенное означает суперпозицию градиента электропотенциала протекания и градиента электропотенциала поляризации электродов.

Последний градиент в профиле почвы направлен вертикально вниз. Первый градиент, как указывалось выше, меняет знак при смене нисходящего и восходящего движения влаги по профилю. Следовательно, при нисходящем движении влаги дифференциальный электропотенциал, индицируемый прибором, будет завышаться по сравнению с незасоленной почвой, а во втором случае — занижаться. Поэтому существует опасность запоздания полива, что особенно нежелательно на засоленных почвах. Затруднения могут возникнуть только при работе на почвах с очень неравномерной по профилю засоленностью, что при орошении, в силу диффузионного процесса при относительно высокой влажности почв, маловероятно. Поляризация электродов в таком варианте полезна, поскольку способствует некоторой компенсации рас-

пределения естественного электропотенциала по профилю засоленной или солонцовой почвы, который, согласно измерениям неполяризующимися электродами [41, 42], наоборот, уменьшается в засоленных и солонцовых горизонтах.

Следует отметить, что рассмотренные варианты влияния поляризации электродов на назначение полива имеют природу систематической погрешности, которая методически преодолима, а практически учитывается без затруднений.

Другой, значительно более серьезной причиной недостаточной точности способа является пространственная внутрипочвенная микронеоднородность фонового электропотенциала. Влияние характера его локального распределения показано на рис. 34.

Случай локальной вертикальной ориентации силовых линий фонового электрополя рассматривался выше, хотя и обсуждались поля иной природы. Однако физика измерения остается той же. Поскольку в этом случае проблема осложняется необходимостью коррекции знака шумовой составляющей, то, как установлено в процессе полевой проверки, вопрос решается 2—3-кратным повторным определением ($n=25$). Не вдаваясь в методические детали упомянутого фрагмента работы, укажем, что она выполнялась на предварительно выделенных участках с преобладанием вертикальных составляющих градиентов фонового электрополя.

Согласно имеющимся данным [178], формирование только горизонтальных градиентов электропотенциалов в почве, тем более на принятом межэлектродном расстоянии 50 мм, маловероятно. Следует учитывать и то, что на дециметровом порядке расстояний в пределах почвенного континуума современные представления о характере его организации предполагают преимущественную вертикальную анизотропность. Поэтому наиболее вероятной, причем вызывающей наибольшее погрешности при использовании прибора, является представленная на рис. 34 комбинация вертикальной и горизонтальной составляющей градиента фонового электрополя. В силу симметричности датчиков вопрос о локализации кажущегося источника потенциала E справа или слева не имеет значения. Кроме фонового электропотенциала, представлена его комбинация с электропотенциалом, наведенным движущейся по капиллярам влагой. Рядом с электродами проставлены значения наведенных на них в почве электропотенциалов (в квадратных скобках), отражающих суперпозицию поля, наведенного движущейся влагой (индекс v), и поля почвы (индекс $п$).

Рис. 34а, б характеризуют соответственно случаи относительно больших и относительно малых градиентов электрополя движущейся влаги на фоне одного и того же уровня

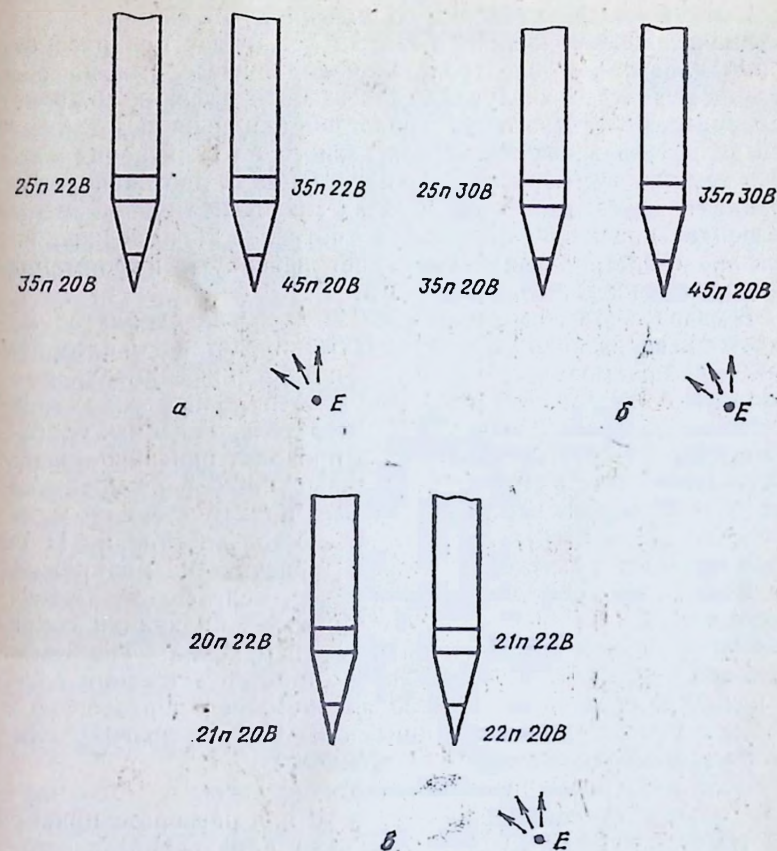


Рис. 34. Электропотенциалы в почве

микронеоднородного фонового поля. Рис. 34в отражает случай слабой изменчивости фонового поля.

Описанный выше режим работы устройства относится к случаю низкой изменчивости фонового электропотенциала почвы, когда его значение мало влияет на точность индикации вертикального градиента электропотенциала, наводимого в почве движущейся влагой (рис. 34в).

Это следует из значений электропотенциалов и подтверждается их подстановкой в аналитическое выражение для расчета индицируемого потенциала. Фоновый электропотенциал по рис. 34в не искажает показаний регистрирующего блока прибора, характер которого для фильтрационного потенциала, его суперпозиции с фоновым электропотенциалом тот же.

Следовательно, пригодность предложенного способа в таком варианте почвенных условий не вызывает сомнений.

Значительно большие сложности возникают при рассмотрении данных об электропотенциале, приведенных на рис. 34а, б. В этих двух случаях относительно высокая микронеоднородность фонового электропотенциала приводит к тому, что вертикальный градиент наведенного на электродах каждого стержня суммарного электропотенциала противоположен градиенту потенциала электрополя движущейся влаги. Это не позволяет правильно определить потребность в поливе, поскольку регистрирующий блок дает неверную информацию о направлении движущейся влаги.

В связи с этим был проведен поиск новых вариантов методики использования прибора. Ниже представлен алгоритм наиболее приемлемого, с нашей точки зрения, варианта, реализующий преимущество, заложенное в полной симметричности конфигурации датчиков и измерительной схемы. Стержни прибора погружают на 10 см и приводят описанную выше индикацию. Затем стержни извлекают, прибор разворачивают на 180° вокруг вертикальной оси, причем стержни меняют местами и погружают в то же место на глубину 11 см (обеспечивается контакт с почвой практически на прежней глубине) и проводят новую индикацию. Если фоновый электропотенциал мал (рис. 34в), то характер индикации сохраняется в каждой выполненной паре измерений. Показание прибора отражает действительный характер движения влаги в почве, данные принимаются во внимание, и разрешается переход к выполнению описанных операций на другой глубине расположения электродов стержней.

Если электроды располагают в слое почвы с потенциалами, соответствующими рис. 34а, б, то при развороте прибора на 180° на той же глубине получают пару неопределенных (рис. 34а) или противоположных (рис. 34б) показаний регистрирующего блока. Это обусловлено соединением дифференциальных усилителей измерительного блока и соответствует предложенному аналитическому выражению индицируемой регистрирующим блоком разности потенциалов. Обеспечивается выявление зон в почве, отличающихся высокой микронеоднородностью фонового электропотенциала, искажающего данные о направлении движения влаги. Описанный результат с противоположной индикацией на одной глубине не принимается во внимание.

Как правило, 8—13 пар погружений на разные глубины достаточно для данных об установлении потребности в поливе. Таким образом, отбраковка данных, искажающих индикацию вертикальных градиентов электропотенциала, наводимо-го в почве движущейся влагой, обеспечиваемая предложен-

ным устройством, позволяет преодолеть вредное влияние микронеоднородности фонового электропотенциала почвы на процесс определения потребности в поливе полей, что повышает точность назначения сроков полива.

До настоящего времени применяли горизонтальные градиенты электрического потенциала, измеряемые в пределах ландшафтов на поверхности почвы и свидетельствующие о водобалансовых состояниях орошаемых массивов с точки зрения гидрологии и гидромелиоративной обстановки.

Установка спаренных электродов, определение срока полива по смене знака дифференциального электрического потенциала по слоям почвы принципиально отличают разработанный способ от прежних подходов к реализации мониторинга влажности почв.

Отметим, что используемый при крупномасштабном почвенно-мелиоративном картировании электрический потенциал поверхности почвы, хотя и обеспечивает определение пространственной неоднородности электропотенциала, но не решает проблему установления времени начала полива элементов ландшафтов.

Принципиальным функциональным отличием предложенного способа является мобильность в отсутствие калиброванных стационарных датчиков [131]. Достижимый результат дает непосредственную индикацию потребности в поливе без необходимости отсчета отдельных показаний, их сопоставления и водобалансовых расчетов.

4.3. Ультразвуковой экспресс-прибор для массового определения засоленности почв

Приведенные выше результаты наших исследований показали решающую роль горизонтально-бокового солепереноса в поддержании устойчивости актуальной структуры почвенного покрова. Там, где в процессе мелиорации сохраняется горизонтальный массоперенос, создаются предпосылки для реставрации отрицательных агрофизических свойств солонцов. В таких условиях, естественно, возникает вопрос об экспресс-методе контроля солевого режима мелиорируемых солонцовых почв. Традиционные способы определения степени засоления почв как по величине сухого остатка, так и по характеру электропроводности громоздки, дороги, труднореализуемы в полевых условиях или недостаточно точны. Поэтому поиск оперативных и легко поддающихся автоматизации методов анализа является актуальной задачей.

В связи с этим нами разработан ультразвуковой способ контроля протекания мелиоративного процесса при окультуривании солонцовых комплексных почв [4].

Способ основан на физическом явлении изменения скорости и поглощения ультразвука при изменении структуры облучаемых ультразвуком электролитов. В качестве электролита исследуется водная вытяжка из почв. В целях повышения точности скорость ультразвука определяется по методу многократных эхонимпульсов. Составлены табулированные и графические номограммы, обеспечивающие быструю интерпретацию результатов измерений.

Известно, что измерения скорости и поглощения ультразвука дают информацию о структуре растворов электролитов, физических и химических процессах, протекающих в этих растворах.

Скорость распространения ультразвука в жидкой среде зависит от ее плотности ρ и адиабатической сжимаемости β_s :

$$V = \sqrt{\frac{1}{\rho + \beta_s}}$$

В растворах электролитов электрическое поле ионов оказывает сильное электрострикционное воздействие на окружающие молекулы растворителя, поэтому объем и сжимаемость растворителя существенно уменьшаются. При добавлении в воду сильного электролита скорость ультразвука резко возрастает. Следовательно, ее можно использовать в качестве косвенного показателя концентрации соли в водных вытяжках почв.

Ультразвуковые параметры водных растворов электролитов исследованы достаточно подробно [25, 214]. Водная вытяжка почв отличается от ранее изученных объектов значительно более низкой концентрацией, специфическим набором растворенных веществ и наличием недиссоциирующих компонентов. Эти особенности обуславливают высокие требования к чувствительности и точности измерений скорости ультразвука.

На рис. 35 приведена блок-схема собранной нами измерительной установки.

Электрические сигналы, вырабатываемые синхронизатором, запускают генератор радионимпульсов и генератор регулируемой задержки развертки. Радионимпульсы возбуждают пьезопреобразователь, находящийся в акустическом контакте со средой, заполняющей измерительную кювету. Импульсы упругих волн ультразвуковой частоты распространяются в среде, отражаются от задней стенки кюветы и возвращаются на пьезопреобразователь. Материал задней стенки (отражателя) выбран таким образом, чтобы обеспечить как можно более полное отражение ультразвука. Электрические сигналы с пьезопреобразователя поступают на усилитель, а с него —

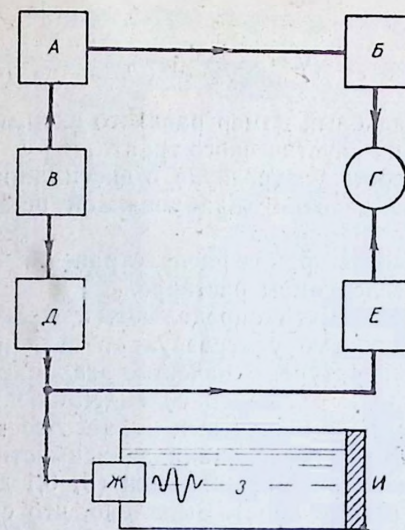


Рис. 35. Блок-схема измерительной установки:

А — задержка развертки; Б — генератор развертки; В — синхронизатор; Г — осциллограф; Д — генератор радионимпульсов; Е — усилитель; Ж — пьезопреобразователь; З — кювета; И — отражатель

на осциллокопический индикатор с калиброванной разверткой. Момент запуска развертки определяется длительностью импульса, вырабатываемого генератором задержки развертки.

Измерительная установка была изготовлена из блоков серийно выпускаемой аппаратуры — дефектоскопа УДМ-1М и осциллографа С1-65.

Скорость ультразвука определяли по методу многократных эхонимпульсов.

Методика определения концентрации соли в растворе с помощью, описанной установки состоит из следующих операций: измерительную кювету наполняют дистиллированной водой, измеряют ее температуру с точностью до $0,1^\circ\text{C}$; на экране осциллографа вершину k -го эхонимпульса устанавливают на одну из временных меток в конце шкалы. Дистиллированная вода заменяется исследуемым раствором, на экране ЭЛТ отмечается смещение n (в делениях шкалы) k -го эхонимпульса.

Скорость ультразвука в исследуемом растворе вычисляют по формуле

$$V = \frac{kl}{kl/V_0 - n\Delta t},$$

где k — порядковый номер рабочего эхосигнала;
 l — длина акустического тракта;
 V_0 — скорость ультразвука в дистиллированной воде;
 Δt — цена деления калиброванной шкалы осциллографа;
 $n\Delta t$ — разность времен распространения импульса в воде и исследуемом растворе.

Концентрацию солей определяют, сравнивая измеренную скорость со скоростью ультразвука в эталонных растворах при той же температуре. В качестве эталонных растворов использовали растворы смеси солей NaCl и Na_2SO_4 , являющихся основными компонентами ионного состава сильнозасоленных почв. Была исследована зависимость скорости ультразвука от концентрации этой смеси (от 0,1 до 2%) и ее температуры (от 13,5 до 30°C). Выявлено, что связь между скоростью и концентрацией близка к линейной (рис. 36), изменению концентрации в 0,1% соответствует изменение скорости 1,3 м/с, а температурный коэффициент составляет 3,0—3,5 м/(с·град).

Значения k , l , n , Δt были выбраны так, чтобы обеспечить регистрацию изменения концентрации в 0,025%.

Проведены сравнительные исследования, в результате которых определили содержание легкорастворимых солей (сухой остаток) в засоленных почвах двумя методами: выпариванием (контроль) и ультразвуком. Результаты математически обработаны (табл. 38).

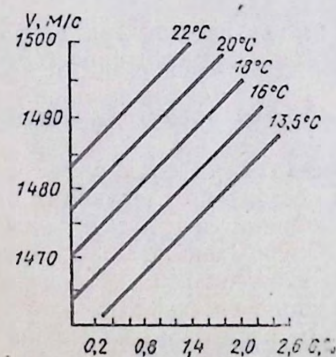


Рис. 36. Скорость ультразвука в зависимости от концентрации и температуры раствора

Таблица 38
Содержание легкорастворимых солей в почвах Ростовской области, %

Почва	Глубина, см	п	Выпаривание			Ультразвуковой		
			М	σ	V, %	М	σ	V, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Солонец степной корковый сульфатно-хлоридный	0—14	7	0,256	0,032	12,70	0,200	0,040	20,00
	14—32	5	0,295	0,042	14,24	0,225	0,055	24,95
	32—42	6	0,474	0,051	10,76	0,368	0,041	11,14
	90—100	8	1,825	0,151	8,27	1,779	0,153	8,60
	120—130	4	1,323	0,128	9,67	1,302	0,102	7,83
Солонец луговой средний содово-хлоридно-сульфатный	0—12	4	0,315	0,045	14,63	0,220	0,048	17,14
	12—36	6	0,448	0,047	13,51	0,305	0,060	19,84
	36—50	7	0,627	0,073	11,64	0,462	0,052	11,33
	80—90	5	0,843	0,057	6,76	0,759	0,064	9,43
	100—110	7	1,234	0,104	8,43	1,247	0,101	0,80
	140—150	6	0,912	0,072	7,89	0,932	0,088	9,44
Солонец степной мелкий сульфатно-хлоридный	7—20	5	0,408	0,018	4,41	0,314	0,042	13,38
	20—30	4	0,683	0,061	8,93	0,568	0,067	11,79
	55—65	6	0,781	0,039	4,99	0,737	0,082	11,13
	100—110	5	0,988	0,071	7,19	1,040	0,134	12,88
	150—160	5	1,685	0,103	6,11	1,703	0,125	7,34
	220—250	7	1,244	0,124	9,97	1,230	0,092	7,48
	300—350	7	0,803	0,062	7,72	0,823	0,065	7,90
Солончак луговой сульфатно-хлоридный	0—12	5	2,175	0,124	5,70	2,140	0,224	10,47
	12—27	4	1,803	0,138	7,65	1,734	0,215	12,40
	27—43	6	1,304	0,092	7,05	1,259	0,145	11,52
	60—80	7	1,215	0,074	6,09	1,172	0,161	13,74
	110—120	5	0,932	0,123	13,20	1,017	0,107	10,52
	140—160	7	0,815	0,135	16,56	0,840	0,108	12,71
Солонец степной хлоридно-сульфатный	11—29	6	0,290	0,038	12,68	0,225	0,037	18,97
	29—40	7	0,382	0,042	11,07	0,250	0,040	16,00
	40—50	8	0,418	0,028	6,70	0,340	0,052	15,29
	80—90	7	1,229	0,093	7,57	1,203	0,144	11,97
	100—110	6	0,847	0,090	10,63	0,884	0,095	10,75
	140—150	7	0,559	0,043	7,69	0,095	0,086	14,45
	180—190	5	0,689	0,054	7,84	0,728	0,095	13,05
	210—230	6	1,225	0,092	7,51	1,194	0,021	1,76
Солонец степной глубокий сульфатный	17—25	7	0,262	0,032	12,21	0,210	0,035	19,66
	25—38	8	0,404	0,040	10,00	0,290	0,018	6,21
	40—50	9	0,358	0,051	14,24	0,230	0,037	15,55
	100—130	8	0,575	0,064	11,13	0,594	0,063	10,61
	150—180	7	0,725	0,080	11,03	0,770	0,057	7,40

Как видно из табл. 38, наибольшее расхождение в величине сухого остатка отмечается в верхних гумусово-элювиальном и иллювиальном горизонтах солонцов. Это связано с на-

Таблица 39

Содержание водно-растворимого органического вещества в почвах
Ростовской области

Почва	Глубина, см	n	Бихроматный (контрольный)			Ультразвуковой			% к контролю
			M	σ	V, %	M	σ	V, %	
Солонец степной корковый	0—14	7	0,065	0,009	13,85	0,056	0,010	17,85	85,15
	14—32	5	0,081	0,017	10,82	0,070	0,014	5,71	86,47
	32—42	6	0,093	0,014	15,05	0,106	0,022	20,75	113,58
Солонец луговой средний	0—12	4	0,085	0,008	9,41	0,095	0,012	12,69	111,76
	12—36	6	0,167	0,025	14,97	0,143	0,027	18,88	85,62
	36—50	7	0,150	0,027	23,48	0,165	0,023	13,94	110,00
	80—90	5	0,056	0,009	16,07	0,064	0,012	18,79	114,28
Солонец степной мелкий	7—20	5	0,086	0,007	7,90	0,094	0,014	14,89	106,09
	20—30	4	0,124	0,023	18,55	0,115	0,020	17,38	102,31
	55—65	6	0,052	0,008	15,38	0,044	0,006	13,64	84,62
Солончак луговой	0—12	5	0,040	0,007	15,91	0,035	0,008	22,85	87,50
	12—27	4	0,063	0,009	14,28	0,069	0,012	17,39	109,52
	27—43	6	0,051	0,011	21,50	0,045	0,008	17,78	88,21
	60—80	7	0,035	0,006	17,14	0,043	0,006	13,95	122,85
Солонец степной средний	11—29	6	0,081	0,010	11,35	0,070	0,009	12,86	86,42
	29—40	7	0,123	0,021	8,13	0,130	0,026	20,00	105,69
	40—50	8	0,082	0,009	10,98	0,078	0,010	12,69	95,12
Солонец лугово-степной	17—25	7	0,043	0,008	18,60	0,052	0,006	11,54	120,92
	25—38	8	0,106	0,006	5,66	0,114	0,017	14,91	107,55
	40—50	9	0,142	0,031	21,83	0,128	0,026	20,31	90,14
Лугово-черноземная солонцеватая	0—20	7	0,104	0,022	21,07	0,115	0,024	20,87	110,58
	25—35	5	0,122	0,027	22,13	0,133	0,031	23,31	117,31
	40—50	7	0,147	0,019	12,93	0,161	0,034	29,29	109,52
	60—70	8	0,082	0,012	14,63	0,073	0,009	12,33	89,02

личием водно-растворимого органического вещества, незначительно влияющего на скорость ультразвука, но существенно влияющего на величину сухого остатка. Высокая сходимость результатов отмечена в сильнозасоленных горизонтах почв, где растворимое органическое вещество скоагулировано легко растворимыми солями.

Результаты статистической обработки показывают, что наименьшее значение вариационного коэффициента ($V=8-12$) отмечено в засоленных горизонтах, в то время как в относительно промытых оно увеличивается до 15—20%, так как значительно возрастает влияние погрешностей измерения сравниваемых методов. Особенно это относится к ультразвуковому методу, чувствительность определения которого со-

ставляет 0,025%. Погрешность измерения ультразвуковым методом может быть уменьшена термостатированием стандартного и исследуемого растворов в процессе анализа.

В табл. 39 приведены результаты определения содержания водно-растворимого органического вещества по бихроматной окисляемости и по разности сухого остатка, определенными методами выпаривания и ультразвуковым.

Из данных табл. 39 следует, что оба метода дают относительно близкие результаты, причем наибольшие расхождения не превышают $\pm 15-20\%$. Расхождения связаны главным образом с тем, что, с одной стороны, бихроматная окисляемость составляет 75% общего содержания органических веществ в водной вытяжке, а с другой — условная степень диссоциации водных растворов гуминовых кислот солонцов составляет 10—20%. Это отражается на скорости распространения ультразвука.

Итак, по разности результатов выпаривания и ультразвукового метода возможно проводить предварительную оценку общего содержания водно-растворимого органического вещества.

Данные табл. 40 отражают результаты производственной проверки предложенного способа при различных вариантах мелиоративной обработки солонцов.

Согласно табл. 40 предлагаемый способ контроля протекания мелиоративного процесса обеспечивает индикацию динамики запасов солей в различных горизонтах почв при всех применяемых при орошении способах окультуривания. Его значимость заключается в возможности управления протеканием мелиоративного процесса путем регулирования режима промачивания окультуриваемых почв, который, как известно, является основным условием благоприятного протекания обменных реакций в почвенном поглощающем комплексе. Это свойство ультразвукового способа позволяет корректировать общее ирригационное питание почв, и, что особенно важно, его пространственную однородность в течение суток, включая время восприятия необходимого согласно получаемым ультразвуковым способом данным режима работы дождевальных или поливных устройств.

Таким образом, эффективное окультуривание солонцовых комплексных почв на основе мониторинга факторов протекания мелиоративного процесса возможно только с использованием ультразвукового способа его контроля. Статистическая характеристика сопоставления данных, получаемых общепринятыми и ультразвуковым способами, отражает достоверность данных ультразвукового способа контроля протекания мелиоративного процесса.

Ультразвуковой способ контроля протекания мелиоратив-

Таблица 40

Динамика содержания легкорастворимых солей в мелиорированных орошаемых почвах (1987 г., 6-й год последействия мелиорации), %

Почва, режим полива, равномерность промачивания почв в мелиоративный период	Глубина, см	Гипсование	Комплексный метод	Планировка буртованием
1	2	3	4	5
Солонец, ДДА=100М бьеф 50 м, $h_{\text{пл}}=0,3$ м	0—20	0,113	0,072	0,123
	20—40	0,368	0,231	0,459
	40—60	0,781	0,481	0,531
	60—80	1,420	1,128	0,948
	80—100	1,724	1,427	1,705
	100—120	1,328	1,294	1,301
	120—140	1,536	1,405	1,800
	140—160	1,934	2,043	2,214
Каштановая солонцеватая почва, ДДА=100М, бьеф 50 м, $h_{\text{пл}}=0,45$	0—20	0,034	0,050	0,037
	20—40	0,058	0,044	0,100
	40—60	0,304	0,212	0,428
	60—80	0,607	0,481	0,513
	80—100	0,931	0,810	0,735
	100—120	0,812	0,214	0,841
	120—140	1,344	1,000	0,931
	140—160	1,205	0,938	1,315
Лугово-каштановая почва, ДДА=100М, бьеф 50 м, $h_{\text{пл}}=1,6$ м	0—20	0,020	0,023	0,026
	20—40	0,014	0,022	0,037
	40—60	0,029	0,025	0,024
	60—80	0,031	0,029	0,071
	80—100	0,029	0,035	0,072
	100—120	0,044	0,044	0,053
	120—140	0,120	0,087	0,124
	140—160	0,211	0,099	0,181
Солонец, ДДА=100М, бьеф 200 м, $h_{\text{пл}}=0,6$ м	0—20	0,056	0,061	0,051
	20—40	0,202	0,130	0,158
	40—60	0,312	0,336	0,266
	60—80	0,913	0,627	0,814
	80—100	1,326	1,035	1,201
	100—120	1,215	1,359	1,205
	120—140	1,064	1,427	1,713
	140—160	1,327	1,801	1,929
Каштановая солонцеватая почва, ДДА=100М, бьеф 200 м, $h_{\text{пл}}=0,7$ м	0—20	0,041	0,032	0,029
	20—40	0,042	0,038	0,059
	40—60	0,207	0,152	0,181
	60—80	0,526	0,341	0,216
	80—100	0,711	0,625	0,824
	100—120	0,931	0,821	1,314
	120—140	1,514	1,916	1,052
	140—160	1,131	1,503	1,325

Продолжение табл. 40

1	2	3	4	5
Лугово-каштановая почва, ДДА=100М, бьеф 200 м, $h_{\text{пл}}=0,8$ м	0—20	0,025	0,021	0,028
	20—40	0,022	0,0019	0,031
	40—60	0,036	0,044	0,046
	60—80	0,035	0,052	0,081
	80—100	0,046	0,063	0,103
	100—120	0,091	0,066	0,091
	120—140	0,214	0,181	0,126
	140—160	0,205	0,156	0,109

ного процесса освобождает от необходимости целого ряда лабораторных операций: фильтрования, отбора аликвотной части вытяжки, выпаривания, взвешивания, что повышает автономность диагностики.

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОРОШАЕМЫХ СОЛОНЦАХ

Выполнена оценка экономической эффективности изучаемых мероприятий. Разовые эксплуатационные затраты на 1 га трехъярусной вспашки и гипсования распределены пропорционально сроку последействия (восемь лет) [97, 203]. Для расчета затрат X на уборку прибавки урожая использованы корреляционные коэффициенты нелинейного уравнения связи между затратами на возделывание кукурузы при зональной агротехнике и затратами в условиях опыта [28].

$$X = 3 (0,6 \Delta / Y + 1 / (1 + 0,5 \Delta / Y)),$$

где 3 — прочие затраты (средние отраслевые затраты на возделывание кукурузы на силос в условиях орошения), руб/га;

Δ — прибавка урожая по варианту, ц/га;

Y — урожай по варианту, ц/га;

0,6; 0,5 — коэффициенты уравнения.

Стоимость мероприятий по регулированию гидрологического режима взята с учетом цикличности его проведения на основании технико-экономических показателей использованных механизмов и действующих расценок [204, 205].

Планировка методом буртования является разновидностью кулисной планировки, и ее стоимость относят к капитальным затратам. В то же время мероприятия по регулированию гидрологического режима — агротехнический прием, который

включают в статью текущих затрат. Таким образом, сопоставить вариант 11 с остальными вариантами невозможно и поэтому его экономическая оценка не выполнялась.

Таблица 41

Экономическая эффективность возделывания кукурузы на силос (1982)*

Показатель	Вариант					
	1	2	5	7	9	10
Урожайность, ц/га	192,8	235,4	224,5	273,9	293,2	298,0
Отклонение от контроля, ц/га	—	42,6	31,7	81,1	100,4	106,2
Выход, ц корм. ед. с 1 га	38,6	47,1	44,9	54,8	58,6	59,6
в т. ч. прибавка	—	8,5	6,3	16,2	20,0	21,0
Стоимость урожая, руб/га	216,0	263,7	251,4	307,2	328,0	333,8
в т. ч. прибавка	—	47,7	35,4	91,2	112,0	117,8
Всего затрат, руб/га:	105,10	119,78	121,83	127,35	135,31	134,96
по опыту	7,02	9,40	13,35	11,77	15,73	13,48
по отношению к контролю	—	2,38	6,33	4,75	8,71	6,40
на производство и уборку прибавки урожая	—	12,3	10,4	17,5	21,5	23,4
дополнительных по отношению к контролю	—	14,62	16,73	22,25	30,21	29,86
Прочие	98,08	98,08	98,08	98,08	98,08	98,08
Себестоимость продукции, руб/ц:						
— в натуре	0,54	0,51	0,54	0,47	0,46	0,45
— в корм. ед.	2,70	2,55	2,70	2,35	2,30	2,25
Чистый доход, руб/га	110,90	144,92	129,57	179,85	192,69	198,84
в т. ч. по опыту	—	34,02	18,67	68,95	81,79	87,94
Рентабельность, %	106,0	121,0	106,6	142,0	144,3	148,2
Рентабельность, % к контролю	100	114,0	100,5	134,1	135,8	139,9
Окупаемость 1 руб. дополнительных затрат по отношению к контролю	—	2,33	1,12	3,14	2,74	2,95

* Опыт 1.

Расчет экономической эффективности выполнен по данным, выбранным методом рендомизации из завершающей фазы исследований, поскольку преимущества метода окультуривания солонцовых почв с применением регулирования гидрологического режима особенно проявляются именно в последствии мелниорации (табл. 41 и 42). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что регулирование гидрологического режима обуславливает значительный прирост чистого дохода от возделывания кукурузы на силос в условиях орошения на фоне комплексного метода мелниорации солонцовых почв. Дополнительный чистый доход от использования этого мероприятия составил от 33,66 до 117,98 руб/га. Уровень окупаемости дополнительных затрат непосредственно зависел от типа орудия, которым выполнялось регулирование, и на оп-

тимальных по этому показателю вариантах 9, 10 составил 2,74—7,10 руб/га.

Таблица 42

Экономическая эффективность возделывания кукурузы на силос (1984)*

Показатель	Вариант				
	1	2	5	9	10
Урожайность, ц/га	259,5	284,8	289,4	331,6	338,5
Прибавка, ц/га	—	25,3	29,9	72,1	79,0
Процент корректировки	—	4,4	5,1	12,4	13,6
Выход, ц корм. ед. с 1 га	54,5	59,8	60,8	69,6	71,1
в т. ч. прибавка	—	5,3	6,3	15,1	16,6
Стоимость урожая, руб/га	446,90	490,36	498,56	573,18	583,02
в т. ч. прибавка	—	43,46	51,66	126,28	146,12
Всего затрат, руб/га	74,36	80,27	86,55	94,62	88,61
в т. ч.:					
по опыту	3,89	6,53	12,20	14,93	8,03
на прибавку	—	3,27	3,79	9,22	10,11
прочие	70,47	70,47	70,47	70,47	70,47
Себестоимость, руб/ц:					
в натуре	0,29	0,28	0,30	0,29	0,26
1 ц корм. ед.	1,36	1,34	1,42	1,36	1,25
Чистый доход, руб/га	372,54	410,09	412,01	478,56	494,41
в т. ч. по опыту	—	33,66	35,58	104,13	117,98
Рентабельность, %	501,0	510,9	476,0	505,8	558,0
Рентабельность, % к контролю	100	102,0	95,0	101,0	114,4
Окупаемость 1 руб. дополнительных затрат	—	4,43	3,21	5,70	7,50

* Опыт 1.

Экономическое сопоставление вариантов проведенного полевого опыта показало, что предлагаемые нами дополнительные элементы интенсивных технологий возделывания кормовых культур в условиях орошения не только обеспечивают оптимальное протекание мелниоративного процесса и расширенное воспроизводство плодородия. Регулирование гидрологического режима является предпосылкой формирования перспективных экономических сельскохозяйственных технологий для почв юго-востока Ростовской области и других орошаемых регионов СССР, где представлена микрокомплексность почвенного покрова.

Экономическая оценка вариантов реализации техники полива дождеванием на солонцовых почвах (табл. 43) подтвердила данные разд. 3:2. Для солонцовых комплексов это является важным моментом, который обеспечивает оптимальные условия для протекания мелниоративного процесса, в

частности, сокращение процессов слитизации, пространственную однородность промачивания почв, исключение горизонтального массопереноса между ЭПА.

Таблица 43

Экономическая эффективность техники полива при возделывании кукурузы на силос

Показатель	Импульс, T=18 мин	Импульс, T=12 мин	Непрерывн. П=7, Б=100 м
Урожай, ц/га	180	185	205
Прибавка урожая, ц/га	—	5	25
Стоимость урожая, руб/га	297,0	312,4	341,4
Стоимость прибавки урожая, руб/га	—	15,4	44,4
Всего затрат, руб/га	137,0	130,5	139,6
Затраты на производство, руб/ц	105,4	109,3	114,1
в т. ч.:			
дополнительные затраты на полив, руб/га	31,6	25,1	29,7
экономия за счет сокращения водопада, руб/га	—	—3,9	—4,2
Условно чистый доход, руб/га	160,0	181,9	201,8
Дополнительный условно чистый доход, руб/га	—	21,9	41,8
Окупаемость дополнительных затрат, руб/га	—	1,07	1,81
Себестоимость, руб/ц	0,69	0,62	0,59
Рентабельность, %	119	124	143

В данных, приведенных в табл. 43, учтена экономия оросительной воды, изменение затрат на полив при разных вариантах его реализации, что свидетельствует о преимуществе непрерывного режима движения ДДА-100МА перед импульсными режимами.

Полосоперыватели (разд. 3.1.) применяют на землях, подверженных водной и ирригационной эрозии (решается задача сокращения эрозийного процесса в результате формирования регулирующей емкости для приема атмосферных осадков на поверхность поля без локального и ландшафтного стока) и слабоуклонных орошаемых дождеванием не подверженных ирригационной эрозии (решается задача обеспечения высококачественного полива и преодоления процессов дифференциации почвенного покрова в смысле устойчивости СПП).

Экономический эффект орудия достигается за счет сохранения почвенного покрова и ликвидации повышенной инфильтрации в грунтовые воды при избыточном поливе понижений микрорельефа с последующей горизонтальной транслацией запасов легкорастворимых солей зоны аэрации.

В первом случае экономический эффект (Э) в миллионах рублей выражается в виде суммы предотвращенного ущерба от потери плодородия и составляет

$$\mathcal{E} = (U_{\text{п}} - U) \cdot 3\text{К} \cdot \text{Пл} = (20,8 - 20,1) \cdot 8,20 \cdot 700000 = 4,02,$$

где $U_{\text{п}}$ — ожидаемый урожай озимой пшеницы при использовании полосоперывателя, ц/га;

U — урожай озимой пшеницы на эродлируемых землях, ц/га;

3К — закупочная цена, руб/ц;

Пл — возможная площадь внедрения, га.

Во втором случае Э в миллионах рублей обеспечивается приростом урожайности за счет соответствующего увеличения промачивания микроповышений и снижения переувлажнений микропонижений на орошаемых землях и составляет

$$\mathcal{E} = (U_{\text{п}} - U) \cdot 3\text{К} \cdot \text{Пл} = (412 - 399) \cdot 1,94 \cdot 500000 = 12,61,$$

где $U_{\text{п}}$ — урожай зеленой массы люцерны при использовании полосоперывателя, ц/га;

U — урожай зеленой массы люцерны при обычной технологии возделывания, ц/га;

3К — закупочная цена (по кормовому эквиваленту), руб/ц;

Пл — возможная площадь внедрения, га.

Производственная проверка приемов ирригационного мониторинга проведена на Верхне-Сальской оросительно-обводнительной системе на базе экспериментальной установки, смонтированной в составе передвижной почвенной диагностической лаборатории N=126 (Польша).

Экономический эффект использования предложенного способа контроля ирригационной водообеспеченности почв определяют следующими предпосылками. Неточность существующих способов назначения сроков полива, или, в случае точного термовесового способа, — трудоемкость осуществления, обуславливают установленную нами неопределенность срока полива относительно оптимальной даты 5—7 сут. Это отрицательно сказывается на производственной реализации биоклиматически ирригационно обусловленного размера потенциальной биопродуктивности искусственных биогеоценозов. Оперативность разработанного способа обеспечивает реальную возможность уменьшения отклонения от оптимальной даты полива до 3—4 сут, что дает прибавку урожая 2—4% при том же размере оросительной нормы. На юге ЕС это соответствует дополнительному получению продукции в размере 0,6—1,2 ц корм. ед/га, или экономическому эффекту 4,90—9,80 руб/га.

При производственном использовании ультразвукового

экспресс-прибора для массового определения засоленности почвы получена производительность 50—60 образцов в 1 ч. Установлена возможность автоматизации определений с ожидаемым дальнейшим ростом производительности в 5—8 раз.

Экономический эффект применения разработанного способа определяют приростом продуктивности мелнируемых почв на 5—7% за счет оптимального регулирования протекающего в них мелиоративного процесса и адекватного выбора объектов почвенных мелнираций.

В условиях Верхне-Сальской оросительной системы на землях, нуждающихся в почвенных мелнираниях, расчетный Э (в миллионах рублей) от внедрения способа определяют по формуле

$$\text{Э} = [(ЧД_{\text{н}} - ЧД_{\text{и}}) - (З_{\text{н}} - З_{\text{и}})] \cdot \text{Пл} = [(256,4 - 232,8) - (174,5 - 170,2)] \cdot 13500 = 260,55,$$

где ЧД — условно чистый доход от производства продукции, руб/га (н — новый показатель, и — исходный показатель);

З — затраты на производство продукции, руб/га;

Пл — площадь возможного внедрения на Верхне-Сальской оросительно-обводнительной системе, га.

Заключение

Природа пространственной дифференциации водно-солевого режима отдельных почв солонцового комплекса определяется боковым внутрипочвенным массопереносом из-за неоднородности термодинамического потенциала почвенной влаги. Массоперенос интенсивно проявляется в зоне, ограниченной глубинами 60—120 см в микропонижении и 40—80 см на микроповышении и характеризующейся максимальной густотой гидравлических линий тока, имеющих существенную тенденцию горизонтальной направленности. При интенсивной пространственной неоднородности гидрологического режима характер солевых аккумуляций в почвах каштановой зоны определяется химизмом засоления генеральной совокупности почв, в пределах которой наблюдается строгое соответствие отдельных ЭПА и характерными типами засоления. Особенности миграции и аккумуляции солей в ЭПА зависят от формирования градиентов термодинамического потенциала почвенной влаги и подвижности макрокомпонентов, которая связана с растворимостью соответствующих солей и ассоциацией ионов.

Разработанная нами методика математического анализа соотношения форм поверхности учитывает особенности микрокомплексности каштановой зоны и, в отличие от существующих статистических методов характеристики генеральной совокупности комплексных почв, позволяет выполнить адекватную характеристику реципиентно-донорных отношений между компонентами почвенного покрова. На основе этой методики получены уравнения первой и третьей степени, отражающие количественную зависимость параметров, определяющих характер СПП, от приуроченности ЭПА к элементам микрорельефа.

Предложена двухмерная КМ формирования СПП сухой степи на основе параболических дифференциальных уравнений в частных производных, обладающая высокой аппроксимирующей способностью. Математическое моделирование

позволило установить новые особенности локализации ЭПА в пределах почвенно-географического пространства.

Модельный опыт, результаты изучения природной СПП, математическое моделирование показали, что формирование хозяйственно полезной гомогенной СПП возможно только на основе регулирования гидрологического режима совокупности почв сухой степи. В многолетних полевых опытах регулирования гидрологического режима на фоне рекомендованных методов мелиорации путем создания системы замкнутых углублений на поверхности почвы, выполняемых орудиями ПЭК-1,6, СЗС-2,1, ЛД-10, БЩН-2, ППБ-0,6, позволило устранить перераспределение влаги между смежными ЭПА, предотвратить процессы горизонтального массопереноса и интенсифицировать мелиоративный процесс промывкой легкорастворимых солей и снижением содержания поглощенного натрия на солонцовых ЭПА.

Регулирование гидрологического режима на фоне комплексного метода мелиорации обеспечило ликвидацию условий реставрации солонцовых свойств за счет преобразования СПП, прибавку урожая силосной массы кукурузы на 16,5—26,1%, повышение чистого дохода со 110,90 руб/га до 198,84 руб/га и прирост уровня рентабельности со 106,0% до 148% по сравнению с существующими методами мелиорации. Оно является важным фактором, повышающим плодородие солонцовых почв.

Разработаны способы мониторинга мелиоративного процесса, включающие расчет доз химических мелиорантов, регулирование протекания мелиоративного процесса и оперативные приемы диагностики водного и солевого режимов. Предлагаемый способ определения сроков полива по изменению параметров естественных электрических полей почв и созданный ультразвуковой экспресс-прибор для массового определения засоленности почв позволяют повысить производительность мониторинга на два порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Продовольственная программа СССР на период до 1990 года и меры по ее реализации. Материалы майского Пленума ЦК КПСС. 1982. М. 1982. С. 41—52.
2. А. С. 523651 А 01В13/16. Оpubл. 10.10.76, Бюл. № 29.
3. А. С. СССР № 515475. Оpubл. 20.10.76, Бюл. № 29.
4. А. С. 1265592. Оpubл. 29.07.85, Бюл. № 39.
5. Абрамова М. М. Передвижение воды в почве при испарении // Тр. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1953. Т. 41. С. 71—145.
6. Агроклиматические ресурсы Ростовской области. Справочник / Под ред. З. М. Русеева. Л. 1972. 251 с.
7. Айдаров И. П. О детальности определения параметров переноса солей // Гидротехника и мелиорация. 1974. № 12. С. 71—75.
8. Айдаров И. П. и др. Математическая модель динамики ионов натрия и кальция в почвах // Почвоведение. 1978. № 8. С. 134—141.
9. Айдаров И. П., Клыков В. Е., Пестов Л. Ф., Шульгин Д. Ф. Математическое моделирование ионного обмена между поровым раствором и ППК в зоне аэрации // Моделирование почвенных процессов. Пушино. 1985. С. 135—141.
10. Акимцев В. В. Биогеохимическая природа Ростовской области // Научная сессия, посвященная 40-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Тез. докл. Ростов-на-Дону. 1958. С. 101—124.
11. Алешин О. А., Моричева Н. П. Карбонатно-кальциевое равновесие в воде Волги // Гидрохимические материалы. 1957. Т. 26. С. 71—96.
12. Алешин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеониздат. 1970. 318 с.
13. Алексашенко А. А. Новый аналитический метод определения коэффициента диффузии // Почвоведение. 1980. № 7. С. 77—91.
14. Андреев Б. В. Теоретические основы повышения плодородия солонцовых и солонцеватых почв // Научный ежегодник за 1954 г. Саратовского ун-та. Саратов. 1955. С. 339—340.
15. Антипов-Каратаев И. Н., Филиппова В. Н., Комарова Н. А. Исследования по влиянию орошения на солевой состав и физико-химические свойства почв // Тр. комиссии по ирригации. М.-Л. 1935. Вып. 4. С. 7—118.
16. Антипов-Каратаев И. Н. и др. Мелиорация солонцов в СССР. М.: Сельхозгиз. 1953. 563 с.
17. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ. 1961. 491 с.
18. Багров М. Н. Особенности водного режима орошаемых светлокаштановых солонцеватых почв // Почвоведение. 1979. № 7. С. 98—103.
19. Базилевич С. В., Козловский Ф. И., Панкова Е. И. Физико-географические условия ареалов распространения засоленных почв // Засоленные почвы европейской части СССР и Закавказья. М. 1973. С. 8—14.

20. Балабанов С. В., Калининченко В. П. Полосоперыватель. А 01 В 13/16. № 4445125/30—15 16.11.88.
21. Балябо Н. К. Освоение и повышение плодородия солонцовых почв. М.: Сельхозгиз. 1962. 215 с.
22. Барботе де Марин. Калмыцкая степь Астраханской губ. 1868. С. 9—18.
23. Барбон В. А., Токарев Н. И. Расчет равновесного состава почвенного раствора и твердой фазы солей по данным водной вытяжки // Почвоведение. 1979. № 4. С. 37—46.
24. Батлер Д. Н. Ионные равновесия. Л.: Гидрометеоиздат. 1973. 446 с.
25. Бергман О. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностранной лит., 1957. 214 с.
26. Березин П. Н., Шенин Е. В. Количественная оценка и прогноз почвенной структуры // Моделирование почвенных процессов. Пушкино. 1985. С. 4—13.
27. Бобков В. П. Об устойчивости почв и грунтов к содовому засолению // Почвоведение. 1969. № 6. С. 65—73.
28. Бобров В. А. Опыт определения форм и тесноты связи между урожайностью яровых хлебов и почвенно-климатическими показателями по данным прямого учета для целей бонитировки почв // Почвоведение. 1979. № 5. С. 77—87.
29. Богдан В. С. Отчет Валуиской с.-х. опытной станции за 1895—1896 гг. 1910. 127 с.
30. Болдырев А. И. и др. Исследование фосфониса для химической мелиорации орошаемых почв в Крыму // Почвоведение. № 3. 1977. С. 147—153.
31. Большаков А. Ф. Исследование Джаныбекского стационара // Тр. комиссии по приращению. М.-Л. 1937. Вып. 10. С. 154—193.
32. Большаков А. Ф. Опыт мелиорации солончаковых солонцов и пути освоения почв солонцового комплекса // Тр. ин-та леса АН СССР. М., 1958. Т. 38. С. 12—20.
33. Большаков А. Ф. Разнообразие солонцов и особенности их мелиорации // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1973. Вып. 6. С. 6—14.
34. Большаков А. Ф. Изменение почвообразовательного процесса в солончаковых солонцах при искусственном нарушении их профиля // Почвоведение. 1975. № 10. С. 86—97.
35. Большаков А. Ф. Изменение солончаковых солонцов в результате 25-летнего их освоения // Совершенствование приемов и методов мелиорации солонцовых почв. М. 1976. С. 51—52.
36. Бондарев А. Г. Водно-физические свойства почв солонцового комплекса Заволжья и их изменение при орошении // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1970. Т. 1. Ч. 1. С. 211—245.
37. Бондаренко Н. Ф. Физические основы мелиорации почв. М.: Колос. 1975. 258 с.
38. Брусиловский С. А. О миграционных формах элементов в природных водах // Гидрохимические материалы. 1963. Т. 35. С. 3—16.
39. Буйлов В. В. О рациональном использовании орошаемых земель (на примере территории бассейна Нижнего Дона) // Научные основы рационального использования и повышения плодородия почв. Ростов-на-Дону. 1978. С. 97—101.
40. Буйловский М. С., Доскач А. Г., Фридланд В. М. Природа и сельское хозяйство Волго-Уральского междуречья. М. 1956. 230 с.
41. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа. 1986. 335 с.
42. Вадюнина А. Ф., Поздняков А. И. О причинах формирования естественного электрического поля в почве и его природа // Почвоведение. 1977. № 3. С. 57—68.

43. Варазашвили Л. И., Лытаев И. А., Петрова М. А. Статистические параметры влажности почвы как функции потенциала почвенной влаги и способы их определения // Почвоведение. 1976. № 1. С. 66—73.
44. Вараллян Д., Мироненко Е. В. Влага в почвах, подверженных засолению и осолодцеванию // Моделирование процессов засоления и осолодцевания почв. М. 1980. С. 39—108.
45. Вараллян Д. и др. Математическое описание основных водно-физических характеристик почв // Почвоведение. 1982. № 4. С. 77—90.
46. Вардамянц Л. А. Постплиоценовая история Кавказско-Черноморско-Каспийской области. Ереван. 1948. С. 49—65.
47. Варламов Н. Е. Засоление зоны аэрации и миграция солей в ней при комплексном почвенном покрове // Почвоведение. 1976. № 10. С. 21—26.
48. Варламов Н. Е., Куркин Г. А. Влияние солевых горизонтов на содержание поглощенного натрия в солонцах Нижнего Поволжья // Теоретические основы и опыт мелиоративной обработки и химической мелиорации солонцовых почв. Целиноград. 1980. С. 170—171.
49. Варламов Н. Е., Минашин Н. И. Солевой режим орошаемых каштановых почв Нижнего Поволжья // Почвоведение. 1980. № 4. С. 117—125.
50. Васильев В. П. О влиянии ионной силы на константы нестойкости комплексных соединений // Народное хозяйство. 1962. Т. 7, вып. 8. С. 1788—1794.
51. Вернадский В. И. Избранные сочинения. М.: Наука. 1954. Т. 1. 694 с.
52. Возделывание и уборка с.-х. культур на склонах // Система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 1981—1990 гг. М.: Колос. 1982. Ч. 1. С. 730—742.
53. Возник С. Г., Кузьмич К. П., Волкова Л. А. Функциональные связи гидравлической проводимости с физическими свойствами почв // Почвоведение. 1979. № 2. С. 82—88.
54. Волобуев В. Р., Пономарев Д. Г., Миканов Ф. Д. Связь между термодинамическими функциями почв, их минералогическим составом и фильтрационной способностью // Почвоведение. 1980. № 3. С. 102—105.
55. Воронин А. Д., Витязев В. Г. Характеристика энергетики воды в некоторых основных типах европейской части СССР // Жизнь Земли. М. 1974. Вып. 10. С. 192—211.
56. Волькович С. И., Урусов В. В. Дигидратация монокальций-фосфата // Производство фосфорных удобрений. Тр. НИИФ. М. 1971. С. 127—139.
57. Воронин А. Д., Скалабан В. Д. Соотношение между ионным, капиллярно-сорбиционным и осмотическим потенциалами воды в почве // Почвоведение. 1978. № 12. С. 121—126.
58. Воронин А. Д. Структурно-энергетическая концепция гидрофизических свойств почв и ее практическое применение // Почвоведение. 1980. № 12. С. 35—47.
59. Воронин А. И. Плотность сложения кабановой почвы и ее плодородие // Почвоведение. 1982. № 5. С. 32—39.
60. Воронин А. Д. Основы физики почв. М.: Изд-во МГУ. 1986. 244 с.
61. Гапон Е. Н. К теории обменной адсорбции в почвах // ЖОХ. 1933. Т. 3, вып. 6. С. 72—90.
62. Гарреле Р. М., Крайст Ч. Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Гидрометеоиздат. 1968. 367 с.
63. Гедройн К. К. Солонцы, их происхождение, свойства и мелиорация // Бюл. Новозовской с.-х. опытной станции. 1928. Вып. 46. С. 3—73.

64. Гедройц К. К. Избранные сочинения. М.: Госиздат с.-х. литературы. 1955. Т. 1. С. 559.
65. Гидрогеология СССР. Нижний Дон и Северо-Восточное Приазовье. М.: Наука. 1970. Т. 28. 314 с.
66. Годельман Я. М., Лейб Х. И., Пугаев А. П. Оценка детальности почвенных карт параметрами структуры почвенного покрова // Почвоведение. 1975. № 10. С. 19—28.
67. Годельман Я. М. Пространственные границы и внутренняя неоднородность почвенно-географических структур // Тез. докл. V делегатского съезда Всесоюзного общества почвоведов. Минск. 1977. Т. 4. С. 209—213.
68. Горбунов Н. И., Орлов Д. С. Природа и прочность связей органических веществ с мипералами почвы // Почвоведение. 1977. № 7. С. 89—100.
69. Горбунов Н. И., Юдина Л. П., Рыжова Л. В. Активность ионов натрия при взаимодействии солонцов с водой и гипсом // Почвоведение. 1978. № 6. С. 88—95.
70. Горбунов Н. И., Юдина Л. П. Скорость вытеснения ионов натрия, калия, магния из солонца // Почвоведение. 1978. № 10. С. 29—38.
71. Городецкий Г. И. О палеографии Приазовья и Западного Приманьчья в узунларско-гирканский и буртасский века // Вопросы географии. 1953. № 33. С. 38—52.
72. Григорович-Березовский Н. А. Геологическое строение Ростовской области // Почвы Ростовской области и их агрономическая характеристика. Ростов-на-Дону. 1940. С. 101—136.
73. Грим Р. Е., Бредли В. Ф., Браун Г. Слюдяные минералы глины / Рентгеновские методы определения минералов глины. М.: Наука. 1955. С. 128—144.
74. Гурьева Н. А., Курбатов А. И. Электрокинетические свойства солонцов и солонцовых почв Северного Казахстана // Известия ТСХА. 1971. Вып. 6. С. 119—122.
75. Дараб К. Ионная структура почвенных растворов и ее влияние на образование и свойства засоленных почв // Почвоведение. — 1980. № 1. С. 69—78.
76. Дараб К., Редли М. Химические и физико-химические аспекты проблемы засоления и осолонцевания почв // Моделирование процессов засоления и осолонцевания почв. М., 1980. С. 108—158.
77. Демиденко А. Я., Иванова А. Д. Влияние обменных катионов и структуры двойного электрического слоя на поведение коллоидных частиц почвы // Агрохимия и почвоведение. М. 1967. Вып. 6. — С. 129—135.
78. Демкин В. А. Об эволюции солевого состава почв Северного Прикаспия // Почвоведение. 1979. № 4. С. 23—28.
79. Демченко Е. И. Определение почвенных растворов по водным вытяжкам почв северо-западной части Чуйской впадины // Почвоведение. 1981. № 10. С. 103—110.
80. Димо Н. А., Келлер Б. А. В области полупустыни (Почвенные и ботанические исследования на юге Царицынского уезда Саратовской губ.). Саратов. 1907. 215 с.
81. Дмитриев Е. А., Манучаров А. С. Об асимметрии в распределении водопроницаемости // Почвоведение. 1967. № 5. С. 46—54.
82. Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ. 1972. 290 с.
83. Дмитриев Е. А. и др. Некоторые закономерности статистического распределения значений влажности почв // Почвоведение. 1977. № 3. С. 135—142.
84. Дмитриев Е. А., Лозановская И. Н., Мотузова Г. В. Применение методов математической статистики в почвоведении, мелиорации и сельском хозяйстве. М.: Изд-во МГУ. 1980. 57 с.

85. Добровольский Г. В. Карбонатные стяжения в почвах и почвообразующих породах Центрально-Черноземной области // Почвоведение. 1956. № 5. С. 31—42.
86. Добровольский Г. В. Мониторинг и охрана почв // Почвоведение. 1986. № 12. С. 14—18.
87. Добровольский Г. В., Орлов Д. С., Гришина Г. А. Проблемы мониторинга и охраны почв // Докл. симпоз. VII делегат. съезда Всесоюз. об-ва почвоведов. Ташкент. 1985. Ч. 6. С. 255—265.
88. Докучаев В. В. Русский чернозем // Собр. соч. М. 1951. Т. 6. 596 с.
89. Долгов С. И. Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений. М.—Л. 1948. 206 с.
90. Доскач А. Г. О генезисе рельефа Волго-Уральского междуречья // Тр. ин-та географии. 1956. Т. 69, вып. 16. С. 8—19.
91. Доскач А. Г. Природа Северной части Волго-Уральского междуречья // Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика. М. 1964. С. 7—21.
92. Егоров В. В. Солевые аномалии степных солонцов и их причина // Почвоведение. 1967. № 5. С. 108—114.
93. Егоров В. В., Мишина Н. Т. Почвы аридной зоны как объект орошения. М.: Наука. 1968. 220 с.
94. Егоров В. В., Бондарев А. Г., Зимовец Б. А. Пути улучшения орошаемых земель сухостепного Поволжья // Гидротехника и мелиорация. 1973. № 11. С. 83—88.
95. Егоров В. В., Бондарев А. Г., Зимовец Б. А. Роль различных способов полива в регулировании солевого режима почв // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1975. с. 3—17.
96. Егоров В. В., Горина Н. И. Солевые ассоциации в почвах Прикаспийской низменности в связи с их генезисом // Почвоведение. 1975. № 12. С. 3—11.
97. Егоров В. В. Предпосылки к выбору действенных способов мелиорации солонцов // Приемы и методы совершенствования мелиорации солонцов. М. 1976. С. 15—22.
98. Егоров В. В. Причины устойчивости солонцовых свойств и обоснование мелиорации солонцов // Почвоведение. 1977. № 7. С. 8—13.
99. Егоров В. В., Зимовец Б. А., Бондарев А. Г. Создание однородного высокоплодородного пахотного слоя в орошаемых почвах Поволжья // Бюл. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 1977. Вып. 15. С. 3—10.
100. Егоров В. В. Вопросы теории и практики мелиорации солонцов // Вестник с.-х. 1980. № 6. С. 71—79.
101. Егоров В. В. Некоторые вопросы повышения плодородия почв // Почвоведение. 1981. № 10. С. 71—79.
102. Егоров В. В. Задачи почвоведения в свете долговременной программы мелиорации // Почвоведение. 1985. № 9. С. 59—64.
103. Ендовицкий А. П., Минкин М. Б. О коррелятивной связи между аналитически определяемыми и расчетными концентрациями подвижных вытяжек // Почвоведение. 1980. № 2. С. 143—151.
104. Ерхов Н. С. О допустимой интенсивности искусственного дождя в различных почвенных условиях // Гидротехника и мелиорация. 1974. № 8. С. 45—51.
105. Железный Б. В. Математическое описание водно-физических характеристик почв на базе термодинамического перехода // Моделирование почвенных процессов. Пушкино. 1985. С. 17—24.
106. Заводнов С. С. Расчет насыщенности поверхностных подкарбонатом кальций с учетом комплексобразования (на примере оз. Балхаш) // Гидрохимические материалы. 1973. Т. 57. С. 107—116.
107. Залетов В. Г. Комплексобразующая способность органических

веществ и их роль в миграции элементов в поверхностных водах. Автор. дис. ... канд. хим. наук. Новочеркасск. 1969. 24 с.

108. Зимовец Б. А. О происхождении, накоплении и перераспределении солей в комплексных почвах Прикаспийской низменности // Почвоведение. 1970. № 2. С. 12—26.

109. Зимовец Б. А. Микропрофильный метод изучения закономерностей пространственного распределения солей в комплексах почв // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1975. С. 113—127.

110. Зимовец Б. А., Кауричева В. Н. О природе длительного сохранения солонцовых свойств орошаемых почв // Почвоведение. 1979. № 8. С. 15—25.

111. Зимовец Б. А. Распределение солей в почвах солонцовых комплексов // Почвоведение. 1981. № 1. С. 126—135.

112. Зимовец Б. А. Солевой режим почв солонцового комплекса при орошении дождеванием // Почвоведение. 1981. № 9. С. 86—96.

113. Зуев В. С., Мичурин Б. Н. Обобщение зависимости относительной транспирации от давления почвенной влаги // Почвоведение. 1981. № 2. С. 69—74.

114. Иванова Е. Н. Генезис и эволюция засоленных почв в связи с географической средой // Почвы СССР. М.-Л. 1939. Т. 1. С. 399—403.

115. Иванов И. В. и др. Генезис каштановых почв Северного Прикаспия и некоторые особенности сухостепных почв // Почвоведение. 1980. № 8. С. 30—41.

116. Нозефович Л. И. К вопросу о происхождении микрорельефа и комплексности сухих степей // Природа и сельское хозяйство засушливых пустынных областей. Воронеж. 1928. № 3. С. 62—91.

117. Калинин В. П., Минкин М. Б. Математическое моделирование пространственно-неоднородных структур почвенного покрова // Биологические науки. 1988. № 12. С. 77—86.

118. Калинин В. П. Влияние формы поверхности на структуру солонцового комплекса // Освоение засоленных земель в условиях орошения. Новочеркасск. 1984. С. 33—41.

119. Калинин В. П., Минкин М. Б. Количественная характеристика формирования структуры почвенного покрова сухой степи // Освоение засоленных земель в условиях орошения. — Новочеркасск. 1984. С. 66—85.

120. Калинин В. П., Минкин М. Б. Регулирование распределения влаги и солей в почвах при мелиорации орошаемых солонцовых комплексов // Химическое состояние солонцов и их мелиорация. Новочеркасск. 1986. С. 11—22.

121. Калинин В. П., Минкин М. Б. Детализация пространственно-географических параметров модели плодородия солонцового комплекса // Земельно-оценочные проблемы Сибири и Дальнего Востока. Тезисы к научной конф. Барнаул. 1986. С. 87—89.

122. Калинин В. П. Приемы повышения продуктивности мелиорированных орошаемых солонцов // Пути повышения продуктивности солонцовых земель. Тезисы докл. Всесоюзного научно-технического совещания. Новосибирск. 1986. С. 204—206.

123. Карпачевский Л. О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ. 1977. 312 с.

124. Карпачевский Л. О., Строганова М. Н. Микрорельеф — функции лесного биогеоценоза // Почвоведение. 1981. № 5. С. 83—93.

125. Келлер Б. А. Возникновение и этапы развития двучленного комплекса среди засоленных почв по окраине лиманов // Растительность Каспийской низменности междуречья Волги и Урала. М.-Л. 1936. Т. 1. С. 99—127.

126. Кипнис В. М., Максютя В. Н., Азовцева Т. В. Электрокинетический потенциал некоторых почв Нижнего Поволжья // Почвоведение. 1977. № 11.

127. Кипнис В. М. Электрокинетические параметры почв солонцового комплекса и их использование при почвенно-мелиоративной диагностике: Автореф. канд. дисс. М., 1977. 25 с.

128. Кирсанов Д. А. Теоретические основы и расчетные формулы определения веса проб. М.: Изд-во Почв. ин-та. 1963. 124 с.

129. Кирюшин В. И. Солонцы и их мелиорация. Алма-Ата. 1975. 173 с.

130. Кирюшин В. И. Роль солей в процессе солончехождения // Приемы и методы совершенствования мелиорации солонцов. — М. 1976. С. 212—220.

131. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 1977. 225 с.

132. Ковда В. А. Солончаки и солонцы. М.-Л., 1937. 246 с.

133. Ковда В. А. Борьба с засолением почв // Борьба с засолением земель. М. 1981. С. 7—28.

134. Козловский Ф. И., Королюк Т. В. Применение оптического структурного машинного анализа при детальном почвенно-мелиоративном картировании // Почвоведение. 1980. № 9. С. 145—160.

135. Козловский Ф. И., Королюк Т. В., Коникова Л. П. Значение структуры почвенного покрова при почвенно-мелиоративных исследованиях в сухостепной зоне // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1980. С. 108—133.

136. Кокурина Э. И. Влияние различных доз гипса на прочность и плотность солонцов // Почвоведение. 1980. № 6. С. 65—75.

137. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука. 1977. 831 с.

138. Корниенко В. И. Оценка содержания водорастворимых фосфатов в фосфорогипсе // Сб. науч. тр. ЮжНИИГиМа. Новочеркасск. 1986. С. 20—39.

139. Кочина П. Я., Решеткина Н. М. О применении математических методов при мелиоративных расчетах // Гидротехника и мелиорация. 1974. № 11. С. 69—72.

140. Кругликов И. А., Орлов Д. С. Элементы почвенного мониторинга в густонаселенном агропромышленном районе // Почвоведение. 1985. № 11. С. 97—105.

141. Левченко В. М. Теоретические основы физико-химического исследования природных вод / Гидрохимические материалы. 1966. Т. 45. С. 123—132.

142. Левченко В. М., Минкин М. Б., Духнина Т. П. Роль сорбента при определении растворимости сульфата кальция в природных водах // Гидрохимические материалы. 1970. Т. 54. С. 77—85.

143. Листопад Г. Е., Чижилов Г. Л. Определение параметров прерывистого дождевания // Гидротехника и мелиорация. 1977. № 8. С. 56—60.

144. Максимович С. В., Миркин Б. М. О возможности согласования классификации почв и растительности на экономической основе (на примере речных пойм МНР) // Почвоведение. 1980. № 11. С. 18—29.

145. Маркович В. М., Кояндер А. Е., Зайцев П. М. Разработка стандарт методов определения воды в удобрениях // Инструментальные методы анализа в производствах основной химической промышленности. Тр. НИИХИФ. Вып. 232. М. 1978. С. 18—21.

146. Мелиорация солонцов в условиях орошения Нижнего Поволжья / Под ред. Б. Г. Широкова. Волгоград. 1979. 130 с.

147. Мельник А. В. Пути создания однородного пахотного слоя в почвах солонцовых комплексов Заволжья // Почвоведение. 1981. № 8. С. 77—84.

148. Методика комплексной оценки состояния ионов в почве / Под ред. В. И. Савича. М.: Колос. 1980. 57 с.

149. Методические рекомендации по контролю за водно-солевым ре-

жимом и засоленностью почво-грунтов на орошаемых землях УССР / Под ред. А. В. Новиковой. Харьков. 1976. 17 с.

150. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод / Под ред. Н. Н. Веригина. М.: Колос. 1979. 336 с.

151. Механизация работ по защите почв от водной эрозии / Под ред. Л. М. Пилюгина. М.: Колос. 1969. 208 с.

152. Минашина Н. Г., Егоров В. В. Мелиорация, повышение плодородия и охрана почв аридной зоны СССР // Освоение засоленных орошаемых почв и охрана почвенного покрова. М. 1980. С. 3—30.

153. Минкин М. Б., Ендовицкий А. П., Левченко В. М. Ассоциация ионов в почвенных растворах // Почвоведение. 1977. № 2. С. 49—59.

154. Минкин М. Б., Ендовицкий А. П. Карбонатно-кальциевое равновесие в почвенных растворах солонцов // Почвоведение. 1978. № 9. С. 125—132.

155. Минкин М. Б., Бабусикин В. М., Садименко П. А. Солонцы юго-востока Ростовской области, Ростов-на-Дону. 1980. 271 с.

156. Минкин М. Б., Калинин В. П. Интенсификация мелиоративного процесса на почвах солонцовых комплексов посредством регулирования гидрологического режима // Почвоведение. 1981. № 11. С. 88—89.

157. Минкин М. Б., Горбунов Н. И., Садименко П. А. Актуальные вопросы физической и коллоидной химии почв. Ростов-на-Дону. 1982. 278 с.

158. Минкин М. Б., Корниенко В. И. Теоретические основы применения фосфогипса для мелиорации солонцовых почв // Почвоведение. 1988. № 12. С. 30—40.

159. Михайличенко В. Н. Галогенез и осолонцовывание почв равнин Северного Казахстана, Алма-Ата. 1979. 170 с.

160. Мичурин Б. Н. Новые методы определения некоторых водных свойств почв и грунтов // Сб. работ по методике исследований в области физики почв. Л. 1965. С. 164—189.

161. Мичурин Б. Н., Онищенко В. Г. Метод обобщения и расчета зависимости между капиллярно-сорбционным давлением и влажностью почв // Почвоведение. 1981. № 9. С. 54—59.

162. Мичурин Б. Н. Изменяемые и инвариантные водно-физические свойства почв // Почвоведение. 1981. № 9. С. 77—86.

163. Моделирование и управление водно-солевым режимом почв / Под ред. В. М. Боровского. Алма-Ата. 1976. 180 с.

164. Морякова Л. А. Малонатриевые солонцы восточной части Воронежской области и пути их мелиоративного освоения // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. Мелиорация солонцов. М. 1972. Ч. 2. С. 57—70.

165. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почвы. М.: Наука. 1967. 583 с.

166. Никольский Б. П. Законы обмена ионов между твердой фазой и раствором // Успехи химии. 1939. Т. 8, вып. 10. С. 47—60.

167. Новикова А. В., Гаврилович Н. Е. Влияние вещественного состава отдельных генетических горизонтов почв на метаморфизм солей при вторичном засолении // Бюл. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1977. Вып. 17. С. 13—20.

168. Новикова А. Ф., Морякова Л. А. Опыт мелиорации солонцов каштановой зоны Казахстана // Теоретические основы и опыт мелиоративной обработки и химической мелиорации солонцовых почв. Целиноград. 1980. С. 27—29.

169. Новопокровский И. В. Растительность // Почвы Ростовской области и их агрономическая характеристика. Кн. 1. Ростов-на-Дону. 1940. С. 13—52.

170. Окорков В. В. Электрокинетические свойства солонцов. Автореф. дис... канд. хим. наук. М. 1975. 17 с.

171. Онищенко В. Г., Мичурин Б. Н. Обобщение зависимости давления влаги и влагопроводности от влажности в однородных механических фракциях // Почвоведение. 1976. № 4. С. 82—88.

172. Онищенко В. Г. Подобие термодинамических свойств влаги в засоленной почве // Почвоведение. 1981. № 4. С. 94—104.

173. Онуфриев А. Ф., Калинин В. П., Минкин М. Б. Устройство для определения сроков полива. А 01 G 25/16, А 01 G 25/02. № 4209510/30—15 15.07.88.

174. Орлов Д. С. Активность ионов и диссоциация катионсодержащих компонентов почвенного поглощающего комплекса // Проблемы диагностики и мелиорации солонцов. Новочеркасск. 1980. С. 62—73.

175. Орлов Д. С., Воробьева Л. А. Система показателей химического состояния почв // Почвоведение. 1982. № 4. С. 5—23.

176. Орлов Д. С., Шлекова Е. М. Трекмерная характеристика физико-химических свойств солонца // Почвоведение. 1982. № 6. С. 11—19.

177. Пак К. П. Солонцы СССР и пути повышения их плодородия. М.: Колос. 1985. 384 с.

178. Пакшина С. М. Передвижение солей в почве. М.: Изд-во МГУ. 1980. 120 с.

179. Пакшина С. М. Влияние солей на поверхностный потенциал почвенных коллоидов // Почвоведение. 1982. № 6. С. 119—125.

180. Панов Н. П., Цюрупа И. Г., Гончарова Н. А. Теоретические основы и опыт химической мелиорации солонцов СССР // Теоретические основы и опыт мелиоративной обработки и химической мелиорации солонцовых почв. Целиноград. 1980. С. 76—77.

181. Патент США 4303129, 172 530, 1981.

182. Пачепский Я. А., Полизовский А. А. О расчете активностей ионов в почвенных растворах // Почвоведение. 1980. № 1. С. 52—62.

183. Пачепская Л. Б., Пачепский Я. А. Вычислительные эксперименты с моделями на ЭВМ // Биологические науки. 1988. № 12. С. 86—93.

184. Пачепский Я. А. и др. Математические модели для описания основных процессов засоления и осолонцевания почв // Моделирование процессов засоления и осолонцевания почв // Моделирование процессов засоления и осолонцевания почв. М. 1980. С. 158—210.

185. Пачепский Я. А. и др. Статистический анализ связи водоудерживающей способности с другими физическими свойствами почв // Почвоведение. 1982. № 2. С. 56—67.

186. Пашковскый И. С., Пягай Э. Т. Некоторые особенности моделирования процесса влагопереноса в почвогрунтах зоны аэрации // Почвоведение. 1981. № 10. С. 96—103.

187. Петрова М. В., Сапожников П. М., Устинов А. А. Статистические модели кривых водоудержания почв // Почвоведение. 1987. № 2. С. 42—51.

188. Поздняков А. И. Естественное электрическое поле почвы и его использование в почвенных исследованиях: Автореф. дис... канд. наук. М. 1975. 26 с.

189. Поликутин Н. Г., Беллон В. О. Машинные и орудия для мелиоративного освоения солонцовых почв // Вопросы мелиорации и кормопроизводства на комплексных солонцовых почвах и поливных землях в Северном Казахстане. Целиноград. 1984. С. 144—158.

190. Подольский И. Я. К характеристике малонатриевых (магневых) солонцов и солонцеватых почв Северного Казахстана // Мелиорация солонцов. М. 1968. Ч. 2. С. 141—154.

191. Поляков Ю. А. Об основных критериях равновесия ионов

менных реакций в почвах // Тр. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1956. Т. 51. С. 221—240.

192. Поляков А. Н., Ярилова Е. А., Кизяков Ю. Е. Микро-морфологическое исследование и морфометрия карбонатных черноземов Предкавказья // Почвоведение. 1972. № 11. С. 91—100.

193. Поляков Ю. П. Приемы предупреждения пригационной эрозии почв // Гидротехника и мелиорация. 1977. № 10. С. 55—61.

194. Пономарева В. В., Плотникова Т. А. Гумус и почвообразование. Л.: Гидрометеоиздат. 1980. 219 с.

195. Попов А. А., Червоной Н. И., Попов А. А. О вторичном осолонцевании, содовом засолении и стабильности солевых процессов при засолении хлоридных солонцов // Мелиорация солонцовых и засоленных почв Северного Кавказа. Новочеркасск. 1981. С. 23—30.

196. Попов А. А. Почвенно-мелиоративное состояние орошаемых земель в Ростовской области и меры по его улучшению при реконструкции оросительных систем // Изв. СКНЦ ВШ. Серия естественные науки. Вып. 1. 1984. С. 11—16.

197. Пягай Э. Т. Расчет поливных норм по показаниям тензиометров // Почвоведение. 1982. № 6. С. 133—137.

198. Рабочев Н. С., Муромцев Н. А., Пягай Э. Т. Использование тензиометров при диагностировании сроков полива // Почвоведение. 1979. № 6. С. 75—86.

199. Рабочев Н. С. и др. Применение модели тепловлагоденоса в почвогрунтах для расчета суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур // Почвоведение. 1981. № 1. С. 50—60.

200. Размахов И. Г. К вопросу о возникновении и развитии солонцовых комплексов // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1940. Т. 22. Вып. 1. С. 31—84.

201. Ревут И. Б. Физика почв. Л.: Гидрометеоиздат. 1972. 271 с.

202. Рекомендации и технологии механизированных работ по мелиорации почв Поволжья / Под ред. В. И. Азовцева, А. С. Морозовой. 1976. 66 с.

203. Рекомендации по мелиорации почв солонцовых комплексов Ростовской области в условиях орошения / Под ред. А. А. Попова, Н. С. Скуратова. Новочеркасск. 1980. 36 с.

204. Рекомендации по мелиорации солонцов сухо-степной зоны каштановых почв Ростовской области / Под ред. В. М. Бабушкина и др. Ростов-на-Дону. 1980. 26 с.

205. Рекомендации по улучшению мелиоративного состояния орошаемых земель Ростовской области / Под ред. А. А. Попова, Н. С. Скуратова. Новочеркасск. 1982. 59 с.

206. Роде А. А. Почвенная влага. М.: Госсельхозгиз. 1952. 454 с.

207. Роде А. А. К вопросу о происхождении микрорельефа Прикаспийской низменности // Вопросы географии. 1953. № 33. С. 83—86.

208. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеоиздат. 1965. Т. 1. 663 с.

209. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеоиздат. 1969. Т. 2. 287 с.

210. Родзянко Г. Н. Стратиграфия континентальных палеогеновых и четвертичных отложений Ергеней // Материалы по геоморфологии и полезным ископаемым Азово-Черноморья. Ростов-на-Дону. 1947. Вып. 22. С. 48—60.

211. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 541 с.

212. Руководство по анализу в производстве фосфора, фосфорной кислоты и удобрений. Л.: Химия. 1973. 211 с.

213. Самбур Г. Н. Подвижность обменного натрия и обоснование норм гинса при мелиорации солонцов // Почвоведение. 1963. № 11. С. 35—46.

214. Серавин Н. Г. Измерение скорости звука в океане. Л.: Гидрометеоиздат. 1979.

215. Скопин Ю. А., Савенко О. Д. Ионоселективные электроды. — Алма-Ата. 1975. 22 с.

216. Степанец И. Т. Особенности генезиса и мелиорации малопатриных солонцов Калмыцкой АССР / Солонцы и их сельскохозяйственное использование. М. 1975. С. 103—120.

217. Степанов Л. Н. Соотношение между капиллярным потенциалом (давлением) и количеством почвенной влаги // Почвоведение. 1979. № 5. С. 57—63.

218. Судницын И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во МГУ. 1979. 253 с.

219. Судницын И. И., Заболоцкий В. Р., Труфанова А. В. Экспресс — вариант гигроскопического метода измерения полного потенциала почвенной влаги // Почвоведение. 1981. № 2. С. 142—147.

220. Теоретические основы процессов засоления — рассоления почв // Под ред. В. М. Боровского, Э. А. Соколенко. Алма-Ата. 1981. 289 с.

221. Терпиловский А. Ю., Беллер В. Х. Машина плоскорезно-ротного типа для обработки степных солонцовых почв // Теоретические основы и опыт мелиоративной обработки и химической мелиорации солонцовых почв. Целиноград. 1980. С. 135—136.

222. Технология и технические средства мелиорации солонцовых почв Ростовской области / Рекомендации. — Зерноград. 1987. 36 с.

223. Типовые технологические карты на возделывание основных сельскохозяйственных культур на эрозийноопасных землях Северного Кавказа (рекомендации) / Под ред. А. И. Шабая. 1978. 118 с.

224. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1977. 735 с.

225. Тюльпанов В. И. О генезисе солонцов Центрального Предкавказья, сформировавшихся на продуктах выветривания третичных глин // Почвоведение. 1980. № 10. С. 14—26.

226. Филиппова В. Н., Фридман Н. Г. Изменение химических свойств солонцов под влиянием мелиорации и орошения // Тр. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1940. Т. 24. С. 99—138.

227. Фридланд В. М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль. 1972. 370 с.

228. Фридланд В. М. Классификация структур почвенного покрова и типизация земель // Почвоведение. 1980. № 11. С. 5—18.

229. Чижевский М. Г. Земледелие с основами почвоведения. М.: Госсельхозгиз. 1953. 440 с.

230. Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос. 1967. 335 с.

231. Шаршак В. К., Ладан Е. П. Мелиоративный плуг ПС-3-40 // Теоретические основы и опыт мелиоративной обработки и химической мелиорации солонцовых почв. Целиноград. 1980. С. 131—134.

232. Эленбогена Р. Н. и др. О формах миграции основных компонентов химического состава поверхностных вод в разных географических зонах СССР // Вестник МГУ. Серия «География». 1970. № 3. С. 92—101.

233. Электрические свойства капиллярных систем // Монографический сборник экспериментальных исследований / Григоров О. Н., Козьмина З. П., Маркович А. В., Фридрихсберг Д. А. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1956. 258 с.

234. Юдина Л. П., Ямнова И. А. Активность ионов Na, K, Ca, Cl в почвенных растворах и пастах // Бюл. почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М. 1979. Вып. 21. С. 45—48.

235. Alfaro J. E. Application of a physical model theory to predict salt displacement in soils // Soil Sci. 1971. Vol. 112. N 5. P. 364—372.

236. Anderson M. S. The influence of substituted cation on the pro-

perties of soil colloids // J. of Agric. Research. 1929. Vol. 109. N 4. P. 565—584.

237. Baver L. D. The relation of exchangeable cations to the physical properties of soils // Journ. Amer. Soc. of Agronomy. — 1928. Vol. 20. P. 291—309.

238. Baver L. D. Soil physics. N. Y. 1956. 489 p.

239. Bjerrum J., Schwarzenbach G., Sillen L. G. Stability constants. Part 2—Inorganic Logands, The chemical society. 1958. Y. 211—217.

240. Boels D. e. a. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraul conductivities.//Soil Sci. 1978. Vol. 126. P. 191—195.

241. Gardner W. R., Hillel D., Benjamini C. Post irrigation movement of soil water. 1. Redistribution // Water Res. Rev. 1970. Vol. 6. 851. P. 2. Simultaneous redistribution and evaporation // Water Res. Rev. 1970. Vol. 6. 1148 p.

242. Garrebs R. M., Thompson T. E. A chemical model for sea water at 25°C and one atmosphere total preasure // Amer. J. Sci 1962. Vol. 260. 1414 p.

243. Greenwald J. The dissociation of calcium and magnesium carbonates // J. Chem. 1941. Vol. 141. 208 p.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1. Современные представления о мелиорации земель с комплексным почвенным покровом	7
1.1. Роль СПП в оценке эффективности мелиорации солонцов	7
1.2. Горизонтально-боковое движение влаги и солей в условиях комплексности почвенного покрова — важнейший фактор снижения мелиоративного эффекта	26
1.3. Моделирование мелиоративного процесса — инструмент изучения природы солонцеобразования	61
2. Современные агротехнические и химические мелиорации	87
2.1. Агротехнические мелиорации орошаемых солонцов и новые орудия для их осуществления	89
2.2. Химическая мелиорация	95
3. Регулирование гидрологического режима орошаемых солонцовых комплексов — основное условие интенсификации мелиоративного процесса	102
3.1. Технология и технические средства регулирования гидрологического режима почв	102
3.2. Влияние регулирования гидрологического режима на влажность различных типов почв	123
3.3. Управление солевым режимом — основное условие интенсификации мелиоративного процесса	139
3.4. Продуктивность орошаемых земель при различных способах регулирования гидрологического режима солонцов	148
4. Принципы и задачи ирригационного почвенного мониторинга	154
4.1. Современная диагностика водного и солевого режимов — фактор управления мелиоративным процессом на орошаемых солонцах	154
4.2. Портативный прибор для определения сроков полива солонцовых почв	156
4.3. Ультразвуковой экспресс-прибор для массового определения засоленности почв	167
5. Экономическая эффективность управления мелиоративными процессами на орошаемых солонцах	175
Библиографический список	183
	195

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Валерий Петрович Калинин,
Михаил Борисович Минкин

Интенсификация мелиоративного процесса на орошаемых солонцовых
комплексных почвах

Редактор О. К. Абашкова

Художник А. Д. Ильин

Художественный редактор О. Е. Осташева

Технический редактор С. В. Камышова

Корректоры: Е. Ю. Пятаева, Н. В. Агапитова

ИБ № 88

Сдано в набор 17.12.90 г. Подписано в печать 30.04.91 г.
Формат 60×90¹/₁₆ Печать высокая Усл. печ. л. 12,25 Усл. кр.-отт. 12,50
Уч.-изд. л. 12,65 Изд. № 22 Тираж 1500 Заказ 3160 Цена 3 руб. 50 коп.

Издательство и типография Московской с.-х. академии
им. К. А. Тимирязева

127550, Москва И-550, Тимирязевская ул., 44