

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

И. Н. СТЕПАНОВ

# ПОЧВЕННЫЕ ПРОГНОЗЫ



---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р  
ИНСТИТУТ АГРОХИМИИ И ПОЧВОВЕДЕНИЯ

И. Н. СТЕПАНОВ

# ПОЧВЕННЫЕ ПРОГНОЗЫ

*ПОСЛЕДСТВИЯ  
ИРРИГАЦИОННО-МЕЛИОРАТИВНЫХ  
МЕРОПРИЯТИЙ*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА 1979

УДК 631 42

**Степанов И. Н. Почвенные прогнозы (последствия ирригационно-мелиоративных мероприятий).** М.: Наука, 1979 г.

Для выявления возможных положительных и отрицательных последствий ирригационно-мелиоративного освоения региона необходим не только сбор материала, но и его обработка по определенному методу. В работе рассматривается новая методика бассейнового ландшафтно-галогеохимического анализа орошаемых и проектируемых под орошение территорий, которая позволяет подойти к получению научных почвенных прогнозов.

На конкретных примерах показан способ применения бассейнового ландшафтно-галогеохимического метода анализа орошаемых и перспективных к орошению территорий. Дан прогноз их развития.

Табл. 7, рис 26, библ. 121 назв.

Ответственный редактор  
член-корреспондент АН СССР  
В. А. КОВДА

## ВВЕДЕНИЕ

---

Намеченные планы широкого развития орошения потребовали научного прогнозирования последствий ирригационно-мелиоративного освоения почв. Наиболее ответственными являются прогнозы солевого режима почв массивов, проектируемых под орошение.

Почвенные прогнозы находятся в стадии становления. Большинство из них эвристические. Применение математического аппарата основывается на больших упрощениях и допущениях. Справедливо замечание Н. Н. Ходжибаева и В. Г. Самойленко [1976] о том, что базирующиеся на эмпирических корреляциях численные решения хотя и анализируют надежно частные зависимости, но не выявляют внутренних связей процессов, а поэтому не позволяют переходить к генетическим обобщениям и прогнозам.

В настоящей работе рассматривается возможность применения метода натурального подобия на базе бассейнового ландшафтно-галогеохимического анализа территорий. Для предсказания изменений в свойствах почв используются найденные в природе аналоги — уже изученные почвы орошаемых массивов. Но для перенесения существенных свойств и процессов с аналога на объект прогноза необходимо научиться находить, а затем выражать признаки почвенного подобия объективными величинами — критериями подобия (комплексы безразмерных чисел), отражающими внутреннюю сущность сторон и явлений почвообразования. Последние можно получить из логических умозаключений, а еще лучше — из анализа уравнения, отражающего связи солепроявления с почвообразованием, гидрогеологическими, гидрологическими и геоморфологическими процессами. Для получения критериев почвенного подобия использовано выведенное нами уравнение связи [Степанов, Чембарисов, 1978]

$$\Delta M = M_3 - M_n = F(a, F_{op}, \Delta T), \quad (1)$$

где  $\Delta M$  — величина изменения за определенный промежуток времени минерализации речной (или коллекторной) воды от начального (выше орошаемого массива) —  $M_n$  к замыкающему (ниже орошаемого массива) —  $M_3$  гидрологическим створам за счет ввода новых орошаемых площадей и модернизации водохозяйственных систем;  $a$  — интегральный ландшафтно-геохимический показатель орошаемых массивов, различающихся по качеству и степени засоления почв;  $F_{op}$  — общая площадь орошаемых

почв в разные сроки;  $\Delta T$  — время, за которое произошло изменение минерализации.

Формула (1) связывает несколько параметров, выражающих сущность почвообразования орошаемых массивов различных бассейнов рек или территорий, дренируемых коллекторно-дренажной сетью (последние также будут условно называться «бассейнами коллекторов»).

В работе доказывается, что по степени и характеру изменения минерализации (и химического состава) речной или коллекторной воды с помощью уравнения (1) можно количественно оценивать почвенно-мелиоративное состояние орошаемой территории. Появилась возможность находить математически выраженные связи между почвенно-мелиоративным состоянием орошаемых массивов и составом речных (коллекторных) вод посредством ландшафтно-геохимического показателя  $a$ . Этот показатель математически не описан, но может быть проанализирован методами, опирающимися на теорию размерности путем систематизации факторов, определяющих существенные процессы почвообразования.

Работа состоит из двух частей. В первой обосновывается возможность переноса формулировок теорем физического подобия на такие сложные природные объекты, как почвы орошаемых территорий. Для этого разрабатывается представление о натурном подобии, которое можно использовать для количественных оценок и прогнозов географических и почвенно-мелиоративных условий различных территорий.

Во второй части приведены конкретные примеры расчетов почвенных прогнозов. Они составлены для небольших площадей дельты Амударьи, где по обстоятельно исследованному аналогу-массиву Кегейли прогнозируется развитие почвенных процессов на мало известном, но репрезентативном для дельты и весьма перспективном для орошения массиве Чимбай.

Работа выполнялась под руководством членов-корреспондентов АН СССР В. А. Ковды и В. Р. Волобуева. Идея написания книги была горячо поддержана ныне покойными проф. Л. Б. Розовским и Н. Н. Ходжибаевым.

За помощь в работе автор благодарит В. Г. Самойленко, Я. А. Пачепского и Л. Б. Пачепскую, Л. Ф. Камалова, Г. Н. Степанова, А. Н. Нурадилова, О. С. Матвееву, Д. Тростянского.

Первая часть и первые разделы части II написаны совместно с Н. И. Сабитовой.

## Часть I

### ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НАТУРНОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ПОЧВЕННЫМ ПРОГНОЗАМ

---

#### ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПОЧВЕННЫХ ПРОГНОЗАХ

**Определение понятия.** Почвенные прогнозы — это научное предсказание динамики и характера изменения свойств и структуры почвенного покрова во времени и пространстве под влиянием направленных тенденций развития природной среды, а также под воздействием деятельности человека. Под природной средой понимаются в первую очередь гидрогеолого-мелиоративные, гидрологические, геологические, биоклиматические и другие явления. На них базируются почвенные прогнозы. Поэтому в данной работе рассматриваются и гидрогеолого-мелиоративные прогнозы, от которых зависит судьба свойств, структуры почвенного покрова. При этом с мелиоративных позиций почва вслед за Б. Б. Полюновым [1956] принимается до глубины залегания уровня грунтовых вод, а сами грунтовые воды являются составляющими почву горизонтами<sup>1</sup>.

В настоящее время резко возросли требования к научному обоснованию почвенно-мелиоративных прогнозов с учетом не только экономических, но и социальных явлений. Последствия ирригационно-мелиоративных мероприятий зависят от достижений научно-технического прогресса, экономических, социальных и политических факторов, поэтому почвенные прогнозы должны быть конструктивными.

Почвенные прогнозы — предсказание возникновения и развития почв и почвенных процессов на основе изучения их закономерностей. Они нуждаются в разработке методов прогнозов тенденций развития и деградации почвенного покрова в целом и его составных частей (органической и минеральной фаз, водно-воздушного и теплового режимов). Фундаментом теории почвенных прогнозов служит концепция об эволюционном естественноисторическом развитии почв и грунтовых вод, а также о связи во времени и пространстве свойств и структуры почвенного покрова с известными факторами почвообразования (климатом, живым

---

<sup>1</sup> Если они не глубже 5 м. При глубине  $< 5$  м создается автоморфный режим почвообразования.

веществом, рельефом, водами, возрастом страны, горными породами, деятельностью человека).

Почвоведы и географы [Герасимов, 1969; Саушкин, 1968; Соचाва, 1974; Сватков, 1974; Глазовская, 1968; Капица, Симонов, 1974; Фриш, 1972; Звонкова, Саушкин, 1968; Звонкова, 1972] рекомендуют определять будущее почвенных и географических явлений путем экстраполяции современных явлений.

Перенесение современных явлений на прогнозируемые производится во многих областях науки методами простой экстраполяции тенденций [Гвишиани, Лисичкин, 1968; Янг, 1974]. Видимо, при почвенных прогнозах также необходимо исходить из положений, что тенденция развития изучаемых почв должна сохраниться вплоть до завершающего этапа (детерминистская методика [Янг, 1974]) или она будет постепенно изменяться, согласуясь с определенной кривой (симптоматическая методика).

Как справедливо отмечает Э. А. Корнблум [1978, с. 60], экстраполяции современных тенденций на будущее препятствует то обстоятельство, что формирование новых почвенных свойств не обязательно должно неуклонно развиваться в некотором (выявленном анализом) изначальном направлении, «даже если внешние условия и факторы почвообразования остаются стабильными». Вероятно, для получения более достоверных почвенных прогнозов с помощью экстраполяции тенденций период упреждения (прогнозирования) не должен превышать базисного периода, наблюдаемого в современных условиях [Эйрес, 1971]. По этой причине прогнозирование многих явлений при помощи экстраполяции невозможно, хотя и полезно в качестве вспомогательного приема для начальных этапов развития природы [Звонкова, Саушкин, 1968].

При разработке почвенных прогнозов необходимо использовать методы «написания сценариев», «контекстуального картографирования», «морфологического анализа» [Кузьмин, 1975; Лисичкин, 1972; Янг, 1974].

*Сценарий* пишется для того, чтобы установить логическую последовательность изучаемых процессов почвообразования, исходя из существующей обстановки. Это помогает быстро перейти к описанию ее возможного будущего положения. Сценарий позволяет развернуть детали процессов на фоне общего явления, синтезировать объекты прогноза, вычленив факторы, прямо или косвенно влияющие на прогнозируемое явление [Лисичкин, 1972; Янг, 1974]. Сценарий обеспечивает более детальное описание истории аналога.

*Контекстуальное картографирование* — графический вариант сценария. В почвоведении оно должно опираться на эволюцию структуры почвенного покрова [Бунге, 1967; Фридланд, 1972].

*Морфологический анализ* позволяет систематизировать все внешние и внутренние факторы, влияющие на почвообразование. Последовательность анализа такова: формулируются цели и за-

дачи прогноза, определяются существенные свойства и параметры. Эти параметры группируют по общему влиянию на прогнозируемый объект, затем составляется морфологическая матрица из множества элементов.

Разрабатываемые нами почвенные прогнозы методами натурального подобия не относятся к ныне применяемым методам простых экстраполяций и аналогий. Они базируются на фундаментальной научной теории физического подобия, применение которой в почвоведении только начинается.

### **Классификация почвенных прогнозов**

Почвенные прогнозы можно разделить на две группы.

1. Прогнозы тенденций естественного развития почв под влиянием постоянно варьирующих факторов окружающей среды: колебаний уровней грунтовых вод, рек, озер, морей, изменений климата, растительности, неотектоники. 2. Прогнозы возможных трансформаций почв под влиянием хозяйственной деятельности человека, особенно в результате орошения, осушения, распашки, усиленной пастбы, рубок деревьев и кустарников, сенокошения, создания каналов, дренажных систем, плотин и водохранилищ.

Почвенные прогнозы по способам обоснования и расчетов можно разделить следующим образом.

1. Метод натурального подобия. Базируется на доказательствах подобия закономерностей почвенно-мелиоративных процессов в пределах изученных и являющихся объектом прогнозирования орошаемых массивов. Используются выявленные закономерные процессы почвообразования, подобные прогнозируемым на данной или сходной по природным условиям территории.

2. Метод хроноанalogий. Допускается, что установленные ранее закономерности почвообразования (и их эколого-генетические связи с другими факторами) остаются неизменными в период заблаговременности прогноза.

3. Балансовый метод. Решаются уравнения по привносу в почву (атмосферными осадками, грунтовыми водами, живыми организмами и т. п.) и выносу из нее влаги, органических и минеральных веществ. Составляющие балансовых уравнений для каждой природной зоны известны.

4. Ретроспективный метод. Позволяет предсказать будущее развитие почв на основе теории, базирующейся на палеопедологических исследованиях. Это так называемый прогноз наоборот. Он выявляет возможные отклонения в развитии почв при различных значениях условий, существовавших в данной местности в прошлые климатические эпохи; позволяет предсказать свойства почв, если заранее известны будущие особенности климата, растительности, грунтовых вод, рельефа, а также определена цикличность тех или иных процессов.

5. Аналитический метод. Используются математические (аналитические) зависимости для описания влияния элементов гидромелиоративных систем на динамику почвенных процессов. Используется электронно-вычислительная техника (ЭВМ) для решения аппроксимаций основных дифференциальных уравнений миграции влаги и солей в почвах.

Э. Янг [1974] выделяет прогнозы следующих классов: 1—собственно прогноз, 2 — предсказание, 3 — антиципация (предвидение).

Различают три направления научно-технического прогнозирования: 1 — нормативное, 2 — изыскательское, 3 — комбинированное.

*Нормативное* (телеологическое [Эйрес, 1971]) направление. На первом этапе работ определяются цели (или оцениваются результаты), а на втором этапе — прогнозируются пути их достижения от прогнозируемого этапа к настоящему. Нормативный прогноз определяет факторы, необходимые для решения конкретной задачи. Такой прогноз согласуется с долгосрочными народнохозяйственными планами [Эйрес, 1971].

*Изыскательское* (трендовое, поисковое). прогнозирование. На первом этапе работ оценивается тенденция современных процессов, а на втором — они переносятся на будущее.

### **Краткая история почвенного прогнозирования**

Потребность в научном прогнозировании возможных изменений свойств почв под влиянием широкого ирригационно-мелиоративного освоения территорий застала почвоведов врасплох. Хотя разработки прогностического толка ведутся давно, почвоведы оказались недостаточно подготовленными к почвенным прогнозам. Так, Э. А. Корнблюм [1978] считает, что скудные знания о многих процессах почвообразования пока не позволяют делать вероятные прогнозы с высокой достоверностью. Почвенные прогнозы в настоящее время могут быть на уровне антиципации [Янг, 1974], т. е. логически сконструированной модели возможного будущего с неопределенной пока степенью достоверности.

Долгосрочные почвенные прогнозы имеют историю развития. В первые годы они носили экспертный качественный характер [Ковда, 1946; Ковда и др., 1954]. Затем появились полуквантитативные и количественные способы оценки и прогноза [Волобуев, 1975; Керзум, 1957; Новикова, 1975; Ковда, 1968; Сабольч, Дараб, Варальяи, 1972; Соколенко, 1966; Соколенко и др., 1976; Козловский, 1972; Рекс, 1969, 1970; Барон, 1971; Решеткина, 1966; Решеткина, Сойфер, 1976; и др.].

Разработка теории оценки и прогноза почвенно-галогеохимических процессов для целей мелиорации осуществляется следующими методами.

1. По точкам. Определяется миграционная способность солей в монолитах, колонках, в лабораторных или полевых условиях. Точечный метод анализа [Полынов, 1956; Панин, 1968, 1976] широко распространен в современной науке и практике.

2. По опытным полям, стоковым площадкам. Мелкоплощадной метод анализа применяется тогда, когда выясняются галогеохимические процессы, баланс прихода и расхода воды и солей с учетных территорий [Ковда, 1946—1947; Волобуев, 1948; Рабочев, 1964, 1968; Авенесян, 1969; Аверьянов, 1963; Баер, 1969; Вавилов, Гринев, 1969; Лебедев, 1963, 1973; Сляднев, 1961; Харченко, 1975; Расулов, 1976, и др.]. Применяется для получения более обобщенных характеристик мелиоративных явлений.

3. По крупным территориальным единицам (ландшафтам, биогеоценозам, гидромодульным районам, бассейнам рек, озер и морей). Миграция солей здесь рассматривается широко, с глубоким пониманием геоморфологических, климатических, гидролого-гидрогеологических особенностей территории и истории земледельческого ее освоения [Полынов, 1956; Ковда, 1946—1947; Глазовская, 1964; Перельман, 1975; Боровский, 1978; Козловский, 1972; Ходжибаев, 1970; Коноплянцев, 1967; Самойленко, 1974; и др.].

Предметом наших исследований является последний из перечисленных — территориальный метод изучения, известный под названием ландшафтно-геохимического. В настоящей работе рассмотрен его частный случай — бассейновый ландшафтно-галогеохимический метод анализа мелиорируемых территорий.

---

**ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА  
НАТУРНЫХ АНАЛОГОВ  
ПРИ РЕШЕНИИ ПРОГНОЗНЫХ ЗАДАЧ В ПОЧВОВЕДЕНИИ**

**Применение моделей-аналогов  
как средство познания процессов почвообразования**

**Дискуссионность вопроса.** Применение теории подобия в таких точных науках, как механика и физика, не вызывает сомнения. Однако возможность ее использования для орошаемых массивов требует доказательств. В литературе высказывается сомнение в том, что результаты опытов на больших и малых ирригационно-мелиоративных объектах, а также на точках с режимными наблюдениями можно переносить на аналогичные территории. Так, по мнению Э. А. Соколенко и др. [1976], в природе отсутствуют географические аналоги, а процессы почвообразования одного орошаемого массива не схожи с таковыми другого, даже если будут найдены условия их однозначности, идентичности. Прогнозные задачи можно решать лишь применяя сложный математический аппарат, который описывает каждый почвообразовательный процесс.

Напротив, Я. А. Пачепский и др. [1976] считают, что изменения почв можно характеризовать количественно, без вычленения и анализа отдельных процессов. Последние могут быть определены общими зависимостями, которые легко моделируются. Такие статистические модели затем применяются в условиях, объявляемых сходными, и в этом случае прогноз их изменений фактически проводится по аналогии.

Современные представления о строении и принципах материального единства мира приводят к заключению о возможности широкого применения методов моделирования, особенно в почвоведении.

Моделирование в исследовании водно-солевого режима почв и зоны аэрации стало применяться недавно. При этом наибольшее развитие имеет математическое моделирование — практически трудно используемое, так как многофакторность водно-солевого режима почв приводит в процессе математического решения к неизбежной схематизации явлений. Кроме того, все входящие в формулы показатели должны точно измерять свойства, которые они характеризуют. Это условие не всегда выполнимо.

Многие специалисты [Балаев и др., 1978] считают, что оперирование одними лишь математическими уравнениями без достаточного понимания сложных процессов почвообразования привело в мелиоративной практике к неверному решению прогнозов.

Такого же мнения придерживается Н. Г. Минашина [1978]. Она утверждает, что узким местом в разработке прогнозов является не недостаток математических знаний, а неизученность тенденций дальнейших изменений в изменяющихся условиях орошения.

Необходимо идти не по пути усложнения математических формул, раскрывающих суть почвообразования, а по пути выбора моделей в натуре, где почвы формируются в условиях, сходных с прогнозируемым объектом. На возможность применения метода аналогов в прогнозировании почвенных процессов указывает В. Р. Волобуев [1975]. Солевой режим почв может прогнозироваться методом подбора аналога среди орошаемых массивов, где процесс засоления изучен экспериментально, описан математически, а вновь осваиваемый массив имеет сходные природные и ирригационно-хозяйственные условия. Таким образом, помимо математического моделирования, существует и другой путь получения научно обоснованных количественных почвенных прогнозов. Это — применение методов аналогий и натурального моделирования.

Для доказательства применимости метода натурального подобия в почвенном прогнозировании рассмотрим некоторые философские аспекты методологии моделирования.

**Об общем понятии модели.** Проанализируем ряд понятий о модели. В. А. Штофф [1966] под моделью понимает «мысленно воспроизводимую ту или иную часть действительности в упрощенной (схематизированной или идеализированной) и наглядной форме». В узком смысле термин «модель» понимают тогда, когда хотят изобразить одну область явлений с помощью другой, более изученной и привычной. В таком случае понятие модели сливается с представлением о физической аналогии как о сходстве систем, состоящих из элементов разной физической природы, но обладающих одинаковой структурой. Такие модели называются моделями-аналогами или просто аналогами.

Любой объект, который имеет черты сходства и различия с другим объектом, можно рассматривать в качестве его модели. Необходимо лишь фиксирование сравниваемых предметов. Формы сходства обобщаются в процессе развития науки. Заранее нельзя полагать, что данный предмет не будет моделью другого. Всеобъемлющее понятие модели еще не свидетельствует о том, что степень соответствия модели прототипу, степень замещения ее прототипом не оказывают влияния на ценность получаемой информации [Горелов и др., 1976].

А. Н. Кочерин [1969] определяет модели в роли «заместителей объекта исследований, находящихся с последним в таком сходстве (или соответствии), которое позволяет получить новое знание об этом объекте». Специфика такого заместителя, характер, полнота сходства модели и прототипа могут быть различными. За основу методологического анализа принимается один тип моделей, а другие обобщаются в соответствии с требованиями,

предъявляемыми к данному типу. По В. А. Веникову [1949], явления подобны в том случае, когда по величинам, их характеризующим, можно составить суждения о параметрах любого другого подобного явления. В технических науках модели строятся исследователями. Но применение моделирования в таких слабоформализованных областях знаний, как геология и почвоведение, привело к дальнейшему обобщению самого понятия модели. Так, в геологии получил распространение термин «натурная модель» [Розовский, 1969; Ходжибаев, Самойленко, 1976].

**Модель и аналогия. Метод подобия.** Логический перевод информации с модели на оригинал основывается на объективном соответствии модели и оригинала. Это отвечает принципам материального единства мира. В зависимости от целей исследования данное положение конкретизируется: используются те или иные свойства и отношения почв орошаемого массива, выступающего в качестве модели почв другого орошаемого массива.

Понятие моделирования предполагает существование двух объектов—модели и прототипа. Исследование одного из них дает возможность делать выводы о другом. По А. И. Уемову [1971], логическими основаниями метода моделирования могут служить любые умозаключения, в которых посылки относятся к одному объекту, а заключения — к другому. Такие умозаключения охватывают весь класс традиционных выводов по аналогии. Перенос информации с модели на прототип будет выводом по аналогии. Единство логических основ различных видов моделирования является необходимым условием единства их методов. Видимо, несходство моделей нужно искать не в коренном отличии их логических основ, а в различии выполняемых ими эвристических функций. В натуральных моделях информации присущ больший содержательный аспект, чем в технических моделях, где информация имеет функционально-организационный характер. В технических моделях внутренняя среда состоит из элементов, законы поведения которых известны, однако проследить взаимодействие этих элементов невозможно.

При моделировании используются различные уровни аналогии между моделью и объектом. Но не всякая аналогия означает моделирование. Аналогия помогает конструированию моделей. А. И. Уемов [1971] обосновал достоверность различных типов выводов по аналогии. Аналог может стать моделью тогда, когда будет определена конкретная форма вывода по аналогии от модели к оригиналу. Это определяется характером тех оснований, которые делают такой перенос возможным. Очевидно, логическим основанием любого вида моделирования остаются выводы по аналогии.

Издавна используются модели, основанные на геометрическом подобии объектов. Дифференциальное исчисление открыло пути изучения широкого класса явлений окружающей среды. Идея подобия приобрела научно-теоретический характер, став классиче-

ской базой моделирования. Первое практическое использование «доказательная аналогия» нашла в теории подобия, в которой «вывод о тождестве некоторого отношения (иного свойства) в сравнимых системах делается на основании тождества другого отношения в тех же системах» [Уемов, 1971].

Обобщения теории подобия при решении задач моделирования электрических систем проведены В. А. Вениковым [1966]. В. М. Брейтман (цит. по [Горелов и др., 1976]) разработал теорию моделирования (или интегрального подобия), которой устанавливаются отношения между функциями процесса, однако без выявления соотношения между его текущими параметрами в модели и оригинале. Л. Б. Розовским [1969] создана теория натурального подобия для природных комплексов и на ее основе прогнозированы геологические явления. При этом использованы достижения кибернетики — теории распознавания образов.

Благотворное влияние теории подобия сказалось на превращении метода моделирования в надежный технико-экспериментальный метод, на развитии других способов «доказательной аналогии».

**О понятии почвенной модели.** В качестве натуральных моделей для почвенных прогнозов нами берутся почвы (и происходящие в них процессы) орошаемых полей в пределах бассейнов рек или коллекторов. Признаки почвенного подобия представляются в виде чисел — критериев подобия. Это одно из основных условий использования натуральных моделей. Без нахождения критериев почвенного подобия невозможно применение в почвоведении теории натурального подобия, а само натурное моделирование во многих случаях потеряет смысл.

«Безразмерные числа (критерии подобия) отражают взаимодействие сил и процессов, составляющих существо, или базу, явления. Критерии почвенного подобия — это не просто отвлеченные числа, а числа, сохраняющие постоянство у подобных явлений» [Седов, 1977]. Равенство критериев почвенного подобия указывает на то, что при всех возможных изменениях природной и хозяйственной деятельности человека характер взаимодействия их внутренних сил и сторон остается в почвах тем же. Так, например, равенство критериев естественной дренированности означает, что в почвах двух сравниваемых подобных орошаемых массивов соотношение суммарных объемов притока и оттока грунтовых вод остается неизменным на всех этапах процесса.

Натурные модели связаны с подобными им объектами коэффициентами пропорциональности, близкими к единице. Это их важное преимущество. Однако не все считают моделированием воспроизведение прогнозируемого объекта или процесса в натурную величину. Исследование натуральных моделей многими воспринимается как отказ от моделирования. Выступая в защиту натурального моделирования, Л. Б. Розовский [1969] доказывал, что природные объекты имеют те же основания для применения к ним

теории подобия, как и физические объекты. Он обосновывал возможность применения в геологии теории натурального подобия, считая, что геологическое подобие как раз и является приближенным. «Природные тела — натурная модель и объект прогноза — имеют между собой некоторые различия, которые и приходится учитывать в прогнозе. Они не совершенно одинаковы, хотя и коэффициент пропорциональности у них равен или близок к единице» [Розовский; 1969, с. 28].

Предложенный Л. Б. Розовским, С. Ф. Аверьяновым термин «натурное моделирование» не вызвал возражений со стороны специалистов по теории подобия и моделирования. В. А. Веников [1966] натурное моделирование признал уже в качестве особого типа.

В мелиоративном почвоведении также имеются попытки конкретного применения теории подобия для прогнозирования водно-солевого режима почв. Так, А. А. Мустафаев, Г. К. Асланов и др. [1976] решают задачу почвенных прогнозов в лабораторных условиях, обеспечивающих соблюдение физического моделирования исследуемого процесса. Физическая модель процесса растворения и вымыва солей из почв ими описывается уравнением конвективной диффузии С. Ф. Аверьянова, имеющим вид

$$D \frac{d^2c}{dy^2} - V \frac{dc}{dy} + \gamma(c_0 - c) = n \frac{dc}{dt}, \quad (2)$$

где  $c=c(y, t)$  — концентрация солей на глубине  $y$  в момент времени  $t$ ;  $D$  — коэффициент конвективной диффузии;  $V$  — скорость движения воды в порах почво-грунтов;  $n$  — пористость почво-грунтов;  $\gamma$  — коэффициент растворения солей;  $c_0$  — концентрация насыщения.

Согласно теории подобия процесс, описываемый уравнением (2), будет подобным в натуре и в модели, если все величины, участвующие в нем, в обоих условиях будут находиться в постоянном числовом соотношении. Существо задачи о законах моделирования сводится к установлению безразмерных критериев подобия (масштабных множителей) для данного процесса. Эти критерии при наличии уравнения процесса устанавливаются исходя из метода «анализа уравнений». При введении в уравнение (2) масштабного множителя для всех участвующих в нем величин авторами получено три безразмерных критерия подобия:  $Pe$  — критерий Пекле;  $St$  — критерий Струхала;  $Ni$  — критерий растворения.

Моделирование процесса растворения и вымыва солей из почв в лаборатории требует выполнения постоянства установленных критериев физического подобия. В таком случае результаты лабораторных исследований можно перенести на натуру с помощью теории подобия.

### Условия подобия натуральных аналогов

**Общие представления.** Наибольшую трудность в исследовании почвенно-мелиоративных процессов при помощи теории подобия представляет выбор орошаемого массива, который мог бы служить аналогом для осваиваемого под орошение другого массива, т. е. объекту прогноза. Решение указанной задачи связано с выявлением объективных характеристик подобия сравниваемых объектов.

Теория натурального подобия позволяет количественно оценить подобие сравниваемых орошаемых массивов. Базой для этой теории служат три теоремы физического подобия, имеющие универсальный характер. Теоремы подобия выведены «для самого общего явления природы» [Кирпичев, 1953]. Почвенные процессы — составная часть общих явлений природы, и в них нет никаких черт, которые могли бы исключить применение к ним теории физического подобия.

**Первая теорема подобия.** Она дает понятие о критериях подобия и утверждает, что у подобных явлений безразмерные комплексы величин, отражающие связи между существенными характеристиками явления, соответственно равны [Кирпичев, 1953; Розовский, 1969]. Равенство критериев подобия — необходимое условие существования признаков, входящих в определение подобия. Теорема утверждает, что подобные явления имеют одинаковые критерии подобия. В общем виде первая теорема формулируется следующим образом: если явления, определяемые дифференциальными уравнениями и условиями однозначности, образуют группу подобных явлений, то величины, входящие в определяющие дифференциальные уравнения, должны образовывать комплексы, сохраняющие одно и то же числовое значение для заданных явлений [Кирпичев, Конаков, 1949].

Первая теорема, вскрывая необходимые признаки подобия, дает ответ на вопрос: какие измерения необходимы в опыте для того, чтобы исследования единичного явления можно было перенести на всю группу подобных ему явлений? Оказывается, для этого надо измерить те величины, из которых составлены критерии подобия.

Записав в виде критериев почвенного подобия процессы в пределах орошаемых массивов, можно характеризовать уже не единичные их проявления, а группу (процессы, происходящие в почвах других орошаемых массивов), т. е. все почвенные явления, подобные один другому. Пусть имеем  $\pi = k$ , где  $\pi$  — критерий подобия,  $k$  — определенное число. Данное равенство соответствует различным почвенным условиям для разных орошаемых массивов со всевозможными численными значениями. Оно утверждает, что при всем разнообразии чисел определенные их комбинации (критерии подобия) подчинены соотношению, выраженному в данном равенстве. Поскольку таких комбинаций много, то

устанавливается связь между разнообразными почвенными явлениями, которые, однако, должны принадлежать к одному типу, т. е. быть подобными.

Таким образом, установив эмпирически зависимость  $\pi = k$ , получим право переносить результаты почвенных явлений с одного орошаемого массива на другой. У подобных почвенных явлений некоторые характеристики совпадают (инварианты), другие изменяются согласованно (коварианты), третьи не совпадают и изменяются несогласованно (моноварианты). Сходство критериев почвенного подобия (инвариантов и ковариантов) означает подобие почв и почвенных процессов.

**Вторая теорема подобия.** Вопрос о связи между критериями рассматривается во второй теореме подобия, в так называемой  $\pi$ -теореме: «Функциональная зависимость между характеризующими процесс величинами может быть представлена в виде зависимости между составленными из них критериями подобия» [Уемов, 1971]. Такие уравнения являются прогнозными.

Критерии подобия обычно определяются из исходного уравнения, но можно обойтись и без него. Для этого надо ограничиться лишь утверждением о существовании некоторой функциональной связи между величинами. В этом случае критерии подобия определяются при помощи теории размерности. Так, имея функциональную связь (1), которая отражает почвенно-мелиоративный процесс в орошаемом массиве-аналоге, можно при помощи теории размерности определить критерии подобия в прогнозируемом подобном ему объекте. Для установления правомерности вывода по аналогии требуется определение внутреннего характера отношений, т. е. необходима взаимосвязь всех явлений сравниваемых объектов.

**Третья теорема подобия** дает ответ на вопросы: как при наименьшем количестве признаков подобия объекта распознать его подобие аналогу? каковы необходимые и достаточные признаки подобия?

Согласно третьей теореме, подобными могут быть те явления, которые протекают в геометрически подобных системах, подчиняются одним и тем же уравнениям связи (т. е. качественно одинаковы), условия однозначности (моноваленты) которых находятся в численно постоянном отношении, а составленные из них критерии подобия равны [Кирпичев, 1953, с. 48].

Под условиями однозначности понимают комплекс условий, удовлетворение которого делает возможным выделение из целого класса явлений какого-либо единичного явления. А. Б. Резняков [1959] включает в комплекс однозначности факторы: 1) физические, 2) пространственные, 3) временные, начальные и условия монокронности (равенство соответствующих отрезков времени), 4) взаимодействия с окружающей средой (граничные, краевые условия).

Для почв указанные выше условия однозначности могут быть соответственно переосмыслены следующим образом:

1) генетические свойства почв, подстилающих пород, рельефа, грунтовых вод; биоклиматические условия; характер ирригационно-мелиоративного использования почв;

2) структура почвенного и растительного покрова, а также грунтовых вод (естественные и искусственные потоки) и горных пород; комплексы и сочетания почв;

3) история развития почв, растительности и грунтовых вод; история ирригационно-мелиоративного и сельскохозяйственного освоения территорий; фиксированные во времени изменения в свойствах почв, пород, грунтовых вод; продолжительность процесса или явления, характеризующего формирование почв, растительности, грунтовых вод, хозяйственную деятельность человека;

4) условия взаимодействия почв (или их составляющих) с грунтовыми, атмосферными, оросительными и промывными водами; влияние на почвы различных способов обработки, улучшения, использования в сельском хозяйстве; связь солепроявления в почвах с поверхностными и грунтовыми водами, с факторами ирригационно-мелиоративного освоения.

---

## **НАХОЖДЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОЧВЕННОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАННОГО ИЗУЧЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИРРИГАЦИОННО-МЕЛИОРАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ**

### **Программа конструктивных исследований для нахождения критериев почвенного подобия**

**Постановка проблемы.** Не так давно программа почвенно-мелиоративного проектирования требовала всестороннего анализа объектов освоения. Тщательно изучались рельеф, почвы, горные породы, грунтовые воды. Но они не рассматривались во взаимосвязи. Лишь позднее эти программы стали комплексными. Они предполагали изучение ландшафтообразующих факторов в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности.

В последние годы широко используется конструктивный метод оценки и прогноза ирригационно-мелиоративных условий. Если раньше изучались взаимосвязанные явления (климат, растительность, горные породы, грунтовые воды), то конструктивный анализ выявляет ведущий почвенно-мелиоративный процесс, которому подчиняются другие важные процессы. Комплексные программы преследовали цель — полно и в генетической взаимосвязи изучить процессы на мелиорируемых массивах. В наши дни возникла необходимость составлять и разрабатывать программу конструктивных ирригационно-мелиоративных исследований. Эта программа включает не только анализ массива вообще (на основе учета всех факторов), но и составление определенных конструкторов, схем, моделей, выполненных приближенно по уже известным аналогам. В нее закладывается решение задач (конструкторов) в нескольких вариантах.

При конструктивном решении научные задачи программируются таким образом, чтобы можно было легко и просто отыскать те составляющие, которые войдут в разрабатываемый конструктор. Последний может быть составлен в виде математической, физической, физико-химической модели, балансовой формулы (учитывающей важнейшие составляющие приходной и расходной части влаго- и солепереноса почв и зоны аэрации), натурной модели (бассейна реки, орошаемой территории или массива предполагаемого орошения, стоковой площадки, опытно-производственного хозяйства).

В настоящей работе конструктивный анализ орошаемых или намечаемых к орошению территорий реализуется через предполагаемое нами изучение натуральных моделей — бассейнов малых и средних рек или коллекторов. Бассейновый ландшафтно-газогеохимический метод является составной частью науки о гео-

химических ландшафтах. Он использует все методы ландшафтной геохимии для сравнительной оценки орошаемых территорий. Однако в его основе лежат измерения объемов и качества поверхностных вод, которые позволяют косвенно судить о мелиоративном состоянии почвенного покрова бассейна и управлять им. Таким образом, поверхностный сток бассейна реки или коллектора как бы в фокусе отражает положение основных составляющих орошаемой части (рельефа, почв, грунтовых и оросительных вод, хозяйственную деятельность человека). По этой причине бассейновый метод мы считаем основой для применения методов натурального подобия, особенно для прогнозных целей.

Метод натуральных аналогов не ограничивается одной лишь констатацией сходства почв орошаемого массива с почвами аналогичной территории, которую необходимо орошать и на которую надо давать прогноз последствий ирригационно-мелиоративного освоения. Метод включает следующие этапы изучения территорий: 1) для прогнозируемого перспективного массива подбирается природный массив-аналог; 2) доказываем, что ныне орошаемый массив-аналог был до орошения и будет после орошения подобен прогнозируемому массиву-объекту; 3) разрабатываются способы перенесения важнейших мелиоративных параметров с массива-аналога на подобный ему массив-объект.

**Бассейновый метод** — аналитическая основа, связывающая отдельные факторы почвообразования в единое целое. Обнаруженная зависимость (1) минерализации и химического состава воды рек (коллекторов) от орошаемых площадей и их природно-мелиоративного состояния позволяет по известным параметрам минерализации и качества воды оценить современное состояние и дать прогноз возможного изменения почв для аналогичных орошаемых территорий. Если предположить, что водно-солевые процессы, протекающие в почвах орошаемых массивов, аналогичны по своим природным и историко-водохозяйственным характеристикам, то для оценочных и прогнозных целей в таких случаях целесообразно применение метода натуральных аналогов. Его использование нуждается в проведении ряда предварительных разработок. Прежде всего следует найти критерии почвенного подобия. Для этого применяют анализ размерностей [Леви, 1960; Седов, 1977; Розовский, 1969], который внедряется в почвенно-мелиоративную науку [Пачепская и др., 1977; Ходжибаев, Самойленко, 1976; Мустафаев, Асланов, 1976].

Оценка мелиоративного состояния территории обычно основывается на методах водно-солевого баланса. Однако бассейновый анализ раскрывает перед методом натуральных аналогов большие возможности, так как он включает в себя балансовые расчеты и, кроме того, имеет ряд преимуществ, например, системный, конструктивный подход при решении задач.

Через призму бассейнового анализа нами рассматриваются лишь наиболее изученные водно-солевые процессы, изложенные в работах А. Н. Костякова, В. А. Ковды, В. Р. Волобуева, Д. М. Кац, Н. М. Решеткиной, Н. Н. Ходжибаева. Опираясь на исследования Н. Н. Веригина [1953], С. Ф. Аверьянова [1956, 1963, 1978], И. П. Айдарова [1971], В. А. Барона [1971], Л. М. Рекса [1969, 1970], Н. И. Парфеновой [1971], Р. В. Савельевой [1971], Я. А. Пачепского и др. [1976], Ю. М. Денисова, А. И. Сергеева [1976], Д. Ф. Шульгина [1972], мы все же избрали направление, разрабатываемое В. Р. Волобуевым [1959, 1960, 1964, 1967, 1975] и В. А. Ковдой [1946, 1968, 1974].

В развитие этих идей предлагается дальнейшее совершенствование анализа опыта мелиоративного освоения засоленных почв и выявление на этой основе закономерных связей. Используются методы, разработанные В. Р. Волобуевым [1975]. Для сравнительной оценки динамики засоления аналогичных массивов им взят существенный критерий — изменение солевых запасов почв во времени. С этим критерием связаны другие важные показатели процесса улучшения земель.

Изменение степени засоления почв находится путем сопоставления фактических материалов повторных почвенных съемок опытных участков. Это позволило В. Р. Волобуеву обнаружить зависимость содержания солей в различных почвах ( $\Delta S$ ) от времени ( $t$ ); различия в свойствах почв, характере и степени их засоления отражены постоянным для каждой почвы угловым коэффициентом выщелачивания  $\beta$ ; размеры орошаемых площадей за время  $t$  остаются неизменными. Эти связи солепроявления с учетом времени выражены зависимостью вида

$$\Delta S = f(\beta, t). \quad (3)$$

Подобная же зависимость между солесодержанием в почвах и природных водах была найдена нами [Степанов, Чембарисов, 1978] другим путем. Минерализация и состав речной (коллекторной) воды зависят от количества вынесенных из почв (и пород) солей ( $\Delta M$ ) при орошении и промывках, а также от размеров орошаемых площадей ( $F_{op}$ ) и их геохимического состояния (степень и характер засоления, естественная дренированность, пористость почв и грунтов и т. п.). Последнее выражается угловым ландшафтно-геохимическим показателем  $a$ , который характеризует те же условия, что и коэффициент  $\beta$  В. Р. Волобуева. Предлагаемая нами зависимость имеет вид

$$\Delta M = F(a, F_{op} \Delta T). \quad (4)$$

Различие между уравнениями (3) и (4) заключается лишь в способах обнаружения входящих в них параметров. В. Р. Волобуев находит их посредством наблюдений за солевым состоянием почвенного покрова (повторные солевые съемки). Нами же предлагается определять галогеохимический режим террито-

рий через соли, вымываемые из почв и пород орошаемого массива поливными и промывными водами, которые постоянно фиксируются на гидрологических створах рек и коллекторов за определенный промежуток времени.

Вообще при ландшафтно-геохимических исследованиях более развита тенденция изучения территорий посредством анализа поверхностных и подземных вод. Б. Б. Польшов [1956] предложил определять скорость выноса солей из почв, сравнивая их количество в промываемой толще и в речной воде. Эта идея была развита А. И. Перельманом [1975]. Он предложил расчетную формулу выноса химических элементов из почв и пород природными водами и ввел понятие о коэффициенте водной миграции. Ряд показателей, характеризующих галогеохимическую обстановку местности через поверхностные и грунтовые воды, предложен В. А. Ковдой, М. А. Глазовской, В. Р. Волобуевым, Д. М. Кац, Н. М. Решеткиной, П. С. Паниным.

Для бассейнового анализа с этих позиций представляют интерес предложения В. А. Ковды [1974] по оценке хода мелиоративного процесса через индекс водно-солевого баланса  $WSB$ . Последний находится через отношение критической минерализации грунтовых вод к минерализации поливной воды.

Для многих оросительных систем трудоемко прямое определение этих величин, поэтому для их нахождения нами предлагается использовать бассейновый метод. Последний позволяет обнаружить качество поливной воды через величину  $M_{\text{н}}$  — минерализацию речной (или коллекторной) воды выше орошаемого массива, а состав грунтовых вод через  $M_{\text{з}}$  — минерализацию той же речной (или коллекторной) воды в замыкающем створе, т. е. ниже орошаемого массива. Имеются предположения [Макаренко, 1950], что речной сток на малых и средних водосбросах в определенные месяцы отражает среднюю величину минерализации грунтовых вод бассейна или его орошаемой части. Если использовать наше предложение, то минерализация грунтовой воды и мелиоративный индекс В. А. Ковды будут характеризовать орошаемую территорию не только в точке, а шире — на массиве (средневзвешенное его состояние).

В. Р. Волобуев [1975, с. 8] отмечает, что показатель изменения солевого запаса  $\Delta S$  «наиболее лаконичен по своей форме, к какому бы большому массиву он ни относился», однако «использование его связано с определенными трудностями». К числу таких трудностей следует отнести ограниченность числа опытных станций, из анализа почвенного покрова которых можно было бы получить исходные для расчетов данные.

Сейчас существует не более двух-трех десятков опытных хозяйств, где с большой тщательностью проводились бы повторные почвенные и солевые съемки, материалы которых могли бы быть положены в основу теоретических построений. Поэтому в дальнейшем нами применяется методика В. Р. Волобуева, а в

качестве существенного критерия также используется изменение солевых запасов почв. Однако мы предлагаем расширить пределы исследований путем вовлечения в анализ большого числа объектов. Такими объектами являются различные по размерам реки и коллекторы, дренирующие различные по качеству почв орошаемые массивы и имеющие ряды многолетних достоверных наблюдений за объемами воды и ионным стоком на гидрологических створах.

В СССР хорошо поставлена служба наблюдений за стоком рек и коллекторов. Гидрологические створы часто располагаются выше и ниже орошаемых массивов. Это позволяет существенный критерий — изменение солесодержания в почвах орошаемых массивов — определять не только путем прямых подсчетов при периодических почвенных съемках, но и контролировать его по солевому стоку дренирующих этот массив рек или коллекторов.

### **Нахождение критериев почвенного подобия**

**Общие положения.** Почвенные прогнозы желательно решать в виде последовательных задач.

1. Доказать подобие геометрически сходных территорий. Здесь критерии аналогичности — сходство геоморфологических условий, структуры почвенного покрова, генезиса почвообразующих пород.

2. Доказать подобие обобщенных или специфических свойств почв, почвообразующих пород, грунтовых вод, степени дренированности территорий, характера мелиоративного освоения.

3. Доказать подобие ведущих элементарных процессов почвообразования в естественных и мелиорируемых условиях (концентрация солей на определенных глубинах, скорость движения воды в порах почв и зоны аэрации, растворимость солей).

В настоящей работе исключено доказательство первой и третьей задачи и сделана попытка разработки методики почвенных прогнозов для второй задачи. Предполагается, что доказательства по первой и третьей задачам для отдельных территорий будут выполнены в другой работе.

**Условия применения бассейнового метода для нахождения критериев почвенного подобия.** Бассейновый метод позволяет моделировать почвенные процессы по кибернетическому принципу «черного ящика». Этот принцип требует знания лишь входных и выходных данных. Последними в бассейне реки или коллектора, где процессы сопряжены единством естественных потоков грунтовых и поверхностных вод, являются фактические сведения гидрологических створов, расположенных выше и ниже орошаемого массива. Здесь в качестве «черного ящика» выступает орошаемый массив с его почвами и сложными почвенно-мелиоративными процессами.

Преимущество предлагаемого метода в том, что, помимо статических запасов солей в почвах, периодически выявляемых почвенными съемками, учитывается ежедекадная, ежемесячная, сезонная и годовая динамика качества и количества выносимых из орошаемых почв солей. Анализируется не просто миграция ионов в реке или коллекторе, а вынос солей с определенной площади, т. е. с территории, имеющей известные размеры, состав и структуру почвенного покрова, характер зоны аэрации и грунтовых вод. Введение в расчеты размеров орошаемых площадей  $F_{ор}$ , по мнению автора, должно расширить аналитические возможности построений В. Р. Волобуева. Поэтому обоснованию применения  $F_{ор}$  в данной работе уделено особое внимание. Для этой цели, согласно нашим представлениям, составлено уравнение связи, в которое входит орошаемая площадь:

$$\Delta M = M_s - M_n = F(a, F_{эф}\Delta T), \quad (5)$$

где  $\Delta M$  — изменение минерализации речной (коллекторной) воды, г/л, за счет ввода новых площадей орошаемых почв и изменения водохозяйственной деятельности человека;  $M_s$  — минерализация воды на замыкающем створе, г/л;  $M_n$  — минерализация воды в начальном створе, г/л;  $a$  — интегральный ландшафтно-геохимический показатель, учитывающий также определенные типы засоления почв: хлоридно-сульфатного, сульфатного, хлоридного, содового и др.;  $\Delta T$  — время, за которое произошло изменение минерализации;  $F_{эф}$  — часть орошаемой площади, м<sup>2</sup>, с ирригационной сетью и водохозяйственными объектами, активно и регулярно участвующая в подпитывании инфильтрационными водами естественных потоков грунтовых вод и образующая своеобразную водонасыщенную почвенно-грунтовую толщу.

В результате инфильтрации поливных вод на орошаемых площадях ( $F_{эф}$ ) оросительные и грунтовые воды смыкаются, а затем единым потоком движутся по уклону к руслу реки (коллектора). Эффективную орошаемую площадь можно рассматривать объемно, выразив ее через  $V_{эф}$  следующим образом:

$$V_{эф} = F_{эф} H_T \mu, \quad (6)$$

где  $F_{эф}$  — эффективная орошаемая площадь;  $H_T$  — мощность водонасыщенной толщи, определяемая мелиоративным состоянием территории и глубиной вреза коллекторно-дренажной сети и мощностью зоны аэрации;  $\mu$  — коэффициент пористости.

Исходя из уравнения (6) запишем формулу (5) с учетом объема орошаемой площади в виде зависимости

$$\Delta M = F(a, V_{эф}, \Delta T). \quad (7)$$

Это позволит проводить расчеты не только по плоскости поливаемой площади, но и по объему почв и зоны аэрации, испытавших в той или иной мере влияние поливных и грунтовых вод.

**Химический состав воды** — показатель состояния почв орошаемых массивов бассейнов рек и коллекторов. В основу бассейнового анализа положены два положения.

1. Почвенный фактор формирует химический состав дренирующих его водных потоков — рек, коллекторов, каналов [Вернадский, 1965; Полюнов, 1956; Ковда, 1974].

2. Особенности гидрологического режима рек и коллекторов обусловлены преимущественно свойствами и структурой почвенного покрова и зоны аэрации [Львович, 1974; Апполов, 1952; Кац, 1967; Ходжибаев, 1970]. Исходя из этих положений, величину солевого стока любых почвенных ареалов можно определить на наблюдаемых пунктах рек и коллекторов (пересекающих этот ареал) по минерализации и объему жидкого стока в заданные интервалы времени года. Если в начальном створе (перед орошаемым массивом) минерализация воды равна  $M_n$ , а ее расход —  $Q_n$ , то солевой сток  $\Delta S_n$  за время  $\Delta T$  рассчитывается по формуле

$$S_n = M_n Q_n \Delta T, \quad (8)$$

Для замыкающего створа солевой сток  $S_s$  за время  $\Delta T$  при минерализации  $M_s$ , расходе  $Q_s$  будет рассчитываться так:

$$\Delta S_s = M_s Q_s \Delta T.$$

Исходя из (8, 9), уравнение (7) можно записать в следующем виде:

$$(M_s \cdot Q_s - M_n \cdot Q_n) \cdot \Delta T = S_s - S_n = \Delta S, \quad (10)$$

$$\Delta S = F(a, V_{эф}, \Delta T),$$

где  $S_n$  — количество солей в воде, проходящей через начальный створ коллектора;  $S_s$  — количество солей в воде, проходящей через замыкающий створ коллектора;  $\Delta S$  — суммарный вынос солей стоком коллекторных вод с определенного объема эффективной орошаемой площади ( $V_{эф}$ ) за время  $\Delta T$ .

**Нахождение параметров по солевому режиму почв.** В. А. Ковда и Г. В. Захарьина [1969] под солевым режимом понимают «периодические процессы передвижения и накопления легкорастворимых солей в почве под влиянием смены метеорологических условий, а также орошения». Солевой режим определяется коэффициентом сезонной аккумуляции. Он представляет собой частное от деления осенних запасов солей в определенной толще почвы на весенние. Этот коэффициент дает возможность использовать безразмерные параметры для оценки солевого режима почв.

При бассейновом анализе территории мелиоративное состояние почв оценивается показателем  $a$ . Являясь интегральной величиной, он учитывает суммарный вынос солей из почв, пород и грунтовых вод.

Солевой состав почво-грунтов зоны аэрации находится в тесной взаимосвязи с изменением уровня и качества грунтовых вод. Поливные и промывные воды, выщелачивая в ходе инфильтрации соли зоны аэрации, транспортируют их в грунтовые воды. Последние увлекают эти соли при капиллярном поднятии в зону аэрации и обуславливают их накопление, т. е. вторичное засоление почв. Динамика солей в зоне аэрации и грунтовых вод не только взаимосвязана, но и объясняется одними и теми же физико-химическими процессами: катионным обменом, растворением (и осадкой) солей, перемещением их посредством фильтрации и конвективной диффузии. Как показывают исследования [Вольфцун, 1972; Кац, 1967], режим солей в зоне аэрации и грунтовых вод удовлетворительно аппроксимируется суммой этих факторов. Эффект прочих факторов (термо- и молекулярная диффузия и осмос, электрокинез) формально учитывается обобщенным параметром коэффициента конвективной диффузии.

Многочисленные исследования [Барон, 1971; Веригин, 1953; Аверьянов, 1965; Минашина, 1972; Пачепский и др., 1976; Рекс, 1969; Соколенко и др., 1976; Шестаков, 1963] позволили описать процессы переноса вещества в пористых средах математическими моделями конвективной диффузии.

Н. Н. Ходжибаев, В. Г. Самойленко [1976] указывают, что теория конвективной диффузии остается пока наиболее распространенным аппаратом количественного описания гидрохимических процессов на орошаемых землях. Однако существующие уравнения не в состоянии охарактеризовать генетические закономерности процессов соленакопления и, следовательно, не позволяют наметить длительных мер по их предупреждению. Поэтому важным инструментом генетического анализа и прогноза галогеохимического процесса на орошаемых землях остается метод солевого баланса.

Для составления критериального уравнения необходимо выявить наиболее важные факторы, влияющие на исследуемый процесс. Поэтому для выбора параметров взяты уравнения водно-солевого баланса. В основе составления балансов земель должны лежать надежные данные, характеризующие существующие водный и солевой режимы. Для составления критериального уравнения на базе функции (10), включающей ландшафтно-геохимический показатель  $a$ , будем опираться на солевой баланс, предложенный Д. М. Кацем [1967]. Он предусматривает необходимость совместного и взаимосвязанного рассмотрения общего солевого баланса массива (11), солевых балансов зоны аэрации (12) и грунтовых вод (13) за время  $\Delta T$ :

$$\Delta S^{\text{об}} = S_a A + S_n B \pm g_{\text{пз}} - S_{\text{им}} + S_{\text{уд}} - S_{\text{ур}} - S_{\text{др}}, \quad (11)$$

$$\Delta C^a = S_a A + S_n B + S_{\text{им}} + S_{\text{уд}} - S_{\text{ур}} - g_f (f_a + f_n) + g_{\text{гр}} (Z_{\text{гр}} + e Z_{\text{гр}}), \quad (12)$$

$$\Delta g^{rp} = \pm g_{пз} - g_{гp}d + g_id + g_f(f_a - f_n) - g_{гp}(Z_{гp} \pm eZ_{гp}), \quad (13)$$

где  $\Delta S^{об}$ ,  $\Delta C^a$ ,  $\Delta g^{rp}$  — изменение запасов воднорастворимых солей соответственно массива в целом ( $\Delta S^{об}$ ), отдельно для зоны аэрации ( $\Delta C^a$ ) и грунтовых вод ( $\Delta g^{rp}$ );  $S_aA$ ,  $S_nB$  — поступление солей в почву с осадками  $A$  и поливными водами  $B$  при соответствующих концентрациях солей ( $C_a$ ,  $C_n$ );  $S_{им}$ ,  $S_{уд}$ ,  $S_{ур}$  — поступление в почву массивов солей импультверизацией ( $S_{им}$ ), с удобрениями ( $S_{уд}$ ) и урожаем ( $S_{ур}$ );  $g_{пз}$  — поступление солей в почву и вынос их из почв горизонтальной и вертикальной составляющими грунтового потока;  $S_{др} = g_{гp}d$  — вынос солей из почв дренажным стоком;  $g_f$  — минерализация вод, оттекающих из зоны аэрации в грунтовые воды;  $g_{гp}$  — минерализация грунтовой воды в период расходования ее на испарение и транспирацию.

Применительно к уравнению (1), описывающему ландшафтно-галогеохимическое состояние территории, приведенные выше балансы (11) — (13) можно записать в следующем виде:

$$a = f(\Delta S^{об}, \Delta C^a, \Delta g^{rp}). \quad (14)$$

Затруднения, встречающиеся при выводе критериев подобия для многофакторных почвенно-мелиоративных процессов, связаны со сложным характером различных факторов и с трудностями выявления их взаимодействия в достаточно конкретной форме. Трудности могут быть преодолены в результате применения бассейнового ландшафтно-галогеохимического метода анализа территории. Последний предполагает использование показателей гидрохимического режима. Поэтому прежде чем составить критериальное уравнение, желательно рассмотреть взаимообусловленность всех основных почвенно-мелиоративных факторов.

На рис. 1 показана структурная схема, т. е. диаграмма взаимодействия факторов, участвующих в процессе изменения почвенно-солевого и гидрохимического режимов водотока. В схеме также определено влияние хозяйственной деятельности человека.

Все эти факторы при взаимодействии определяют ту или иную интенсивность изменения гидрохимического режима водотока. При анализе фактического материала было выявлено, что решающее влияние на  $\Delta S$  оказывают следующие девять факторов:  $g_n$ ,  $g_k$ ,  $C_n$ ,  $\Delta C$ ,  $B$ ,  $V_{эф}$ , КЗИ,  $D$ ,  $a^1$ , в меньшей степени  $S_aA$ ,  $S_nB$ . Влияние же  $g_{пз}$ ,  $g_{гp}$ ,  $S_{им}$ ,  $S_{уд}$ ,  $S_{ур}$  маскируется воздействием более сильных факторов.

На рис. 1 стрелками отмечен характер связи между факторами. Так, по характеру связи и по влиянию на результаты процесса выделяются факторы нескольких типов: инварианты (факторы, действующие однозначно и односторонне), коварианты (факторы, испытывающие обратную взаимодозначную

<sup>1</sup>  $a$  — геометрическая форма изучаемой территории.

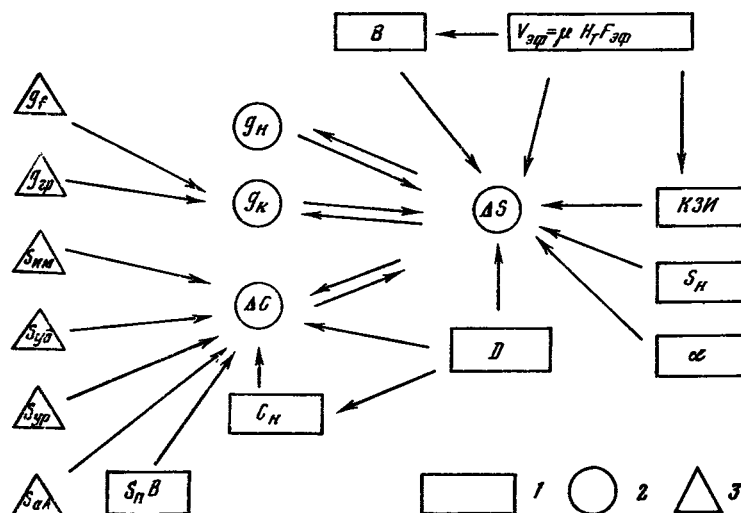


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия природно-мелиоративных факторов, участвующих в изменении гидрохимического режима водотока

1 — инварианты; 2 — коварианты; 3 — моноварианты.  $\Delta S$  — показатель изменения гидрохимического режима водотока;  $g_n$  — исходное содержание солей в грунтовых водах, г/л;  $g_k$  — содержание солей в грунтовых водах к концу расчетного периода, г/л;  $C_n$  — исходное содержание солей в почве или в зоне аэрации, г/м<sup>2</sup>;  $\Delta C$  — изменение в содержании солей в почве или в зоне аэрации, г/м<sup>2</sup>;  $D$  — дренированность территории;  $B$  — водоподача на орошаемую площадь, м<sup>3</sup>;  $KЗИ$  — коэффициент земельного использования;  $S_n$  — начальная минерализация водотока;  $g_f$  — минерализация вод, оттекающих из зоны аэрации в грунтовые воды, г/л;  $g_{гр}$  — минерализация грунтовой воды в период расходования ее на испарение, г/л;  $S_{им}$ ,  $S_{уд}$ ,  $S_{ур}$  — поступление, вынос солей «импульверизацией», с удобрениями и урожаем (г/м<sup>2</sup>);  $S_{дA}$ ,  $S_{дB}$  — поступление солей (г/м<sup>2</sup>) с осадками  $A$  и поливными водами  $B$  при  $C_A$ ,  $C_B$  — соответствующих концентрациях солей;  $V_{эф}$  — объем эффективно орошаемой площади, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — геометрическая форма орошаемого массива.

связь) и моноварианты (факторы, не связанные с результатом действия процесса согласованными изменениями). Из величин, представляющих инварианты и коварианты, группируются критерии подобия. В критерии подобия не входят величины, представляющие моноварианты, хотя они могут участвовать в процессе [Розовский, 1969].

Исходя из всего изложенного, изменение гидрохимического режима водотока в связи с направленным мелиоративным воздействием можно представить в виде следующей функции:

$$\Delta S = f(g_n, g_k, \Delta C, C_n, D, B, S_n, V_{эф}, KЗИ, \alpha). \quad (15)$$

**Применение анализа размерностей для нахождения безразмерных параметров.** Из уравнения (15) следует, что анализ раз-

вития почв орошаемых массивов бассейновым методом предполагает нахождение связей между большим числом параметров. Для отыскания зависимостей между этими параметрами целесообразно применение методов теории размерности. При этом в процессе решения уравнений, основанных на теории размерностей, из исходных параметров формируются новые безразмерные параметры (или безразмерные комплексы).

*Первичные и вторичные величины.* Отметим, что в функциональном соотношении (15) аргументы распадаются на две группы в зависимости от способа, которыми эти числа получены фактически. Первую группу количеств называют первичными, или основными. Это те величины, «...которые соответственно специальным правилам операций, сопрягающим числа с явлениями, рассматриваются как основные и обладают несводимой более степенью простоты» [Бриджмэн, 1934].

В качестве первичных величин приняты масса, длина и время. Первичными количествами являются параметры вододачи ( $B, m$ ), промываемая толща ( $H_T$ ) и орошаемая площадь ( $F_{\text{эф}}, m^2$ ).

Кроме первичных, существует другая группа величин, которые называются вторичными. Они измеряются посредством промеров некоторых первичных величин, связанных с рассматриваемыми, согласно правилам, дающим число, определяемое как мера данной вторичной величины. Например, содержание солей в почве или в зоне аэрации ( $C$ ) определяется как вторичная величина. Мы получаем ее мзру, измеряя массу и площадь (т. е. две первичные величины) и разделив массу на площадь.

Нами рассматриваются только такие параметры, которые могут быть выражены через единицы массы и длины. Ниже все единицы измерения, входящие в размерность параметров функциональной зависимости, выражаются через основные величины. Например, минерализацию грунтовой воды  $g$ , которая измеряется в граммах на литр, представим как  $g \text{ г/л} = 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ; поливную норму  $B \text{ м}^3/\text{га}$  представим как  $B \text{ м}^3/\text{га} = 10^{-4} B \text{ м}^3/\text{м}^2 = 10^{-4} B \text{ м}$ .

Постоянный коэффициент, возникший при пересчете единиц измерения, в дальнейшем рассмотрении заменяется на единицу (например, коэффициент, возникший при пересчете единиц измерения поливной нормы  $10^{-4}$ ).

*Принцип однородности.* Свойство физических уравнений, дающее возможность выражать все члены уравнения посредством одной и той же системы единиц измерения, лежит в основе теории размерностей. Это — свойство однородности.

Впервые условия однородности сформулированы Ж. Фурье: «Принцип однородности требует, чтобы все величины, входящие в физическое уравнение, выражались в одной и той же системе единиц измерения; при соблюдении этого условия размерность всех членов уравнения одинакова и оно остается справедливым

при любой избранной системе основных единиц измерения» (цит. по И. И. Леви [1960]).

Условию однородности должны подчиняться все физические закономерности, в том числе и еще неизвестные. Исходя из принципа однородности, можно установить вид зависимости изучаемого процесса, если выявить факторы, влияющие на данный процесс, и те величины, которые должны входить в искомую зависимость.

Л. И. Седов [1977] отмечает, что наиболее существенные результаты могут быть получены путем комбинирования выводов теории размерности с общезначимыми предположениями, вытекающими из результатов исследований, которые должны установить сущность изучаемого явления. И. И. Леви [1960] указывает на основную трудность в применении методов теории размерности; она заключается в необходимости глубокого физического анализа явлений.

*Формула размерности.* На операции, посредством которых вторичные величины могут быть измерены через первичные, налагаются определенные ограничения. Эти ограничения формулируются П. В. Бриджмэном [1934], как «абсолютное значение относительной величины». Согласно данному требованию отношение между двумя заданными величинами остается неизменным независимо от масштабов основных единиц измерения. Например, если имеются отношения между площадями орошаемых массивов, то эти отношения не зависят от масштаба значений основных единиц измерения. Рассмотрим это ограничение аналитически [Бриджмэн, 1934; Леви, 1960].

Обозначим первичные величины, при помощи которых измеряются вторичные, через  $x, y, z$  и т. д. Тогда вторичные величины будут представлять некоторую функцию  $f(x, y, z \dots)$ . Предположим, что имеем две одноименные величины, выражаемые функцией  $f$ . Обозначим первую через  $f_1(x_1, y_1, z_1 \dots)$ , а вторую через  $f_2(x_2, y_2, z_2 \dots)$ . Рассмотрим отношение между двумя одноименными величинами, выраженными функцией  $f$ . Изменим размер основных единиц. Величины  $x$  уменьшим в  $\alpha$  раз,  $y$  — в  $\beta$ ,  $z$  — в  $\gamma$  раз и т. д. Числа, измеряющие вторичные величины, теперь соответственно изменяются; мы можем записать их в следующем виде:

$$f_1 = f(\alpha x_1, \beta y_1, \gamma z_1 \dots),$$

$$f_2 = f(\alpha x_2, \beta y_2, \gamma z_2 \dots).$$

Требование абсолютного значения относительной величины аналитически выразится следующим образом:

$$\frac{f(x_1, y_1, z_1 \dots)}{f(x_2, y_2, z_2 \dots)} = \frac{f(\alpha x_1, \beta y_1, \gamma z_1 \dots)}{f(\alpha x_2, \beta y_2, \gamma z_2 \dots)}. \quad (16)$$

Это отношение справедливо для любых значений  $x, y, z$  и  $\alpha, \beta, \gamma$ .

Найдем вид неизвестной функции  $f$ . Для этого перепишем предшествующую формулу (16) в следующем виде:

$$f(\alpha x_1, \beta y_1, \gamma z_1 \dots) = f(\alpha x_2, \beta y_2, \gamma z_2 \dots) \frac{f(x_1, y_1, z_1 \dots)}{f(x_2, y_2, z_2 \dots)}. \quad (17)$$

Дифференцируя по  $\alpha$  и обозначая через  $f'$  частичную производную относительно первого аргумента, затем второго, третьего и т. д., будем иметь

$$x_1 f'(\alpha x_1, \beta y_1, \gamma z_1 \dots) = x_2 f'(\alpha x_2, \beta y_2, \gamma z_2 \dots) \frac{f(x_1, y_1, z_1 \dots)}{f(x_2, y_2, z_2 \dots)}.$$

Примем значения  $\alpha, \beta, \gamma$  и т. д. равными единице. Тогда

$$x_1 \frac{f'(x_1, y_1, z_1 \dots)}{f(x_1, y_1, z_1 \dots)} = x_2 \frac{f'(x_2, y_2, z_2 \dots)}{f(x_2, y_2, z_2 \dots)}. \quad (18)$$

Эта формула (18) должна выполняться для любых значений  $x, y, z$  и т. д. Следовательно, ее можно записать в более общем виде, полагая  $x, y, z$  и т. д. переменными величинами. Считая  $f'$  частной производной от  $f$  по  $x$ , приходим к следующему отношению:

$$\frac{x}{f} \frac{\partial f}{\partial x} = \text{const.} \quad (19)$$

Интегрируя выражение (19), получим

$$f = C_1 x^{\text{const}}, \quad (20)$$

где  $C_1 = G(y, z, \dots)$ , так как  $f$  есть функция от  $x, y, z, \dots$

Этот прием можно повторить, считая переменными  $y, z$  и т. д., и получить аналогичный результат. Следовательно, общее решение должно иметь вид степенного комплекса

$$f = C x^a y^b z^c \dots, \quad (21)$$

где  $C$  — константа.

Исходя из всего изложенного, приходим к выводу, что каждая производная величина может быть выражена через первичные величины в некоторых степенях. По мнению П. В. Бриджмена [1934], «степенной показатель первичной величины по определению является «размерностью» вторичной величины в отношении данной первичной».

*π-теорема.* Напомним, что размерность параметра обозначается путем заключения его в квадратные скобки, например  $[F_{\text{эф}}]$ , вместо обозначения единиц массы подставляется буква  $M$ , а вместо единиц длины — буква  $L$ .

Для достоверного выбора параметров, определяющих сущность почвенно-мелиоративных процессов, оказалось целесообразным применение основного следствия теории размерности. Для использования  $\pi$ -теоремы определяются зависимые и независимые размерности.

Если имеется несколько параметров, характеризующих почвенные условия бассейна, а их размерности нельзя выразить через формулы остальных размерностей путем перемножения и деления, то в таких случаях указывают, что параметры имеют независимые размерности. Так, размерности орошаемой площади  $F_{\text{оф}}$  и содержания солей в почве  $C_{\text{п}}$  независимы, так как  $[F_{\text{оф}}] = L^2$ ,  $[C_{\text{п}}] = M/L^2$ , а размерности орошаемой площади  $F_{\text{оф}}$  и мощности водонасыщенной толщи  $(H_{\text{т}})$  зависимы:  $[F_{\text{оф}}] = L^2$ ,  $[(H_{\text{т}})] = L$ .

Из определенных и независимых размерностей находятся условия  $\pi$ -теоремы для уравнения (15). В разрабатываемой нами модели состояние почв характеризуется восемью размерными и двумя безразмерными параметрами

$$\begin{aligned} [\Delta S] &= M, [g_{\text{н}}] = M/L^3, & [g_{\text{к}}] &= M/L^3, \\ [\Delta C] &= M/L^2, & [C_{\text{н}}] &= M/L^2, \\ [B] &= L^3, [S_{\text{н}}] = M, & [V_{\text{оф}}] &= L^3, \\ [D] &= 1, [KZI] = 1, & [a] &= 1. \end{aligned}$$

Из этих параметров два имеют независимые размерности ( $M$ ;  $L^3$ ). Тогда согласно условиям  $\pi$ -теоремы можно образовать шесть безразмерных комплексов ( $8-2=6$ ).

**Составление критериального уравнения с помощью анализа размерности.** Размерность всех величин, образующих функциональную связь (15), можно представить в виде степенного одночлена. Приравнявая размерность этого одночлена размерности искомой величины, получим общий вид закономерности. Одновременно будут установлены и критерии подобия, так как полученное решение явится уравнением связи между безразмерными комбинациями.

Составим из величин уравнения (15) степенной комплекс

$$\Delta S = g_{\text{н}}^x, g_{\text{к}}^{-y}, \Delta C^{-z}, C_{\text{н}}^{\alpha}, B^{\gamma}, S_{\text{н}}^{\beta}, V_{\text{оф}}^{-\mu}. \quad (22)$$

В зависимости (15) неизвестны показатели степени  $x, y, z, \gamma, \beta, \mu$ , но известны размерности входящих в нее величин. Преобразуем уравнение (15), подставив в него размерности всех величин:

$$M = M^x L^{-3x} M^{-y} L^{3y} M^{-z} L^{2z} M^{\alpha} L^{-2\alpha} L^{3\gamma} M^{\beta} L^{-3\mu}.$$

Группируем степени при одинаковых единицах (в левой и правой частях уравнения):

$$\begin{array}{l|l} L & 0 = 3x + 3y + 2z - 2\alpha + 3\gamma - 3\mu, \\ M & 1 = x - y - z + \alpha + \beta, \\ & x = y; \quad z = \alpha; \quad 1 = \beta; \quad 3\gamma = 3\mu. \end{array} \quad (23)$$

Подставляя значения (23) в уравнение (22), получим критерии почвенного подобия<sup>1</sup>:

$$\Pi_I = \frac{\Delta S}{S_H}, \quad \Pi_{II} = \frac{B}{V_{эф}}, \quad \Pi_{III} = \frac{g_K}{g_H}, \quad \Pi_{IV} = \frac{\Delta C}{C_H}. \quad (24)$$

Данные критерии являются определяющими, поэтому в прогнозных задачах будем в дальнейшем изучать связи между ними.

Согласно условиям  $\pi$ -теоремы мы должны иметь шесть безразмерных комплексов. Эти комплексы определим так:

$$\Pi'_{IV} = \frac{\Delta S/B}{g_K}; \quad \Pi''_{IV} = \frac{S_H/B}{g_H}.$$

Безразмерные параметры становятся критериями подобия автоматически:

$$\Pi_V = \text{КЗИ}; \quad \Pi_{VI} = D; \quad \Pi_{VII} = a.$$

С помощью этих безразмерных параметров — критериев почвенного подобия — можно будет количественно оценить условия почвообразования различных орошаемых массивов (солепроявление в почвах, зоне аэрации, в поверхностных и грунтовых водах и т. п.). Это в свою очередь на следующих этапах анализа территорий позволит научно обосновать почвенные процессы на изученном аналоге и перенести тождественные из них на прогнозируемый объект, подобие которого доказано.

**Таблица критериев подобия.** Применяемые в работе критерии почвенного подобия и составляющие их параметры приведены в табл. 1. Как видно, важнейшими из них являются степень дренированности, глубина залегания грунтовых вод, ее связь с водонасыщенной зоной, объем водозабора, величина и качество орошаемой площади, КЗИ. Все эти величины определяют особенности почвообразования при орошении. Изучение изменений их количественных величин во времени позволяет построить числовые или графические зависимости, отражающие тенденции развития почвообразования при различных видах водохозяйственной и мелиоративной деятельности человека. Эти тенденции почвообразования можно переносить на аналогичные массивы, орошение которых только начато или предполагается.

<sup>1</sup> Число критериев почвенного подобия может быть увеличено, что зависит от решаемых задач. В данном случае при разработке почвенно-солевых прогнозов можно ограничиться шестью критериями. Если понадобится исследовать другие процессы (гумусообразование, минералообразование почв), то критерии будут другими, а число их уменьшится или возрастет.

**Таблица 1**  
**Список критериев почвенного подобию**

| Критерий                                                       | Формула                                                                             | Обозначение входящих в формулу параметров                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Pi_I$ — индекс солевого баланса коллекторно-дренажного стока | $\Pi_I = \frac{\Delta S}{S_n}$                                                      | $\Delta S$ — изменение запасов солей в водостоке (реке, коллекторе) за счет их выноса из почв и пород орошаемого массива за время $t$ ;<br>$S_n$ — количество солей, проходящее через начальный гидрохимический створ (расположен выше орошаемого массива). Эта же величина соответствует количеству солей, содержащихся в поливной воде, $t$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $\Pi_{II}$ — потенциал промывки почв от солей                  | $\Pi_{II} = \frac{B}{F_{эф} H_{тл}}$<br>$\Pi_{II} = \frac{B_{нп+1}}{F_{эф} H_{тл}}$ | $B$ — объем водозабора на орошение, промывки почв от солей за определенный промежуток времени, $m^3$ ;<br>$B_{нп+1}$ — объем водозабора в нарастающем значении от одного промежутка времени к другому, $m^3$ ;<br>$H_{тл}$ — мощность водонасыщенной толщи, из которой происходит сток воды и солей естественным и искусственным путем в реки и коллекторы. Определяется мелиоративным состоянием территории, глубиной вреза коллекторно-дренажной сети и мощностью зоны аэрации, $m$ ;<br>$F_{эф}$ — эффективно орошаемые площади почв с регулярным промывным режимом орошения, $m^2$ . Эти площади регулярно поставляют воду в водоносные горизонты. На хорошо дренированных массивах $F_{эф}$ равна 60%, а на слабо дренированных 40% от всей орошаемой площади (расчеты автора) |
| $\Pi_{III}$ — показатель минерализации грунтовых вод           | $\Pi_{III} = \frac{g_k}{g_n}$                                                       | $g_k$ — конечная для изучаемого мелиоративного этапа минерализация грунтовой воды первого от поверхности водоносного горизонта (после проведения мелиораций), $г/л$ ;<br>$g_n$ — начальная для определенного промежутка времени минерализация грунтовой воды (до начала проведения мелиораций или в начальные их этапы), $г/л$ ,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Таблица 1 (окончание)

| Критерий                                             | Формула                         | Обозначение входящих в формулу параметров                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{IV}$ — индекс солевого баланса почв              | $P_{IV} = \frac{\Delta C}{C_n}$ | $\Delta C$ — изменения, происшедшие в степени (и характере) засоленности почв и зоны аэрации в результате проведенных мелиораций за определенный промежуток времени, г/м <sup>2</sup> ,<br>$C_n$ — начальная степень засоления почв и зоны аэрации массива, планируемого под орошение, или орошаемого массива в начальной стадии его освоения, г/см <sup>2</sup> ,<br>$C_k$ — конечная степень засоления почв и зоны аэрации орошаемого массива, характеризующая один из этапов его освоения (на который имеются сведения) |
| $P_V$ — КЗИ — коэффициент земельного использования   | $P_V = \text{КЗИ (или КЗО)}$    | КЗИ — отношение величины поливной площади к величине площади, охваченной оросительной сетью                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $P_{VI}$ — Д — дренарованность орошаемых массивов    | $P_{VI} = D$                    | Д — оценивают соотношение дренажного стока к водоподаче на орошение. Различают дренарованность территорий (искусственно): недренированные, слабодренарованные, среднедренированные и интенсивно дренарованные                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $P_{VII}$ — показатель геометрической формы бассейна | $P_{VII} = a$                   | $a$ — оценивается влияние геометрической формы водосборной площади на формирование стока                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## **Часть II**

### **ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НАТУРНОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПОЧВЕННЫХ ПРОГНОЗОВ**

---

#### **ОПЫТ СОСТАВЛЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ПРОГНОЗОВ МЕТОДОМ НАТУРНЫХ АНАЛОГОВ НА ПРИМЕРЕ ОРОШАЕМОГО МАССИВА КЕГЕЙЛИ (АНАЛОГ) И НАМЕЧАЕМОГО К ШИРОКОМУ ОРОШЕНИЮ МАССИВА ЧИМБАЙ (ОБЪЕКТ) НИЗОВЬЕВ АМУДАРЬИ**

##### **Задача по составлению конкретных почвенных прогнозов**

**Выбор массивов для прогнозов.** Дельта Амударьи — весьма перспективный объект орошения, особенно в связи с намечаемым строительством канала Тургай. Обмеление Аральского моря и уменьшение расходов воды в Амударье вызвали обсыхание дельты. Почвы из луговых и болотно-луговых за короткий срок (3—10 лет) эволюционировали в лугово-такырные и такырные. Особенно большие площади занимают лугово-такырные почвы. Они наиболее благоприятны для орошения и на их освоение сейчас ориентируются многие хозяйства. Поэтому нами в качестве аналога выбран давно орошаемый массив Кегейли (рис. 2), почвы которого до орошения были лугово-такырными.

На расположенном рядом целинно-залежном массиве Чимбай (с участками орошаемых почв) также широко распространены лугово-такырные почвы. В ближайшие годы они будут освоены. Прогноз изменения их свойств под влиянием орошения и мелиораций массива Чимбай можно составить по аналогу — массиву Кегейли. Прогноз может быть качественным: делается общий вывод, что при освоении массива Чимбай произойдут те же изменения с почвами, какие произошли на массиве Кегейли. Но можно выразить будущие преобразования в свойствах почв массива Чимбай количественно путем численных решений и графически. В настоящей главе показаны способы количественного выражения важнейших факторов, влияющих на почвообразование: глубины залегания грунтовых вод, их минерализации и химического состава, объема оросительных и промывных вод, коэффициента земельного использования, степени дренированности массива.

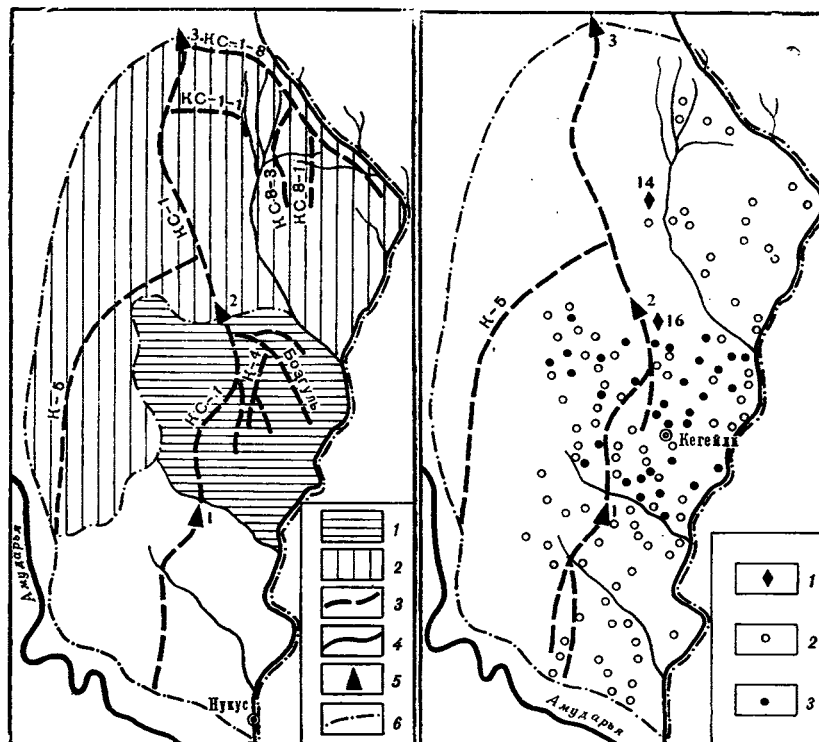


Рис. 2. Схема расположения изучаемых массивов Кегейли, Чимбай, коллекторов, каналов и гидрологических створов 1, 2, 3 на коллекторе КС-1, по данным которых оценивается мелиоративная обстановка орошаемых массивов (Кегейли — аналог) и составляются почвенные прогнозы (Чимбай — объект)

1 — массив Кегейли; 2 — массив Чимбай; 3 — коллекторы; 4 — каналы; 5 — створы коллектора КС-1; 6 — граница бассейна стока поверхностных, подземных и возвратных вод. Сток в коллектор КС-1

Рис. 3. Схема расположения скважин гидрохимкустов (1), режимных скважин Минводхоза УзССР (2) и Мингео УзССР (3)

Другие условные знаки см. на рис. 2

**Методика сбора и обработка материала.** Мелиораторы и геологи имеют богатые и ценные материалы длительных наблюдений постов за изменением галогеохимического режима почв, зоны аэрации и грунтовых вод. На гидрохимкустах (ГХК) два-три раза в год отбираются образцы почв, пород до глубины 3 м (иногда глубже, до 10 м) и пробы грунтовой воды. На каждый ГХК имеются данные по литологии, многолетним колебаниям уровня грунтовых вод, их химическому составу, видам растений, водохозяйственным условиям (наличие дренажной и оросительной сети, ее удаленность от наблюдательного пункта).

**Задачи исследований.** Через массивы Кегейли и Чимбай проходит коллектор КС-1 (см. рис. 2). Для него имеются многолетние сведения по стоку воды и солей (створы 1, 2, 3). Кроме того, на изучаемой территории расположено несколько гидрохимкустов (рис. 3). Эти данные, а также материал периодического картографирования почв, грунтовых вод, земельных угодий и растительности позволяют поставить следующие задачи в целях получения почвенных прогнозов.

1. Ограничиться анализом наиболее распространенных и обычно планируемых под орошение лугово-такрырных, такырно-луговых почв в комплексе с солончаками (на песках).

2. Определить характер изменения солевого режима грунтовых вод, зоны аэрации и почв по этапам их водохозяйственного и мелиоративного освоения.

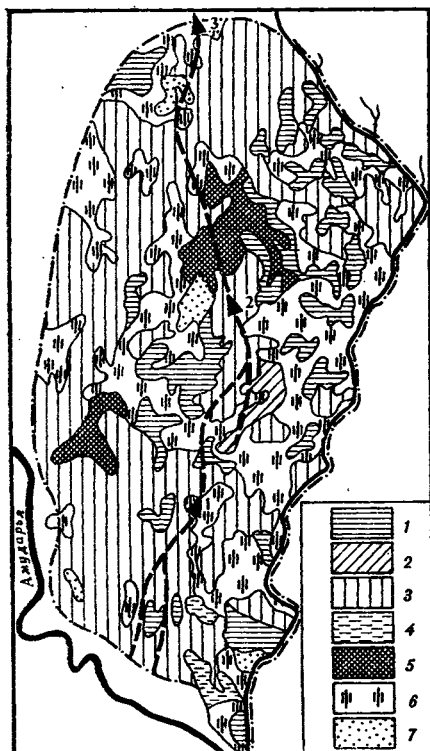
3. Выявить влияние на поведение грунтовых вод и засоление почв различных видов использования орошаемых земель: а) очаговое, переложное, бездренажное; б) регулярное орошение с низкими значениями КЗИ (0,2) на фоне слабого дренажа; в) регулярное орошение с более высокими значениями КЗИ (0,3—0,4) на фоне умеренного горизонтального дренажа; г) регулярное орошение с высокими значениями КЗИ (0,5—0,7) на фоне частого горизонтального дренажа, с применением вертикального дренажа и с высоким уровнем агротехники.

#### **История почвенно-мелиоративного развития массива-аналога Кегейли<sup>1</sup>**

**Местоположение.** Территория расположена между двумя гидрологическими створами коллектора КС-1 (1 и 2), из которых 1 — начальный, 2 — замыкающий. Площадь массива-аналога 41,6 тыс. га, из них орошается 12,9 тыс. га или 31,2% от всей площади.

**Почвы.** Преобладают солончаки (23 тыс. га, или 55%) и орошаемые почвы (12,9 тыс. га). Среди последних 65,9% — новоорошаемые лугово-такрырных и такырно-луговых, остальные — солончаки (рис. 4). Относительно небольшое распространение лугово-такрырных почв связано с тем, что они полностью освоены под орошение. На массиве-объекте преобладают именно эти лугово-такрырные почвы, которые предстоит орошать. Изучив опыт орошения лугово-такрырных почв на аналоге (Кегейли), можно будет судить о возможных последствиях их освоения на объекте (Чимбай). Динамика роста искусственно дренируемых орошаемых почв показана на рис. 5. В течение первых 3 лет шло интенсивное расширение орошаемых площадей, после чего их рост уменьшился и стабилизировался. Это нашло отражение

<sup>1</sup> Написано совместно с Г. Н. Степановым.

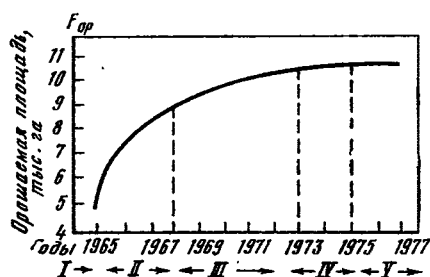


**Рис. 4.** Почвенный покров массивов Кегейли и Чимбай  
Почвы:

- 1 — новоорошаемые;
- 2 — староорошаемые;
- 3 — целинно-залежные, лугово-такырные, такырно-луговые, лугово-аллювиальные;
- 4 — новоорошаемые лугово-аллювиальные;
- 5 — такыры и такырные;
- 6 — солончаки; 7 — пески

**Рис. 5.** Рост орошаемых площадей, обеспеченных коллекторно-дренажной сетью в пределах Кегейлийского административного района Каракалпакки

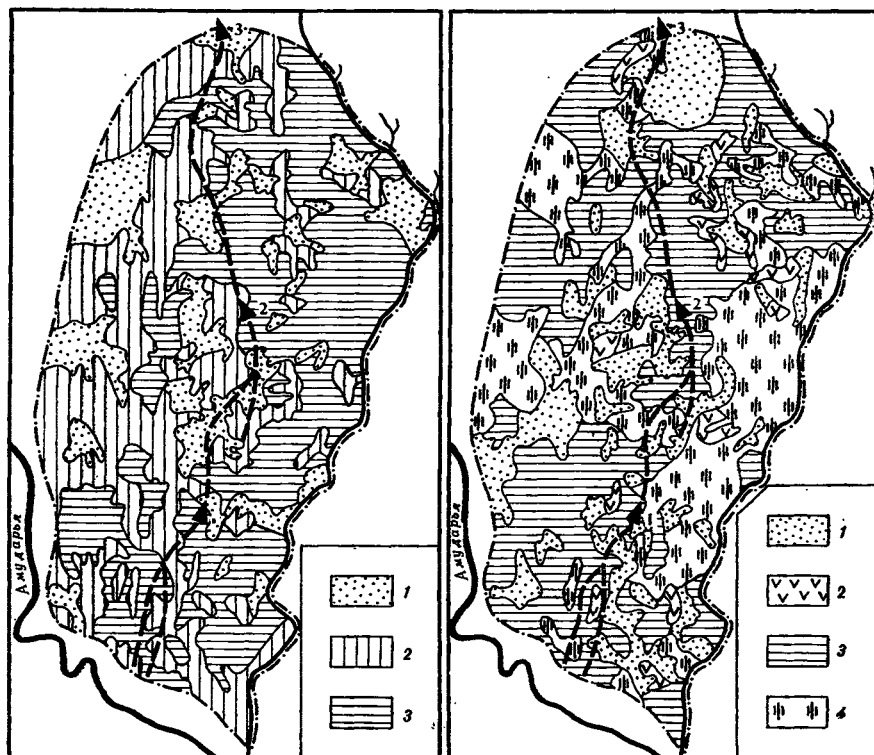
I — V — этапы водохозяйственного освоения орошаемых массивов



в изменениях параметров гидрохимкустов, а также коллекторных вод.

Как видно на рис. 6, аналог имеет преимущественно тяжело-суглинистый (18 тыс. га, или 43%) и легкосуглинисто-супесчаный состав почв и пород (15 тыс. га, или 36,3%). Средние суглинки на суглинках с прослоями супесей занимают 8,6 тыс. га, или 20,7%. В аналоге доминируют сильнозасоленные почвы (27,5 тыс. га, или 66% от всей площади), а на долю незасоленных и слабозасоленных почв приходится 27,5% (рис. 7). Степень засоления почв значительно колеблется по сезонам года. Пески, супеси и легкие суглинки в верхней метровой толще содержат в исходном состоянии (до промывок) 0,3—0,6% солей, а после промывок 0,1—0,2%. Максимум солей наблюдается в тяжелых суглинках, глинах или в легких почвах с прослоями глин. В них до промывок обнаруживается 1—2% солей (максимум 5, реже 0,6—0,8%). После промывок сильнозасоленных почв остается солей 0,5—0,8%.

**Засоление почв и зоны аэрации.** На рис. 8 приведены обобщенные характеристики степени и типа засоления почв и зоны



**Рис. 6.** Механический состав почв и пород массивов Кегейли и Чимбай

1 — супеси на легких суглинках и песках; 2 — легкие и средние суглинки на суглинках и супесях; 3 — тяжелые суглинки на глинах

**Рис. 7.** Характеристика почв массивов Кегейли и Чимбай по степени засоления

1 — слабозасоленные; 2 — средnezасоленные; 3 — средне- и сильнозасоленные; 4 — солончаки

аэрации по данным ГХК на толщ 0—3 м по глубинам: 0,1; 0,1—0,2; 0,2—1; 1—2; 2—3 м. В нижней части рисунка даны колебания уровней грунтовых вод, их минерализация и химический состав. Судя по данным гидрохимкуста 16, засоление почв в значительной степени зависит от хозяйственной деятельности человека. В бездренажных условиях при КЗИ 0,25—0,3 и посевах риса грунтовые воды резко поднимаются (за 2—3 года) с 8 до 0,8 м, но за короткий срок (1—2 года) почва не успевает засолиться, а минерализация воды заметно не повышается (приращение 5—10%). Наблюдаемый за последние годы прирост засоления почв на 20—40% от первоначального связан с тем, что

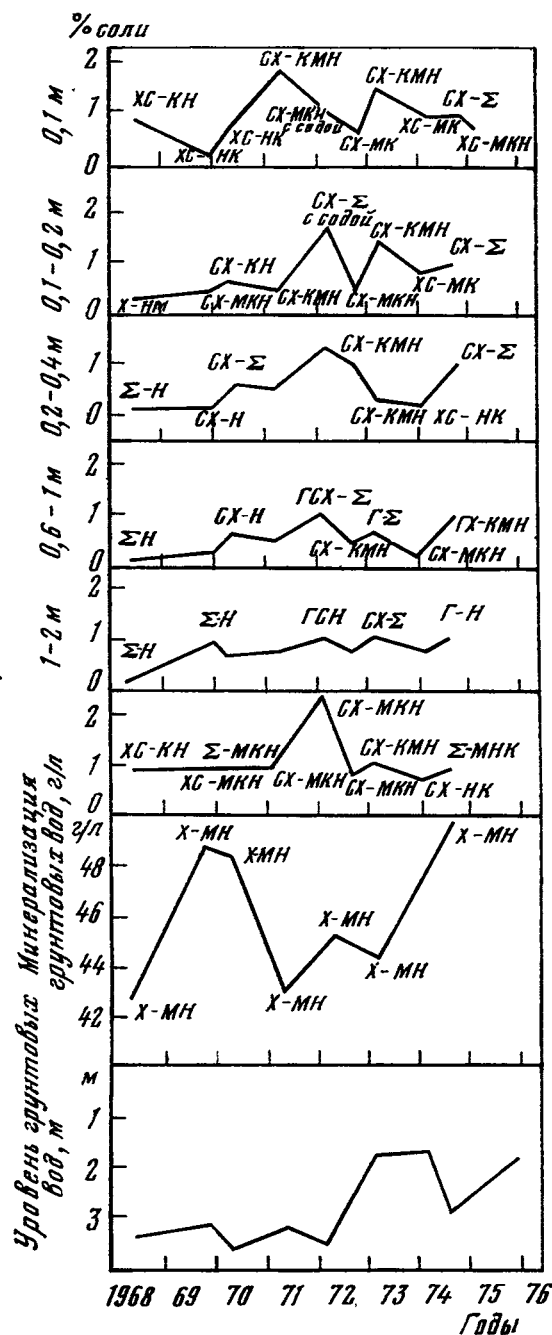
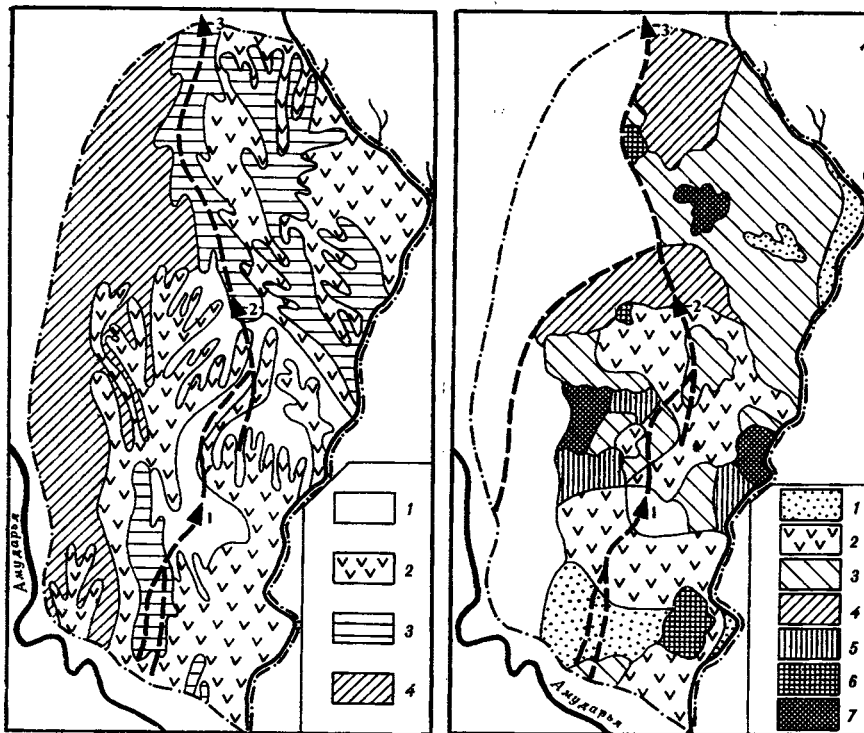


Рис. 8. Результаты много-  
летних (1968—1977 гг.)  
наблюдений на массиве  
Кегейли за динамикой за-  
солнения почв и зоны аэра-  
ции (гидрохимкуст 16, см  
рис. 3), а также за глубин-  
ной, минерализацией и  
химическим составом  
грунтовых вод

Состав солей в почвах и  
воде: Г — гидрокарбонаты,  
С — сульфаты, Х — хлориды,  
К — кальций, М — магний,  
Н — натрий, Σ — смешанный.  
Преобладающий ион ставит-  
ся в формуле на последнем  
месте. Культуры: 1968—  
1972 гг. — овощи, хлопок, лю-  
церна; 1972—1976 гг. — рис.  
Почвы и наносы преимуще-  
ственно легкосуглинистые



**Рис. 9.** Залегание уровней грунтовых вод в массивах Кегейли и Чимбай по глубинам.

1 — 0—1 м; 2 — 1—3 м; 3 — 3—5 м; 4 — 5—10 м

**Рис. 10.** Распределение в массивах Кегейли и Чимбай грунтовых вод по степени минерализации, г/л

1 — до 1; 2 — 1—3; 3 — 3—7; 4 — 7—10; 5 — 10—25; 6 — 25—50; 7 — более 50

грунтовые воды длительное время держатся на глубине выше критической, т. е. на 1,3—1,5 м.

**Грунтовые воды** залегают преимущественно на глубине 1—3 м, находясь на глубине 1 м близ каналов и оросителей, на 3—5 м близ коллекторов и дрен. В понижениях грунтовые воды залегают на глубине 0,5—1 м (рис. 9). Состав грунтовых вод выявлен по данным гидрохимкустов и режимных наблюдений Минводхоза УзССР (рис. 10, см. рис. 3).

**Гидрохимические режимы работы коллекторно-дренажной сети.** В зависимости от мелиоративного состояния орошаемой территории, степени ее освоения, характера расходной и приходной частей водно-солевого баланса можно выделить два типа режимов. Первый характерен для слабозасоленных (преимуще-

ственно сульфатно-кальциевых) или рассолённых длительными промывками почв с хорошей отточностью грунтовых вод; минерализация коллекторно-дренажных вод сравнительно невысокая, в вегетационный период она понижается. Второй тип режима присущ засоленным почвам (преимущественно сульфатно-хлоридно-натриевым) с плохой отточностью грунтовых вод; минерализация коллекторно-дренажных вод высокая, в вегетационный период она увеличивается.

Различия в гидрохимическом режиме коллекторов позволяют провести общие аналитические проработки при выборе аналогов и объектов.

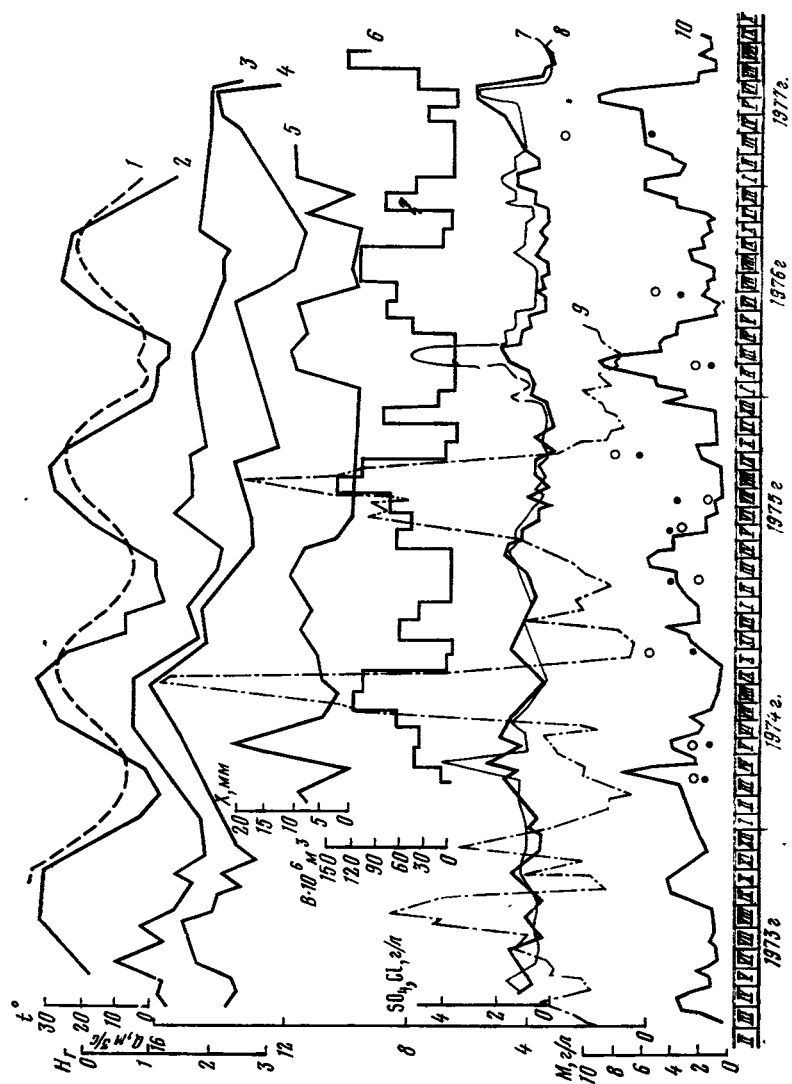
**Обобщенное представление о почвенно-мелиоративном состоянии аналога.** За промежуток времени с 1950 по 1977 г. по фактическим материалам гидрологических створов, расположенных на коллекторах, а также по наблюдениям гидрогеологов на гидрохимкустах выделены этапы освоения массива Кегейли. Данные гидрохимкустов и гидрологических створов вполне согласуются. Видимо, гидрологические створы могут дополнить сведения о почвенно-мелиоративных параметрах орошаемых и дренируемых территорий, характеризуя их интегральное состояние. Выделены следующие многолетние этапы водохозяйственного и мелиоративного освоения массива Кегейли (рис. 11).

*I этап, 1950—1965 гг.* Отсутствие дренажа. Преобладание посевов риса, хлопка, а также больших площадей садов и огородов. Переложная система земледелия: орошались почвы до тех пор, пока грунтовые воды не поднимутся до дневной поверхности, вызывая вторичное засоление (3—6 лет в зависимости от сельскохозяйственной культуры). Затем поля забрасывались, грунтовые воды опускались до исходного положения (обычно 6—9 м), территория рассолялась под действием паводковых вод и атмосферных осадков. В это время осваивались соседние незасоленные массивы. Динамика уровней грунтовых вод, их химизма и засоления почв тесно взаимосвязаны.

*II этап, 1965—1968 гг.* Ввод в строй коллекторно-дренажной сети (5—8 пог. м на 1 га) коренным образом изменило природно-мелиоративную обстановку. Анализ водного и солевого стока по коллекторно-дренажной сети дает возможность получить дополнительную информацию о почвенно-мелиоративном состоянии территории. В результате ввода в строй дренажной сети (с предварительной планировкой, промывкой почв от солей повышенными нормами воды) резко возросла минерализация грунтовых и коллекторных вод (прирост на 6—8 г/л), состав их стал явно хлоридно-натриевым. Уровень грунтовых вод с 5—8 м в результате усиленных промывок поднялся до 3 м. Почвы, особенно на глубине 1—1,5 м, сильно (до 0,8—1,5%) засолялись в предпромывной период и активно рассолялись в результате промывок (до 0,2—0,3%).

Рис. 11. Комплексный график внутрисезонного и многолетнего (1973—1977 гг.) изменения почвенно-мелиоративных параметров по массиву Кегейли

температуры почв ( $t^{\circ}\text{C}$ ) на глубинах:  
 1 — 0,2 м и  
 2 — 0,8 м;  
 глубины залегания грунтовых вод ( $H_2$ , м) по двум скважинам  
 3 — № 94 и  
 4 — № 95;  
 5 — количество атмосферных осадков ( $X$ , мм);  
 6 — водоподача ( $B$ , м<sup>3</sup>);  
 содержание в воде коллектора КС-1 (ств. 2) ионов, г/л  
 7 — сульфата;  
 8 — хлора;  
 9 — гидрограф стока ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) коллектора КС-1 (ств. 2);  
 10 — хронограф минерализации ( $M$ , г/л) воды коллектора КС-1 (ств. 2).  
 Минерализация грунтовых вод: кружки — для скв. 94, черные точки — для скв. 95



Супесчаные почвы промываются, освобождаются от солей быстрее и легче, чем суглинистые и глинистые. Местами, преимущественно в супесчаных почвах, чаще весной, образуется сода (до 30% случаев).

*III этап, 1968—1973 гг.* Характеризуется устойчивым снижением минерализации грунтовых и коллекторных вод (на 6—8 г/л), дальнейшим, хотя и замедленным, рассолением почв. Это обусловлено увеличением удельной протяженности коллекторно-дренажной сети до 12—14 пог. м на 1 га. Орошалось 8 тыс. га земель, обеспеченных коллекторно-дренажной сетью.

*IV этап, 1973—1975 гг.* Характеризуется неустойчивостью колебаний минерализации грунтовой и коллекторной воды. Наметившаяся тенденция подъема уровня грунтовых вод до критической глубины обязана заметному увеличению площадей рисовых плантаций. За это время введено в эксплуатацию дополнительно около 50 пог. км коллекторно-дренажной сети (18 пог. м на 1 га), построен отводящий коллектор Бозгуль. Подъем грунтовой воды сопровождается засолением почв.

*V этап, 1975—1977 гг.* Характеризуется повышением минерализации грунтовой и коллекторной воды. Причиной этого послужил дальнейший рост площадей рисовых плантаций, недостаточный отвод дренажных вод (около 20 пог. м на 1 га) за пределы орошаемых массивов, плохая работа коллекторно-дренажной сети (заливание, обрушение берегов, создание подпоров за счет образования в концевых частях коллекторов сбросных озер). Подъем уровня грунтовых вод выше критического вызвал интенсивный рост их минерализации, засоление зоны аэрации и почв. Причиной повышения минерализации коллекторных вод явились процессы прогрессирующего засоления почв бассейна. За 1976—1977 гг. площади сильно- и средnezасоленных почв увеличились на 10—20%.

*VI этап, после 1977 г.* Дальнейшие изменения аналога приведут к установлению такого почвенно-мелиоративного режима, который сейчас наблюдается лишь в отдельных хозяйствах дельты Амударьи. В Хорезмской области оптимальный режим почвенных процессов существует много лет и отличается большой устойчивостью. Для него характерны высокие значения КЗИ (0,8—0,9), достижение удельной протяженности коллекторно-дренажной сети до 40 пог. м на 1 га и более, залегание уровня грунтовых вод чуть ниже критического (1,6—1,8 м), образование верховодки — пресноводной подушки за счет высоких оросительных и промывных норм, содержание коллекторно-дренажной сети в отличном состоянии, использование механической откачки для улучшения работы горизонтального дренажа. В таких условиях производство риса достигает 100, а хлопка 40 ц/га.

Оптимальный режим почвенных процессов орошаемых полей отражается параметрами гидрохимкустов и коллекторной воды: грунтовые воды принимают стабильный режим, их минерализа-

ция понижается до 1—3 г/л, состав становится преимущественно сульфатно-натриевым. Гидрологические створы коллекторов также регистрируют специфику оптимального этапа: отмечается тенденция к понижению минерализации дренажных вод, к уменьшению доли хлоридов за счет повышения сульфатов и гидрокарбонатов.

#### **История почвенно-мелиоративного развития массива-объекта Чимбай**

**Местоположение.** В концевой части канала Кегейли и коллектора КС-1 имеются пригодные под орошение обширные площади свободных земель. Однако возможности орошения и его последствия остаются неизвестными. Поэтому необходим почвенный прогноз последствий освоения этой территории. Проанализируем имеющийся материал по обследуемой площади.

С восточной стороны территории ограничена каналом Кегейли, с западной — водоразделом, с юга — массивом-аналогом Кегейли (см. рис. 2). За начальный на коллекторе КС-1 принят створ 2, а за замыкающий — створ 3. Общая площадь объекта 93 тыс. га, из них орошается 9,2 тыс. га (около 10%).

**Почвы.** Значительную часть территории занимают солончаки (47%), такырно-луговые, лугово-такырные, целинно-залежные и такырные почвы (42%) (см. рис. 4). Как видно из рис. 6, на территории преобладают тяжелые суглинки на глинах с прослоями супесей (44%), затем следуют легкие суглинки на суглинках с прослоями супесей и песков (31%), а также средние суглинки на суглинках и супесях (31%). Следовательно, территория сложена преимущественно тяжелыми по механическому составу почвами, сходными с таковыми бассейна Кегейли.

**Засоление почв и зоны аэрации.** В Чимбае почвы преимущественно сильнозасолены (47%) (см. рис. 7). Состав солей пестрый, часто меняющийся по профилю. Легкие суглинки и супеси содержат 0,2—0,4% солей, осенью преимущественно сульфатно-натриевого состава, а весной гидрокарбонатно-натриевого с сульфатно-натриевым (рис. 12). Тяжелосуглинистые и глинистые почвы сульфатно-натриевые и хлоридно-натриевые. На поверхности почвы (глубина 0—3—10 см) образуется солевая корка сульфатно-натриевого (кальциевого) состава, содержащая 1—4, местами до 20% солей. Засоление почв и зоны аэрации зависит от глубины грунтовых вод и их минерализации, а также от объемов промывок и вегетационных поливов. В супесчаных почвах соли легко вымываются, но осенью за счет испарения грунтовых вод восстанавливается прежний солевой профиль (без дренажа). Особенно интенсивна такая реконструкция засоления в тяжелосуглинистых почвах. В зоне аэрации, особенно ниже 2 м, солепроявление слабое, в толще 0—1 м оно активно.

**Грунтовые воды.** Находятся в основном на глубине 1—5 м (см. рис. 9). В приканальных участках они залегают на глубине

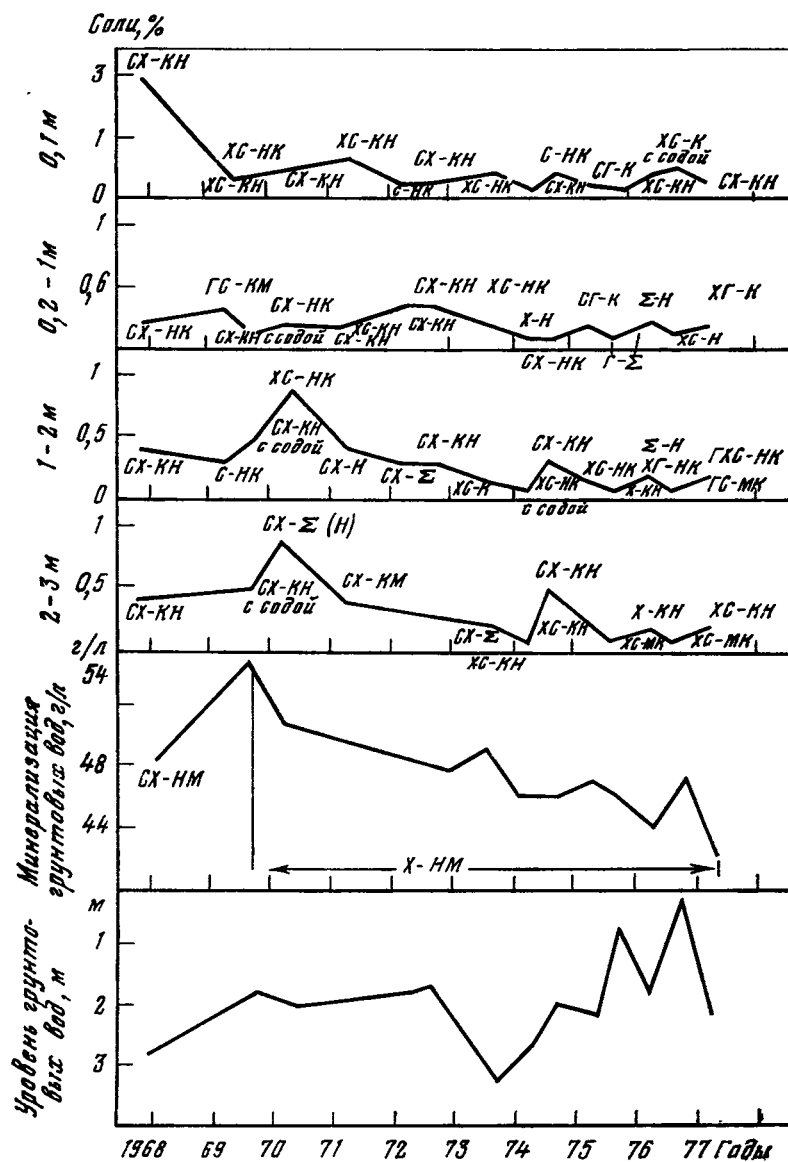


Рис. 12. Результаты многолетних (1968—1977 гг) наблюдений на массиве Чим-бай за динамикой засоления почв и зоны аэрации (гидрохимкуст 14, см рис 3) Обозначения те же, что и на рис 7 Культуры 1968—1971 гг — рис, 1972—1974 гг. — люцерна, 1975—1977 гг. — рис. Почвы до 1 м песчаные, с 1 до 3 м супесчаные

1—2 м, в понижениях — на 0,5—1 м, на территориях, прилегающих к коллекторам и дренам, — на 3—5 м. Грунтовые воды колеблются по сезонам года. Эти колебания зависят от техники поливов и объемов подаваемой на поля воды. Имеются наблюдения по шести — десяти скважинам, характеризующим колебания уровней грунтовых вод по декадам. Они обработаны с учетом механического состава почв, их литологии, удаленности от дрена или канала.

Динамичность уровней грунтовых вод в течение месяца (с мая по июнь) характеризует степень дренированности почвенного профиля. На объекте Чимбай эти колебания более значительны (0,6—0,8 м), чем на соседних Кегейлинском и Нукусском массивах (0,2—0,5 м), что свидетельствует о меньшей дренированности почвенных профилей в Кегейли и Нукусе. На скорость изменений уровней грунтовых вод по сезонам года, как видно на рис. 13, активно влияет механический состав: в супесчаных и песчаных почвах колебания максимальны (1 м), в глинах минимальны (0,2 м).

Грунтовые воды имеют пестрый, но преимущественно хлоридно-сульфатно-натриевый состав. Их минерализация вдоль каналов наименьшая (до 1—2 г/л), в межканальных понижениях средняя (5—10 г/л), по периферии оазисов высокая (25—60 г/л), в зоне влияния коллекторно-дренажной сети — до 3 г/л (см. рис. 10).

Судя по данным гидрохимкустов, состав грунтовой воды в процессе мелиорации меняется в определенной последовательности: на первых этапах орошения и промывок резко повышается минерализация; состав хлоридно-натриевый. В последующем в результате разбавления объема грунтовой воды поливной минерализация уменьшается; появляются и затем преобладают сульфаты натрия.

**Обобщенное представление о почвенно-мелиоративном состоянии объекта.** Оно необходимо для того, чтобы выявить качественные и количественные признаки сходства и различий аналога и объекта. Различия в почвенно-мелиоративных условиях между аналогом и объектом можно будет затем выразить масштабным коэффициентом. При почвенных прогнозах последствий орошения объекта Чимбай этот коэффициент поможет получить количественные параметры для тех этапов, которые должны появиться в недалеком будущем.

Как видно на рис. 14, за изученный промежуток времени (1950—1977 гг.) объект претерпел сходные с аналогом почвенно-мелиоративные изменения на первых трех этапах; а следующие три этапа Чимбаю еще предстоят. Если начальные этапы освоения объекта и аналога тождественны, то согласно теории подобия можно полагать, что и последующая его почвенно-мелиоративная история будет сходной.

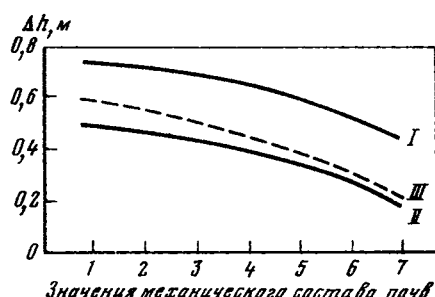


Рис. 13. Степень дренированности почв массивов орошения Чимбай (I), Нукус (II), Кегейли (III) в зависимости от механического состава

1—пески; 2—легкие суглинки на супесях; 3 — средние суглинки на суглинках и супесях; 4 — средние суглинки на тяжелых суглинках; 5 — тяжелые суглинки на глинах; 6 — глины на суглинках; 7 — глины. Построено на основании 200 наблюдений за скоростью опускания ( $\Delta h$ , м) грунтовых вод в режимных скважинах после поливов с мая по июнь 1977 г.

**I этап, 1950—1970 гг.** Орошались небольшие массивы, что при низких значениях КЗИ (0,15) не приводило к засолению орошаемых почв. Лишь по их периферии образовывались выпоты солей.

Дальнейший рост орошаемых площадей с увеличением КЗИ до 0,25 привел к широкому вторичному засолению, которое затронуло и пашни.

**II этап, 1970—1972 гг.** Прогрессирующее засоление почв привело к необходимости строительства коллекторно-дренажной сети (5 пог. м на 1 га). Массированные промывки почв от солей на фоне разреженного дренажа и слабого отвода возвратных вод привели к резкому подъему грунтовых вод (с 5 до 2,5 м, примерно по 85 см в год), повышению их минерализации. Последнее отразилось на химическом составе коллекторной воды, которая за эти годы повысила минерализацию на 6 г/л (с 16 до 22 г/л), приобрела хлоридно-натриевый состав. Из почв интенсивно выносились соли. Их содержание в верхней метровой толще уменьшилось от 120 до 40 т на 1 га, а состав солей изменился: вместо сульфатно-хлоридного стал хлоридно-сульфатно-магниево-натриевым.

Таким образом, второй этап объекта — начало ирригационно-мелиоративного освоения — подобен второму этапу аналога.

**III этап, 1972—1977 гг.** Увеличивается коллекторно-дренажная сеть (10 пог. м на 1 га), создается пестрая подушка грунтовых вод за счет интенсивных поливов и промывок. Это способствовало резкому снижению минерализации грунтовых, а также коллекторных вод, изменению их состава: уменьшению содержания хлоридов и появлению сульфатов и гидрокарбонатов. Подъем уровня грунтовых вод до критической глубины (1,5 м) способствовал интенсивному засолению почв.

Как видим, третий этап также соответствует таковому аналога. Можно предположить, опираясь на теоремы теории подобия, что и следующие этапы развития природно-мелиоративных условий массива-объекта окажутся подобными аналогу с той лишь разницей, которая будет учтена масштабным коэффициентом.

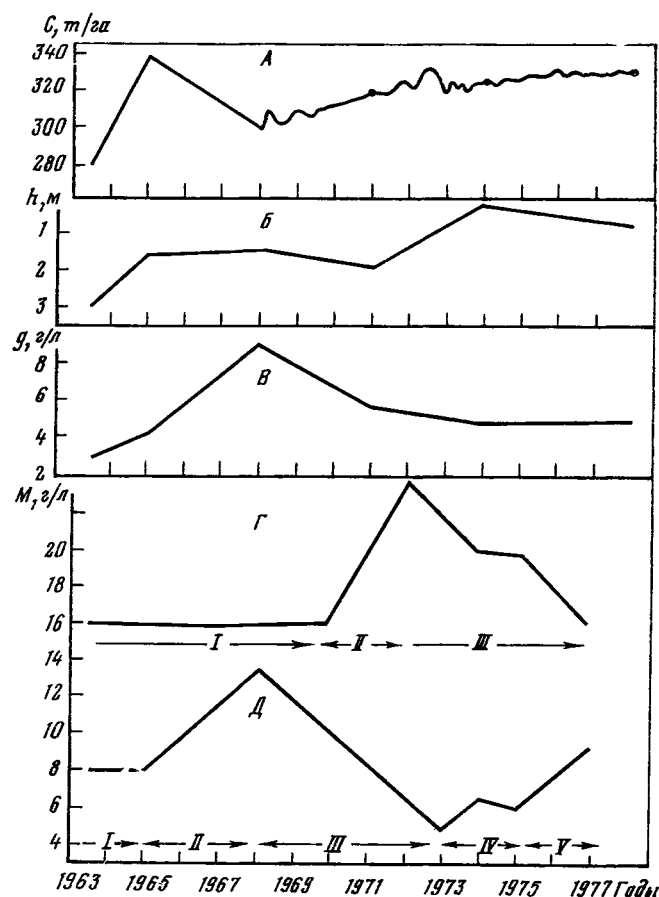


Рис. 14. Этапы почвенно-мелиоративного развития массивов Кегейли (Д) и Чимбай (Г). Для аналога Кегейли выделены по характеру изменения засоления почв (А), уровней грунтовых вод (Б), минерализации грунтовых вод (В), а также по минерализации дренажных вод коллектора КС-1 (Г—ств. 3—Чимбай и Д—ств. 2—Кегейли)

Этапы ирригационно-мелиоративного освоения массивов Кегейли и Чимбай за 1963—1977 г.: I — орошение в бездренажных условиях при низких значениях КЗИ (0,15); II — первые годы освоения массивов (мощные промывки почв от солей на фоне редкого дренажа); III — последующие годы освоения (продолжение увеличения протяженности коллекторно-дренажной сети, промывки, смена культур, подъем грунтовых вод и т. д.); IV — временный оптимальный режим работы коллекторно-дренажной сети (приближение грунтовых вод к критическому уровню, оптимальные условия рассоления почв, залегания и минерализации грунтовых вод, но недостаточная удельная протяженность дренажной сети); V — режим критической глубины и минерализации грунтовых вод (переволыв, ухудшение работы дренажа, приближение грунтовых вод к дневной поверхности)

*IV, V, VI этапы, 1977 г. и далее.* В ближайшие 10—20 лет объекту Чимбай предстоит пройти эти этапы. Необходимо при помощи теории натурального подобия по аналогу Кегейли разработать количественный почвенный прогноз последствий дальнейшего ирригационно-мелиоративного развития объекта Чимбай. Прогноз разрабатывается на два варианта: 1) объект будет осваиваться теми же способами и темпами, что и до настоящего времени (с учетом научно-технического прогресса); 2) объект будет осваиваться более широко, с учетом дополнительных объемов воды, которые планируется перебросить из Сибири в Среднюю Азию.

#### **Определение условий однозначности сравниваемых орошаемых массивов Кегейли и Чимбай**

**Перечень условий однозначности.** Для выяснения подобия почвенно-мелиоративных процессов необходимо соблюдение условий однозначности сравниваемых орошаемых массивов и равенство определяющих критериев. Условия однозначности — «это те условия, которые в любой причинной зависимости определяют одно-единственное значение следствия» [Розовский, 1969]. В приложении к почвенно-мелиоративным процессам условия однозначности можно сформулировать следующим образом:

- 1) свойства и структура почвенного покрова массивов;
- 2) геолого-литологические особенности территорий;
- 3) исторические условия мелиоративного освоения орошаемых массивов;
- 4) условия взаимодействия наиболее существенных сторон почвообразовательного процесса в рассматриваемый исторический период.

**Условия однозначности свойств и структуры почвенного покрова.** Как видно из рис. 4 и табл. 2, почвенный покров аналога и объекта однороден. И в этом и в другом преобладают такырно-луговые и лугово-такырные почвы с солончаками. Но в аналоге они орошаются, а в объекте планируются под орошение. Поэтому опыт ирригационно-мелиоративного освоения лугово-такырных почв и солончаков аналога можно будет перенести на объект.

**Геолого-литологические условия однозначности.** Как видно из рис. 6, 7 и табл. 2, объект и аналог имеют очень схожие особенности литологии почв и подстилающих горных пород. На массивах преобладают тяжелые суглинки (43—44 % от площади массивов); средних суглинков 21—25 %, примерно одинакова доля легких суглинков, супесей и песков (36—31 %). На массивах сходны и условия засоленности почв и пород. Различия связаны с тем, что аналог Кегейли более освоен, а следовательно, и более промыт от солей. Поэтому незасоленных почв здесь больше (27 %), чем на объекте (19 %). Тем не менее при срав-

**Таблица 2**  
**Условия однозначности почвенного покрова (генетические группы, механический состав, засоление)**

| Почвы, механический состав и степень засоления                           | Аналог Кегейли |       | Объект Чимбай |       |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|---------------|-------|
|                                                                          | Тыс га         | %     | Тыс га        | %     |
| <b>Почвенный покров</b>                                                  |                |       |               |       |
| Новоорошаемые такырно-луговые и лугово-такырные                          | 9,0            | 21,6  | 9,2           | 9,9   |
| Староорошаемые лугово-аллювиальные                                       | 3,9            | 9,6   |               |       |
| Солончаки                                                                | 23,0           | 55,0  | 44,0          | 47,1  |
| Такырно-луговые, лугово-такырные, лугово-аллювиальные (целинно-залежные) | 4,2            | 10,0  | 39,2          | 42,2  |
| Пески                                                                    | 1,5            | 3,8   | 0,6           | 0,8   |
| <b>Механический состав почв</b>                                          |                |       |               |       |
| Тяжелые суглинки                                                         | 18,0           | 43,0  | 40,8          | 44,0  |
| Средние суглинки                                                         | 8,6            | 20,7  | 23,2          | 25,0  |
| Легкие суглинки, супеси и пески                                          | 15,0           | 36,3  | 29,0          | 31,0  |
| <b>Засоление почв</b>                                                    |                |       |               |       |
| Сильное                                                                  | 27,5           | 66,0  | 42,8          | 46,0  |
| Среднее                                                                  | 2,7            | 6,5   | 32,4          | 35,0  |
| Слабое (и незасоленные)                                                  | 11,4           | 27,5  | 17,8          | 19,0  |
| Площадь массива                                                          | 41,6           | 100,0 | 93,0          | 100,0 |

нении площадей средне- и сильнозасоленных почв аналога (72%) и объекта (81%) выявляется общая высокая засоленность, что сближает их и свидетельствует о единстве генезиса.

Оба массива расположены на одновозрастной (голоценовой) генерации дельты Амударьи, имеют единый источник привноса мелкоземистого и солевого материала. Они генетически однородны. Все это свидетельствует о том, что для описываемых массивов, однозначных по геологическому строению, возможно применение метода натурных аналогов.

**История аналога и объекта.** Как видно из данных табл. 3, аналог пережил пять этапов водохозяйственного освоения. До 1965 г. он орошался в бездренажных условиях, что вызвало широкое вторичное засоление. С 1965 г. началось строительство дренажа, последующие этапы мелиоративного развития территории связаны с размерами осваиваемых (на фоне дренажа) орошаемых массивов, общая площадь которых к настоящему времени достигла 11 тыс. га.

Каждый этап освоения характеризуется определенными количественными характеристиками безразмерных параметров:

Количественные показатели почвенно-мелиоративного состояния аналога и объекта по основным этапам водохозяйственного использования (средние данные за этап)

[illegible]

Таблица 3 (окончание)

| Этапы водохозяйственного освоения земель | Мощность зоны за-<br>щиты (уровень за-<br>щиты грунтовых вод), м | $\Pi_{II} = \frac{B_{II+1}}{F_{эф} H_{г\mu}}$ | Потенциал промывки | Начальная для каж-<br>дого этапа минерали-<br>зация грунтовой во-<br>ды, г/л | Конечная для каж-<br>дого этапа минерали-<br>зация грунтовой во-<br>ды, г/л | $\Pi_{III} = \frac{g_k}{g_n}$ | Засоленность почв<br>орешанного массива,<br>г/га (на верхнюю мет-<br>ровую толщину) в нача-<br>ле и в конце этапа | $\Delta C = C_k - C_n$ | Изменение засолен-<br>ности почв в верхней<br>метровой толще, г/га | $\Pi_{IV} = \frac{\Delta C}{C_n}$ | Интенсивность прира-<br>щения солей в почве | Коэффициент земель-<br>ного использования |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                          |                                                                  |                                               |                    |                                                                              |                                                                             |                               | $C_n$                                                                                                             | $C_k$                  |                                                                    |                                   |                                             | $\Pi V = K_{ЗИ}$                          |

Аналог (Кетейли)

|                                     |     |      |     |     |     |     |     |    |       |     |  |  |
|-------------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|-----|--|--|
| I этап (без дренажа), до<br>1965 г. | 2,5 | 21,0 | 4,2 | 9,0 | 2,1 | 280 | 300 | 20 | 0,08  | 0,2 |  |  |
| II этап, 1965—1968 гг.              | 2,0 | 31,0 | 9,0 | 5,8 | 0,6 | 300 | 320 | 20 | 0,067 | 0,3 |  |  |
| III этап, 1968—1971 гг.             | 1,5 | 47,0 | 5,8 | 5,0 | 0,8 | 320 | 325 | 5  | 0,015 | 0,4 |  |  |
| IV этап, 1971—1974 гг.              | 1,0 | 68,0 | 5,0 | 5,0 | 1,0 | 325 | 330 | 5  | 0,014 | 0,5 |  |  |

Объект (Чимбай)

|                         |     |      |     |     |      |     |     |    |       |     |  |  |
|-------------------------|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|----|-------|-----|--|--|
| I этап, до 1970 г.      | 3,0 | 20,5 | 3,2 | 8,0 | 2,5  | 300 | 330 | 30 | 0,1   | 0,2 |  |  |
| II этап, 1970—1972 гг.  | 2,6 | 40,3 | 8,0 | 4,9 | 0,61 | 330 | 310 | 20 | 0,06  | 0,3 |  |  |
| III этап, 1972—1977 гг. | —   | 65,0 | 4,9 | 3,1 | 0,64 | 310 | 314 | —  | 0,013 | 0,4 |  |  |
| IV этап *               | —   | 100  | 3,1 | 2,2 | 0,7  | 314 | 318 | —  | 0,012 | 0,5 |  |  |

\* Данные по этапам IV и V объекта внесены в таблицу после решения прогнозных задач 1—10 (см. стр. 59—74).

показателями гидрохимического режима коллекторно-дренажной сети, водопотреблением, условиями солепроявления почв, зоны аэрации и грунтовых вод. Важным параметром явилась величина потенциала промывок, наращение объемов которых из года в год дало представление о временном влиянии водохозяйственного освоения на почвы и грунтовые воды.

Объект (Чимбай) имеет свою, в общих чертах сходную с аналогом историю водохозяйственного освоения. Однако это сходство проявилось только на первых трех этапах. Последний, третий этап — современное орошение — соответствует третьему этапу аналога, давно пройденному. Объекту Чимбай предстоит пройти еще IV и V этапы, которые аналог прошел за последние 10 лет, а также этап VI. Если удастся доказать, что числовые характеристики безразмерных параметров, характеризующие почвенно-мелиоративное состояние аналога и объекта, сходны на первых трех этапах, то, исходя из теории натурального подобия, можно утверждать, что и последующие этапы объекта окажутся сходными. Следовательно, их можно выразить количественно.

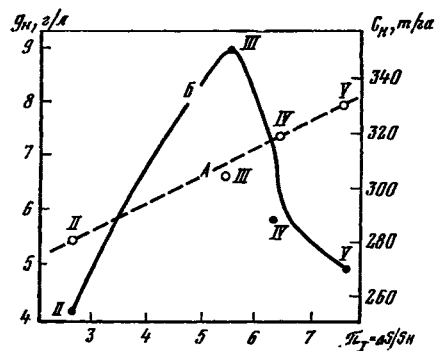
**Условия взаимодействия существенных показателей почвообразования.** Изучение многолетних колебаний расходов воды в коллекторах, уровней, минерализации и химического состава грунтовых вод, степени засоления почв на гидрохимкустах и по данным повторных солевых съемок показало, что между всеми этими показателями существуют тесные связи (см. рис. 14). Но если гидрохимкусты характеризуют изменения отдельных изолированных территорий, то объем и состав коллекторных вод — орошаемый массив в целом. В этом преимущество метода, который позволяет судить о почвенно-мелиоративном состоянии массивов не только по данным отдельных скважин, но и по режиму коллекторно-дренажных вод.

Приведенный выше анализ фактического материала показывает, что изменения засоления почв, колебания глубины и химического состава грунтовых вод связаны с ирригационно-мелиоративным освоением территории (в основном со строительством дренажной сети, увеличением КЗИ) и находятся в тесном взаимодействии. В целинно-залежном состоянии почвы, отводимые под орошение, были незасолены (или слабо засолены), грунтовые воды залегали на глубине 3—4 м, их минерализация колебалась в пределах 4,5—5,0 г/л. Такие территории считались благоприятными в мелиоративном отношении и орошались в бездренажных условиях. Это приводило на первом этапе освоения к засолению орошаемых почв. Через несколько лет орошения засоление достигало таких размеров, что массивы забрасывались или на них строился дренаж.

Этап III характеризует результаты активного вмешательства человека в процесс почвообразования. Планировки, усиление промывок на фоне разреженного дренажа в первые годы ока-

**Рис. 15.** Поэтапный характер связи для аналога Кегейли между критерием почвенного подобия  $\Pi_1$  (показателем интенсивности изменения содержания солей в коллекторной воде), минерализацией грунтовой воды ( $g_n$ ) и степенью засоления верхней однометровой толщи почв ( $C_n$ )

А — связь между засолением почв  $C_n$  и  $\Pi_1$ ;  
 Б — связь между минерализацией грунтовых вод  $g_n$  и  $\Pi_1$ . II — V — этапы



зали положительное влияние — почвы рассолялись. Но дренажная сеть работала плохо, не отводила нужного объема промывных и оросительных вод за пределы орошаемых массивов. Это приводило к подъему уровня грунтовых вод, повышению их минерализации с накоплением хлоридов натрия и, как следствие этого, к вторичному засолению почв. Поэтому на этапе IV потребовалось дальнейшее усиление искусственной дренированности орошаемых массивов. Оно, как и в этапе III, сначала привело к некоторому улучшению мелиоративного состояния почв, а затем к новому усилению их засоления. То же самое будет наблюдаться и на других этапах, пока территория не станет хорошо дренироваться, т. е. до тех пор, пока 30—40% объема промывных и поливных вод не будут отводиться коллекторами за пределы оазиса. Такие параметры при высоких значениях КЗИ (0,8—0,9) наблюдаются в Хорезмском оазисе, природно-мелиоративные условия которого во многом аналогичны таковым дельты Амударьи. Предполагается, что этап VI характеризует те почвенные условия, к которым надо стремиться при ирригационно-мелиоративном освоении дельты Амударьи. Если мелиораторы смогли бы создать подобные почвенные условия на этапах II и III, то почвы орошаемых массивов за более короткий срок перешли бы в разряд высокопродуктивных.

Коллекторно-дренажные воды четко отражают мелиоративное состояние орошаемых почв и грунтовых вод. Их взаимосвязь показана на рис. 15. Эта связь определяет основные тенденции: по мере роста засоленности почв от этапа к этапу увеличивается и интенсивность выноса солей коллекторно-дренажной сетью от начального (выше орошаемого массива) к замыкающему (ниже орошаемого массива) створам (прямая А); в то же время на этапе II (начало мелиоративных работ) минерализация грунтовой воды резко возрастает, а затем от этапа к этапу уменьшается (линия Б), при этом интенсивность общего содержания солей в коллекторе увеличивается.

### Способы прогнозирования количественных характеристик почвенно-мелиоративных процессов

Различают точечный и интервальный прогнозы. В методических целях нами использованы оба эти приема.

**Точечный прогноз.** Под точечным прогнозом понимают значение функции, характеризующей детерминированную основу процесса в заданный момент времени и при заданных известных параметрах [Чуев и др., 1975].

В данной работе почвенные прогнозы основаны на определении масштабных коэффициентов. На важность использования поправочных коэффициентов при решении прогнозных задач методом натурального подобия указывают М. В. Кирпичев [1953], И. И. Леви [1960], Л. Б. Розовский [1969] и др.

Понятие «масштабный коэффициент» (константа подобия, коэффициент пропорциональности) употребляется при определении подобия. И. И. Леви (1960) указывает, «что одноименные величины, характеризующие два подобных явления, должны относиться между собой как постоянные числа, которые можно назвать константами подобия».

Обозначив отношения расстояний между геометрически подобными точками, т. е. сходственных отрезков длин подобных систем, через  $C_l$ , отношения скоростей — через  $C_w$ , масс — через  $C_m$ , сил — через  $C_f$  и т. п., математическую формулировку понятия подобия можно дать в виде следующих систем равенств (Кирпичев, 1953):

$$\frac{l''}{l'} = C_l, \quad \frac{w''}{w'} = C_w, \quad \frac{m''}{m'} = C_m, \quad \frac{f''}{f'} = C_f, \quad (25)$$

где одним и двумя штрихами обозначены первое и второе подобные явления. М. В. Кирпичев [1953] указывает, что переход от  $x_1', \dots, x_n'$  — величин одного явления к  $x_1'', \dots, x_n''$  — величинам другого, ему подобного, можно выразить уравнением

$$x_i = C_{xi} x_i' \quad \left| \begin{array}{l} i = n \\ i = 1. \end{array} \right. \quad (26)$$

Данное уравнение является первым основным уравнением теории подобия.

Масштабный коэффициент для составленного нами критериального уравнения можно рассмотреть следующим образом:

$$\Delta S = S_n f(\Pi_{II}, \Pi_{III}, \Pi_{IV}, \Pi_V, \Pi_{VI}). \quad (27)$$

Обозначим индексом  $a$  критерии и величины аналога, а индексом  $o$  объекта:

$$\Delta S_a = S_{n(a)} f_a(\Pi_{II}^a, \Pi_{III}^a, \Pi_{IV}^a, \Pi_V^a, \Pi_{VI}^a), \quad (28)$$

$$\Delta S_o = S_{n(o)} f_o(\Pi_{II}^o, \Pi_{III}^o, \Pi_{IV}^o, \Pi_V^o, \Pi_{VI}^o).$$

Если у объекта и аналога  $\Pi_I^a = \Pi_I^o$ ,  $\Pi_{II}^a = \Pi_{II}^o$ ,  $\Pi_{III}^a = \Pi_{III}^o$ ,  $\Pi_{IV}^a = \Pi_{IV}^o$ ,  $\Pi_V^a = \Pi_V^o$ ,  $\Pi_{VI}^a = \Pi_{VI}^o$ , то можно сделать допущение, что в пределах качественно одинаковых природных условий их функции имеют одинаковый вид. У подобных явлений равенство критериев означает и равенство функций [Веников, 1949; Розовский, 1969]. Тогда из уравнений (27, 28) следует:

$$\frac{\Delta S_o}{\Delta S_a} = \frac{S_{н(o)}}{S_{н(a)}}, \quad \Delta S_o = \frac{S_{н(o)}}{S_{н(a)}} \Delta S_a. \quad (29)$$

Уравнение (29) верно только при равенстве критериев подобия. Оно представляет собой уравнение связи между объектом и аналогом, причем дробь  $\frac{S_{н(o)}}{S_{н(a)}} = K_1$  является «масштабным коэффициентом моделирования» [Розовский, 1969]. Отсюда для объекта через  $K_1$  можно прогнозировать процессы по аналогу:

$$\Delta S_o = K_1 \Delta S_a. \quad (30)$$

**Интервальный прогноз.** Почва представляет собой сложное природное тело. Оно подвержено бесчисленным внешним воздействиям, характеризуется большим количеством внутренних процессов, которые взаимообусловлены и взаимосвязаны. При изучении почвенных процессов необходимо принимать сложность за их существенное неотъемлемое свойство. Поэтому ни одна задача прогнозирования характеристик почвенно-мелиоративного процесса, подверженных воздействию случайных помех, не может быть решена точно. Количественный прогноз почвенно-мелиоративных параметров связан случайностью, с которой происходит изменение орошаемой площади в будущем. Поэтому, зная ход развития почвенных процессов аналога на всех его этапах, можно выделить некоторую область возможных значений прогнозируемой величины на объекте. В эту область объекта с заданной вероятностью попадает действительное значение прогнозируемой величины в определенный момент времени и при известных значениях параметров аналога (измерительная совокупность).

В общем измерительная совокупность, например  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$ , представляется ограниченной известными пределами, хотя внутри их она может мыслиться бесконечной по числу отдельных измерений. Измерительная совокупность характеризуется сгущением точек, расположенных вблизи ее центра. При этом расположение точек отдельных измерений обычно не очень сильно отклоняется от симметрии по отношению к ее центру.

Данные  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$  могут быть приняты за «случайные» величины потому, что они отклоняются от истинного значения под влиянием многочисленных факторов, которые учесть невозможно. Если рассмотреть случайную величину  $\pi_1$ , представленную рядом значений  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$ , например, для II этапа,

то среднее арифметическое этого ряда (для сокращения записи это значение обозначается горизонтальной чертой сверху) будет равно:

$$\bar{\pi}_1 = \frac{1}{n} \pi_i. \quad (31)$$

Среднее значение квадратов отклонения имеет специальное название дисперсии. В нашем случае дисперсия определяется:

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\pi_i - \bar{\pi})^2}{n-1}. \quad (32)$$

Величина, получаемая извлечением квадратного корня из дисперсии, является средним квадратичным отклонением:

$$\delta = \sqrt{D_1(\bar{\pi})}. \quad (33)$$

Ниже рассмотрим общие положения точности оценки и определения доверительной вероятности изучаемых нами параметров по работе В. Е. Гмурман [1977].

Пусть величина  $\bar{\pi}$  служит средней оценкой параметра  $\pi$ . Она тем точнее определяет параметр  $\pi$ , чем меньше абсолютная величина разности  $(\pi_i - \bar{\pi})$ . Другими словами, если  $\delta > 0$  и  $(\pi_i - \bar{\pi}) < \delta$ , то, чем меньше  $\delta$ , тем оценка точнее. Таким образом, положительное число  $\delta$  характеризует точность оценки измерительных величин. Но статистические методы не могут утверждать, что оценка  $\bar{\pi}$  согласуется с положением  $(\pi_i - \bar{\pi}) < \delta$ ; можно лишь рассуждать о вероятности  $\gamma$ , с которой это неравенство осуществляется.

Надежностью (доверительной вероятностью) оценки  $\pi_i$  по  $\bar{\pi}$  называют вероятность  $\gamma$ , с которой осуществляется неравенство  $(\pi_i - \bar{\pi}) < \sigma$ . Надежность оценки задается заранее, причем в качестве  $\gamma$  берут из справочника числа, равные 0,95; 0,99 и 0,999, т. е. близкие к единице. Пусть вероятность того, что  $(\pi_i - \bar{\pi}) < \sigma$  равна  $\gamma$ :

$$P\{\pi_i - \bar{\pi} < \sigma\} = \gamma.$$

Заменяя неравенство  $(\pi_i - \bar{\pi}) < \sigma$  тождественным ему двойным неравенством  $\sigma < \pi_i - \bar{\pi} < \sigma$ , или  $\bar{\pi} - \sigma < \pi_i < \bar{\pi} + \sigma$ , будем иметь

$$P[\bar{\pi} - \sigma < \pi_i < \bar{\pi} + \sigma] = \gamma.$$

Из этого соотношения следует, что вероятность того, что интервал  $(\bar{\pi} - \sigma, \bar{\pi} + \sigma)$  содержит в себе неизвестный параметр  $\pi$ , равна  $\gamma$ . В таком случае интервал  $(\bar{\pi} - \sigma, \bar{\pi} + \sigma)$ , покрывающий неизвестный параметр с заданной надежностью  $\gamma$ , является доверительным.

**Методика составления количественных прогнозов  
изменения минерализации грунтовых вод  
под влиянием орошения объекта Чимбай**

Для прогноза последствий IV и V этапов ирригационно-мелиоративного воздействия на массиве Чимбай по аналогу Кегейли необходимо решить следующие четыре задачи.

Задача 1 — определить величины расхождения (масштабные коэффициенты) параметров  $\Pi_I$  и  $\Pi_{III}$  для массивов Чимбай и Кегейли.

Задача 2 — оценить интенсивность изменения минерализации грунтовых вод.

Задача 3 — определить фактическую минерализацию грунтовых вод.

Задача 4 — выявить величину интервала колебания прогнозируемого параметра для аналога и объекта.

**Решение задачи 1.** Величина масштабного коэффициента для каждого этапа определяется по уравнению (30). Для II и III этапов аналога и объекта известны все исходные параметры, дающие возможность определить величины расхождения  $\Pi_I$  и  $\Pi_{III}$ , т. е. масштабный коэффициент ( $K$ ) (табл. 4). Но на IV и V этапах развития объекта исходные параметры являются прогнозными. Здесь для определения масштабных коэффициентов исследуемых этапов необходимо применить вероятностное суждение, которое исходит из детального анализа орошаемых территорий. Анализ фактического материала за многолетие показал, что для всех сезонов разных этапов  $\Delta S_o$  имеет одинаковые отклонения от  $\Delta S_a$ . Отсюда следует, что подобие гидрохимического режима коллекторных вод очевидно и масштабный коэффициент в последующих IV и V этапах будет соответственно равен 0,9 (табл. 4). Таким же образом находим возможные отклонения масштабного коэффициента для  $\pi_3$ . Зная, что объект отличается от аналога несколько лучшими мелиоративными условиями, возможно определение примерного расхождения величин масштабного коэффициента  $K_3$  для минерализации грунтовых вод. Они составляют для этапа IV 0,8, а для этапа V 0,7 (табл. 4).

**Решение задачи 2.** Доказательства условий однозначности аналога Кегейли и объекта Чимбай позволяют переносить с помощью поправочных масштабных коэффициентов наблюдавшиеся гидрохимические процессы с аналога на объект, где эти процессы возникнут в ближайшие годы.

Интенсивность изменения минерализации грунтовых вод для этапов IV и V объекта можно оценить исходя из данных табл. 4, т. е. по средним значениям величин для каждого этапа. По значениям параметров  $\Pi_I$  и  $\Pi_{III}$  и масштабным коэффициентам  $K_I$  и  $K_3$  определим фактические значения интенсивности изменения

**Таблица 4**  
Количественное выражение критериев почвенного подобия в целях  
получения масштабного коэффициента

| Критерий подобия                                         | Критерий почвенного подобия                     | Этапы освое-<br>ния массов | Аналог Кегей-<br>ли * П (а) | Объект Чим-<br>бай * П (о) | Масштабный коэффициент<br>$K = \frac{\Pi(o)}{\Pi(a)}$ |                     |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|
|                                                          |                                                 |                            |                             |                            | для этапов<br>II, III                                 | для этапов<br>IV, V |
| Подобие гидрохи-<br>мического режима<br>коллекторных вод | $\Pi_I = \frac{\Delta S}{S_n}$                  | II                         | 2,6                         | 2,3                        | $K_1=0,9$                                             | IV $K_1=0,9$        |
|                                                          |                                                 | III                        | 5,5                         | 5,0                        | $K_1=0,9$                                             | V $K_1=0,9$         |
| Подобие условий<br>водоподачи                            | $\Pi_{II} = \frac{B_{нп+1}}{\mu (H_1+h)F_{эф}}$ | II                         | 21,0                        | 20,5                       | $K_2=0,9$                                             | IV $K_2=1,4$        |
|                                                          |                                                 | III                        | 31,0                        | 40,3                       | $K_2=1,3$                                             | V $K_2=1,5$         |
| Подобие солепрояв-<br>ления грунтовых<br>вод             | $\Pi_{III} = \frac{g_k}{g_n}$                   | II                         | 2,1                         | 2,5                        | $K_3=1,2$                                             | IV $K_3=0,8$        |
|                                                          |                                                 | III                        | 0,6                         | 0,6                        | $K_3=1,0$                                             | V $K_3=0,7$         |
| Подобие режима со-<br>лепроявления в<br>почвах           | $\Pi_{IV} = \frac{\Delta C}{C_n}$               | II                         | 0,08                        | 0,09                       | $K_4=1,1$                                             | IV $K_4=0,9$        |
|                                                          |                                                 | III                        | 0,06                        | 0,06                       | $K_4=1,0$                                             | V $K_4=0,8$         |
| КЗИ (коэффициент<br>земельного исполь-<br>зования)       | $\Pi_V = K_{ЗИ}$                                | II                         | 0,2                         | 0,2                        | $K_5=1,0$                                             | IV $K_5=1,0$        |
|                                                          |                                                 | III                        | 0,2                         | 0,2                        | $K_5=1,0$                                             | V $K_5=1,0$         |

\* Здесь и далее в уравнениях означает (а) — аналог, (о) — объект.

минерализации грунтовых вод для этапов IV и V объекта:

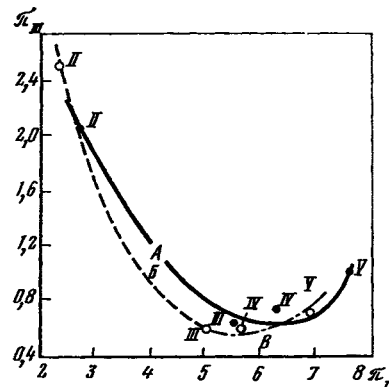
$$\Pi_{III(o)} = K_3 \Pi_{III(a)}, \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{I(o)} &= K_1 \Pi_{I(a)}; \\ \Pi_{III(o)} &= 0,8 \cdot 0,8 = 0,64 \text{ (прогнозируемый этап IV),} \\ \Pi_{III(o)} &= 0,7 \cdot 1,0 = 0,70 \text{ (прогнозируемый этап V),} \\ \Pi_{I(o)} &= 0,9 \cdot 6,2 = 5,58 \text{ (прогнозируемый этап IV),} \\ \Pi_{I(o)} &= 0,9 \cdot 7,6 = 6,84 \text{ (прогнозируемый этап V).} \end{aligned}$$

Следовательно, на этапах IV и V объекта при существующих способах ирригационно-мелиоративного освоения почв минерализация грунтовых вод будет снижаться (рис. 16). Интенсивность этого снижения на этапе IV составит 0,64, а на этапе V — 0,70. При этом общее содержание солей в коллекторно-дренажном стоке от начального створа к замыкающему будет уменьшаться (табл. 3;  $S_3$  и  $S_n$  согласно этапам IV и V аналога). Интенсивность изменения общего содержания солей в коллекторном стоке от этапа к этапу будет увеличиваться. Интенсивность этого увеличения прироста минерализации коллекторных вод составит на этапе IV объекта Чимбай 5,58, а на этапе V 6,84. Подставив эти значения в рис. 16 (линия В), получим нагляд-

**Рис. 16.** Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобия  $\Pi_I$  (показателем интенсивности изменения содержания солей в воде коллектора) и  $\Pi_{III}$  (показателем интенсивности изменения минерализации грунтовой воды орошаемого массива)

A — для аналога Кегейли;  
B — для изученных этапов объекта Чимбай;  
B — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай. II — V — этапы



ное представление о динамичности характера интенсивности изменения минерализации грунтовых вод.

**Решение задачи 3.** Для количественного определения минерализации грунтовых вод объекта необходимо знать:

а) определенные в задаче 1 величины интенсивности изменения минерализации грунтовых вод для этапов IV и V (по табл. 3 они равны 0,64 и 0,70);

б) фактическую минерализацию грунтовых вод объекта в конце III — начале IV этапов. По табл. 4 она равна 4,9 г/л. Таким образом, для этапа IV в формуле (34) нам известна величина  $\Pi_{III(0)}$ , равная для прогнозируемого этапа IV 0,64, а также величина начальной минерализации объекта  $g_n$ , равная 4,9 г/л. Подставив эти значения в отношение  $\Pi_{III} = g_n / g_k$ , находим величину минерализации грунтовых вод массива — объекта:

$$g_n = \Pi_{III} g_k, \quad g_k = 0,64 \cdot 4,9 = 3,13 \text{ г/л}, \quad g_k = 3,1 \text{ г/л}.$$

Получим, что в конце развития этапа V, который начался в 1978 г. и будет продолжаться ближайшие 3—4 года, минерализация грунтовой воды понизится и достигнет 3,1 г/л.

На основе приведенного выше анализа прогнозная минерализация грунтовой воды для этапа V объекта находится при условии, что  $\Pi_{III(0)} = 0,7$  (берется из табл. 3),  $g_n = 3,1$  г/л (рассчитана по уравнению (34)).

В таком случае

$$\begin{aligned} \Pi_{III} &= g_n / g_k, & g_k &= \Pi_{III} g_n, \\ g_k &= 0,7 \cdot 3,1 = 2,2, & g_k &= 2,2 \text{ г/л}. \end{aligned}$$

Таким образом, в конце этапа V, примерно через 8—10 лет (т. е. к 1985—1988 гг.), при существующих способах и темпах ирригационно-мелиоративного освоения грунтовые воды орошаемых массивов Чимбай понизятся до 2,4 г/л. Это благоприят-

но скажется на мелиоративной обстановке и отразится на свойствах почв.

**Решение задачи 4.** Для выявления величины колебания интервала прогнозируемого параметра потребовался детальный анализ водохозяйственных этапов. Для аналога и объекта изучены все годы, составляющие водохозяйственные этапы. Затем для каждого года проведен сезонный анализ гидрографа стока и хронографа минерализации на гидрологических створах коллектора КС-1 (эта работа выполнена Г. Н. Степановым). Годовой хронограф минерализации позволяет выявить четыре сезонных ирригационно-мелиоративных периода, которые соответствуют мероприятиям, проводимым в оазисе (рис. 17):

- 1) период промывок (март — апрель, ноябрь — декабрь);
- 2) период подпитывающих поливов (май);
- 3) вегетационный период (июнь — середина сентября);
- 4) период чисто грунтового питания (сентябрь — октябрь, январь — февраль).

Рассмотрим гидрохимический режим в каждом из периодов.

*Промывной период.* Происходит обогащение коллекторных вод солями за счет выноса их промывной водой из почв и зоны аэрации. В результате этого минерализация воды в коллекторе повышается. Процесс растворения солей водой динамичен. В начале промывного периода в почве находится большое количество солей, в конце их меньше. Необходим определенный промежуток времени для перевода солей в раствор. Поэтому между промывками делают перерывы. В результате таких прерывистых промывок минерализация воды в коллекторе к концу периода (апрель) снижается.

*Период подпитывающих поливов.* В мае температуры воздуха очень высокие, поверхность почвы высыхает, что препятствует развитию хлопчатника. Поэтому в это время на полях проводят подпитывающие поливы. Суть их заключается в том, что оросительной водой заполняют все понижения рельефа вдоль коллектора. Таким образом поднимают уровень грунтовых вод и ими подпитывают хлопчатник снизу (субирригация). Сбрасыванием излишков оросительных вод в коллекторы объясняется падение минерализации в коллекторной воде в мае — июне.

*Вегетационный период.* Начинается с середины июня. В это время действует дополнительный напор, в результате которого коллектор дренирует нижние слои грунтовых вод. Поэтому минерализация воды коллектора, проходя через засоленные массивы, повышается. В результате залегания грунтовых вод выше критического уровня и большого их испарения к концу вегетации почвы обогащаются солями.

*Период чисто грунтового питания* (поствегетационный период). В середине сентября вегетация заканчивается. На поля уже не подают воду, действие дополнительного напора прекращается. В коллектор начинает поступать сток верхних слоев грунто-

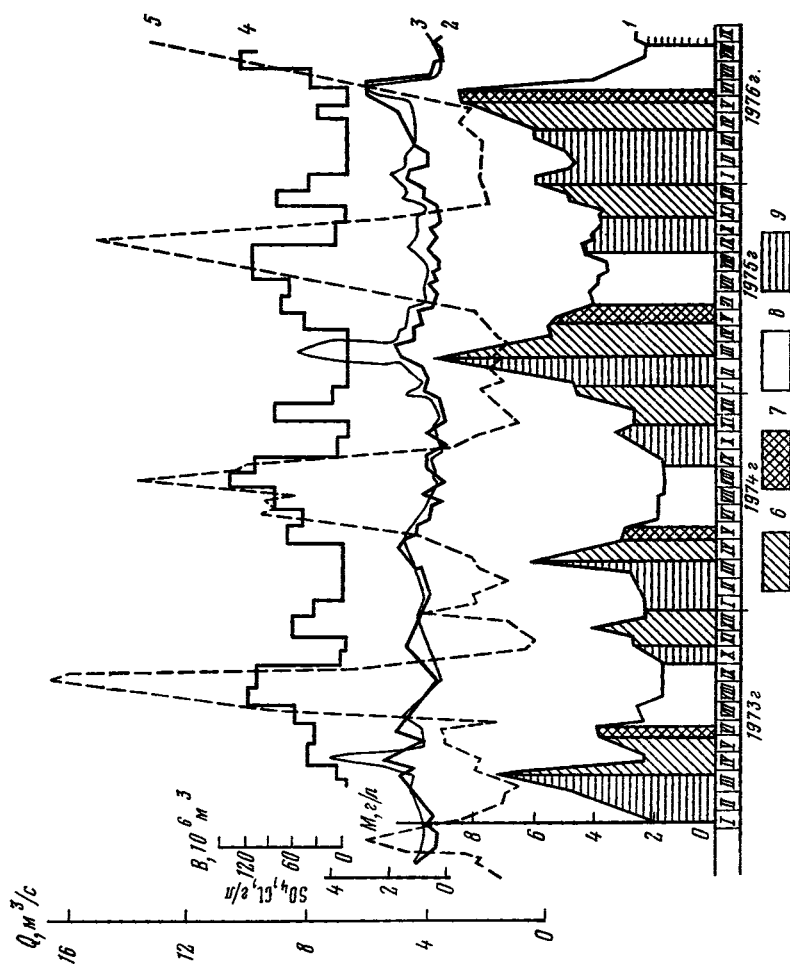


Рис. 17. Внутригодовые периоды ирригационно-мелиоративных мероприятий за 1973—1976 гг. Выделены путем расчленения хронографа минерализации коллектора КС-1 (ств. 2)

Содержание в воде коллектора ионов и солей, г/л:  
 1 — общее (минерализация);  
 2 — сульфатов,  
 3 — хлора;  
 4 — водоподача по району (В, млн. м³);  
 5 — расход воды в коллекторе (Q, м³/с). Периоды проведения мероприятий:  
 6 — промывной,  
 7 — подпитывающих поливов,  
 8 — вегетационный,  
 9 — поствегетационный

**Таблица 5**  
**Количественные показатели ( $\Pi_I = \Delta S / S_n$ ;  $\Pi_{III} = g_k / g_n$ ) этапов**  
**водохозяйственного использования орошаемых земель аналога**  
**Кегейли по сезонным ирригационно-мелиоративным периодам**

| Этап            | Год             | Сезонные<br>ирига-<br>ционно-ме-<br>лиоратив-<br>ные перио-<br>ды* | $\pi_{II}$ | $\pi_I$ | $\pi_{III}$ | $\pi_I - \pi_{II}$ | $\pi_{III} - \pi_{II}$ | $(\pi_I - \pi_{II})^2$ | $(\pi_{III} - \pi_{II})^2$ |      |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|------------|---------|-------------|--------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------|
| II              | 1965            | A                                                                  | $\pi_1$    | 2,5     | 1,8         | -0,1               | -0,3                   | 0,01                   | 0,09                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_2$    | 2,3     | 1,7         | -0,3               | -0,4                   | 0,03                   | 0,16                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_3$    | 2,4     | 1,9         | -0,2               | -0,2                   | 0,04                   | 0,04                       |      |
|                 | 1966            | A                                                                  | $\pi_4$    | 2,7     | 2,0         | 0,1                | -0,1                   | 0,01                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_5$    | 2,5     | 2,2         | -0,1               | 0,1                    | 0,01                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_6$    | 2,6     | 1,8         | 0,0                | -0,3                   | 0,00                   | 0,09                       |      |
|                 | 1967            | A                                                                  | $\pi_7$    | 3,2     | 2,6         | 0,6                | 0,5                    | 0,36                   | 0,25                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_8$    | 3,0     | 2,4         | 0,4                | 0,3                    | 0,16                   | 0,09                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_9$    | 2,8     | 2,5         | 0,2                | 0,4                    | 0,04                   | 0,16                       |      |
|                 | 1968            | A                                                                  | $\pi_{10}$ | 2,9     | 2,1         | 0,3                | 0,0                    | 0,04                   | 0,0                        |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_{11}$ | 2,7     | 2,0         | 0,1                | -0,1                   | 0,01                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_{12}$ | 2,5     | 2,2         | -0,1               | 0,1                    | 0,01                   | 0,01                       |      |
| Средняя за этап |                 | $\pi$                                                              | 2,6        | 2,1     |             |                    | $\Sigma 1,06$          | $\Sigma 1,01$          |                            |      |
| III             | 1969            | A                                                                  | $\pi_1$    | 4,12    | 0,9         | -1,34              | 0,3                    | 1,79                   | 0,09                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_2$    | 4,11    | 0,6         | -1,35              | 0,0                    | 1,82                   | 0,0                        |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_3$    | 4,13    | 1,0         | -1,33              | 0,4                    | 1,76                   | 0,16                       |      |
|                 | 1970            | A                                                                  | $\pi_4$    | 6,10    | 0,7         | 0,64               | 0,1                    | 0,41                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_5$    | 6,20    | 0,5         | 0,74               | -0,1                   | 0,54                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_6$    | 6,00    | 0,6         | 0,54               | 0,0                    | 0,29                   | 0,0                        |      |
|                 | 1971            | A                                                                  | $\pi_7$    | 6,14    | 0,5         | 0,68               | -0,1                   | 0,46                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_8$    | 6,30    | 0,4         | 0,84               | -0,2                   | 0,70                   | 0,04                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_9$    | 6,22    | 0,6         | 0,76               | 0,0                    | 0,58                   | 0,0                        |      |
|                 | Средняя за этап |                                                                    | $\pi$      | 5,46    | 0,6         |                    |                        | $\Sigma 8,35$          | $\Sigma 0,32$              |      |
|                 | IV              | 1972                                                               | A          | $\pi_1$ | 4,9         | 0,8                | -1,3                   | 0,0                    | 1,69                       | 0,00 |
|                 |                 |                                                                    | B          | $\pi_2$ | 5,3         | 1,0                | -0,9                   | 0,2                    | 0,81                       | 0,04 |
| C               |                 |                                                                    | $\pi_3$    | 5,4     | 0,9         | -0,8               | 0,1                    | 0,61                   | 0,01                       |      |
| 1973            |                 | A                                                                  | $\pi_4$    | 6,2     | 0,7         | 0,0                | -0,1                   | 0,0                    | 0,01                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_5$    | 6,4     | 0,6         | 0,2                | -0,2                   | 0,02                   | 0,04                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_6$    | 6,3     | 0,8         | 0,1                | 0,0                    | 0,01                   | 0,00                       |      |
| 1974            |                 | A                                                                  | $\pi_7$    | 7,0     | 0,9         | 0,8                | 0,1                    | 0,64                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_8$    | 6,8     | 0,7         | 0,8                | -0,1                   | 0,64                   | 0,01                       |      |
|                 |                 | C                                                                  | $\pi_9$    | 7,3     | 0,8         | 1,1                | 0,0                    | 1,21                   | 0,00                       |      |
| Средняя за этап |                 | $\pi$                                                              | 6,2        | 0,8     |             |                    | $\Sigma 5,63$          | $\Sigma 0,12$          |                            |      |
| 1975            |                 | A                                                                  | $\pi_1$    | 6,3     | 1,2         | -1,3               | 0,2                    | 1,69                   | 0,04                       |      |
|                 |                 | B                                                                  | $\pi_2$    | 5,8     | 1,0         | -1,8               | 0,0                    | 3,25                   | 0,00                       |      |
|                 | C               | $\pi_3$                                                            | 5,9        | 1,4     | -1,7        | 0,4                | 2,89                   | 0,16                   |                            |      |

Таблица 5 (окончание)

| Этап | Год             | Сезонные<br>иррига-<br>ционно-ме-<br>лиоратив-<br>ные пе-<br>риоды * | $\pi_a$    | $\pi_I$ | $\pi_{III}$ | $\pi_I - \pi_{III}$ | $\pi_{III} - \pi_I$ | $(\pi_I - \pi_{III})^2$ | $(\pi_{III} - \pi_I)^2$ |
|------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|------------|---------|-------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| V    | 1976            | A                                                                    | $\pi_4$    | 7,6     | 1,4         | 0,0                 | 0,4                 | 0,0                     | 0,16                    |
|      |                 | B                                                                    | $\pi_5$    | 7,4     | 1,0         | -0,2                | 0,0                 | 0,02                    | 0,00                    |
|      |                 | C                                                                    | $\pi_6$    | 7,2     | 0,8         | -0,4                | -0,2                | 0,16                    | 0,04                    |
|      | 1977            | A                                                                    | $\pi_7$    | 8,2     | 0,6         | 0,6                 | -0,4                | 0,36                    | 0,16                    |
|      |                 | B                                                                    | $\pi_8$    | 8,0     | 0,9         | 0,4                 | -0,1                | 0,16                    | 0,01                    |
|      |                 | C                                                                    | $\pi_9$    | 8,1     | 0,6         | 0,5                 | -0,4                | 0,25                    | 0,16                    |
|      | 1978            | A                                                                    | $\pi_{10}$ | 8,9     | 1,1         | 1,3                 | 0,1                 | 1,69                    | 0,01                    |
|      |                 | B                                                                    | $\pi_{11}$ | 9,0     | 1,0         | 1,4                 | 0,0                 | 1,96                    | 0,00                    |
|      |                 | C                                                                    | $\pi_{12}$ | 8,8     | 0,9         | 1,2                 | -0,1                | 1,44                    | 0,01                    |
|      | Средняя за этап |                                                                      | $\pi$      | 7,6     | 1,0         |                     |                     | $\Sigma 13,8$           | $\Sigma 0,75$           |

Периоды: A — чисто грунтового питания; B — промывок и подпитывающих поливов; C — вегетационных поливов.

вых вод, сильно обогащенный солями. Поэтому минерализация коллекторных вод увеличивается.

Для определения интервала прогноза на основе всего изложенного обобщенные критерии почвенного подобию  $\pi_I$  и  $\pi_{III}$  расчленим на ряд составляющих их качеств. Например, для  $\pi_I$

Рис. 18. Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобию  $\pi_I$  (показателем интенсивности изменения содержания солей в коллекторной воде) и  $\pi_{III}$  (показателем интенсивности изменения минерализации грунтовой воды орошаемого массива)

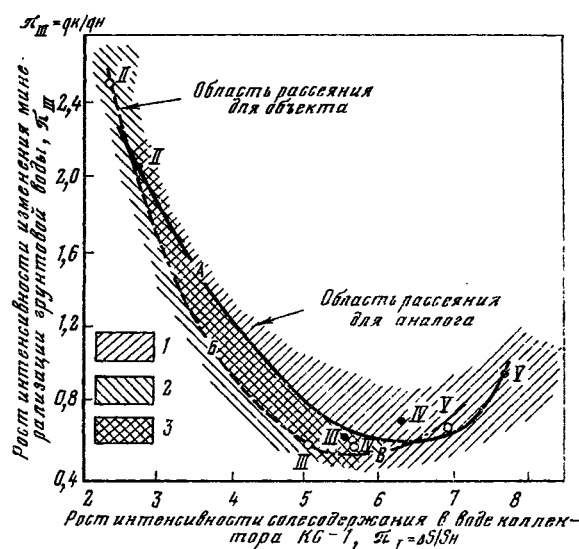
A — для аналога Кегейли;  
B — для изученных этапов объекта Чимбай;

B — для прогнозируемых IV и V этапов объекта Чимбай (интервальный прогноз)

1 — область рассеяния значений параметров для аналога;

2 — то же, для объекта;

3 — область совмещения значений параметров объекта и аналога



**Таблица 6**  
**Количественные показатели ( $\Pi_I = \Delta S/S_n$ ;  $\Pi_{III} = g_k/g_n$ ) на этапах**  
**водохозяйственного использования орошаемых земель объекта Чимбай**

| Этап            | Год  | Сезонные<br>иррига-<br>ционно-ме-<br>лиоратив-<br>ные пе-<br>риоды | $\pi_n^o$  | $\Pi_I$ | $\Pi_{III}$ | $\Pi_I - \Pi_{III}$ | $(\Pi_{III} - \Pi_I)$ | $(\Pi_I - \Pi_{III})^2$ | $(\Pi_{III} - \Pi_I)^2$ |
|-----------------|------|--------------------------------------------------------------------|------------|---------|-------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| II              | 1970 | A                                                                  | $\pi_1$    | 2,1     | 2,4         | -0,2                | -0,1                  | 0,04                    | 0,01                    |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_2$    | 2,0     | 2,2         | -0,3                | -0,3                  | 0,09                    | 0,09                    |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_3$    | 2,2     | 2,5         | -0,1                | 0,0                   | 0,01                    | 0                       |
|                 | 1971 | A                                                                  | $\pi_4$    | 2,3     | 2,5         | 0,0                 | 0,0                   | 0,00                    | 0                       |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_5$    | 2,2     | 2,3         | -0,1                | -0,2                  | 0,01                    | 0,04                    |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_6$    | 2,4     | 2,5         | 0,1                 | 0,0                   | 0,01                    | 0                       |
|                 | 1972 | A                                                                  | $\pi_7$    | 2,5     | 2,6         | 0,2                 | 0,1                   | 0,02                    | 0,01                    |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_8$    | 2,3     | 2,5         | 0                   | 0,0                   | 0                       | 0,0                     |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_9$    | 2,4     | 2,7         | 0,1                 | 0,2                   | 0,01                    | 0,04                    |
| Среднее за этап |      |                                                                    | $\pi$      | 2,3     | 2,5         |                     | $\Sigma 0,33$         | $\Sigma 0,19$           |                         |
| III             | 1973 | A                                                                  | $\pi_1$    | 4,7     | 0,5         | -0,3                | -0,4                  | 0,09                    | 0,16                    |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_2$    | 4,8     | 0,4         | -0,5                | -0,2                  | 0,25                    | 0,04                    |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_3$    | 4,6     | 0,6         | -0,4                | 0,0                   | 0,16                    | 0                       |
|                 | 1974 | A                                                                  | $\pi_4$    | 4,6     | 0,5         | -0,2                | 0,1                   | 0,04                    | 0,01                    |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_5$    | 4,7     | 0,3         | -0,3                | -0,3                  | 0,09                    | 0,09                    |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_6$    | 4,9     | 0,4         | -0,1                | -0,2                  | 0,01                    | 0,02                    |
|                 | 1975 | A                                                                  | $\pi_7$    | 5,0     | 0,8         | 0,0                 | 0,2                   | 0,0                     | 0,02                    |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_8$    | 4,9     | 0,6         | -0,1                | 0,0                   | 0,01                    | 0,0                     |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_9$    | 5,1     | 0,7         | 0,1                 | 0,1                   | 0,01                    | 0,01                    |
|                 | 1976 | A                                                                  | $\pi_{10}$ | 5,2     | 0,6         | 0,2                 | 0,0                   | 0,04                    | 0,0                     |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_{11}$ | 5,0     | 0,5         | 0,0                 | -0,1                  | 0,0                     | 0,01                    |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_{12}$ | 5,4     | 0,7         | 0,4                 | 0,1                   | 0,16                    | 0,01                    |
|                 | 1977 | A                                                                  | $\pi_{13}$ | 5,6     | 0,6         | 0,6                 | 0,0                   | 0,36                    | 0,0                     |
|                 |      | B                                                                  | $\pi_{14}$ | 5,2     | 0,4         | 0,2                 | -0,2                  | 0,04                    | 0,04                    |
|                 |      | C                                                                  | $\pi_{15}$ | 5,4     | 0,8         | 0,4                 | 0,2                   | 0,16                    | 0,04                    |
| Среднее за этап |      |                                                                    | $\pi$      | 5,0     | 0,6         |                     | $\Sigma 1,42$         | $\Sigma 0,45$           |                         |

это будет ( $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$ ). То же самое для  $\Pi_{III}$  ( $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$ ).

Расчлененные критерии почвенного подобия представлены в табл. 5 и 6 для трех сезонных ирригационно-мелиоративных периодов.

А. Чисто грунтового питания (январь — февраль, октябрь).

В. Промывок и подпитывающих поливов (май, ноябрь — декабрь, март — апрель).

С. Вегетационных поливов (май — сентябрь).

**Таблица 7**  
**Дисперсия ( $D$ ) и среднее квадратичное отклонение ( $\sigma$ )**  
**для аналога и объекта**

| Этап ирригационно-мелиоративного освоения | Аналог    |            |               |            | Объект    |            |               |            |
|-------------------------------------------|-----------|------------|---------------|------------|-----------|------------|---------------|------------|
|                                           | $\Pi_I^a$ |            | $\Pi_{III}^a$ |            | $\Pi_I^o$ |            | $\Pi_{III}^o$ |            |
|                                           | $D_1$     | $\sigma_1$ | $D_3$         | $\sigma_1$ | $D_1$     | $\sigma_1$ | $D_3$         | $\sigma_1$ |
| II                                        | 0,096     | 0,31       | 0,083         | 0,288      | 0,06      | 0,25       | 0,03          | 0,173      |
| III                                       | 1,67      | 1,29       | 0,064         | 0,25       | 0,118     | 0,34       | 0,038         | 0,194      |
| IV                                        | 1,126     | 1,06       | 0,024         | 0,154      | —         | —          | —             | —          |
| V                                         | 1,73      | 1,32       | 0,093         | 0,306      | —         | —          | —             | —          |

**Таблица 8**  
**Доверительный интервал для массива аналога и массива объекта**

| Этап ирригационно-мелиоративного освоения | Аналог    |               | Объект    |               |
|-------------------------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
|                                           | $\Pi_I^a$ | $\Pi_{III}^a$ | $\Pi_I^o$ | $\Pi_{III}^o$ |
| II                                        | 2,48—2,80 | 2,28—1,92     | 2,04—2,56 | 2,32—2,68     |
| III                                       | 4,80—6,07 | 0,43—0,77     | 4,78—5,22 | 0,48—0,72     |
| IV                                        | 5,39—7,01 | 0,69—0,91     | —         | —             |
| V                                         | 6,71—8,49 | 0,85—1,15     | —         | —             |

Расчисленные критерии, привязанные к наиболее информативным трем сезонам года (А, В, С), позволяют перейти к разработке количественного почвенного прогноза. Для этого необходимо оценить параметры, которыми определяются эти расчисленные критерии подобия ( $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n$ ).

Предполагая, что они распределены в генеральной совокупности нормально, можно приближенно найти математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение.

По формулам (32), (33) определим дисперсию и среднее квадратическое отклонение для параметров, представленных в табл. 7 и 8. На основании данных табл. 7, 8 составляется график связи  $\Pi_I$  и  $\Pi_{III}$  (рис. 18) с показом колебаний рассеяния значений параметров для аналога и объекта, а также области их совмещения. Наличие этой области свидетельствует о тождестве параметров сравниваемых орошаемых массивов (Кегейли и Чимбай). Данный график связи построен лишь для одной задачи. В других задачах подобные графики не выполнены, так как их исполнение не является главным моментом в работе.

На основе изложенного выше определим доверительный интервал для аналога и объекта (табл. 8).

**Методика составления количественного прогноза  
гидрогеолого-мелиоративных условий  
под влиянием промывок почв объекта Чимбай**

Сформулируем задачи данного прогноза для объекта на этапы IV и V их предстоящего развития (1978—1988 гг.).

Задача 5 — оценить величины потенциала промывок почв от солей.

Задача 6 — определить соотношения величин потенциала промывки и интенсивности изменения минерализации грунтовых вод.

Зная временное опережение водохозяйственного использования аналога Кегейли (на этапы IV и V), можно согласно теории натурального подобия определить прогнозируемые параметры для объекта Чимбай. Для этой цели применим один из найденных

нами критериев почвенного подобия  $\Pi_{II} = \frac{B_{нп+1}}{F_{эф}H_{гм}}$ . В расчетах

взяты данные по суммарному значению водозаборов за исследуемые этапы мелиоративного освоения массивов ( $B_{нп}$ ). Последнее дает представление о временном эффекте водохозяйственного влияния на почвы и грунтовые воды.

**Решение задачи 5.** Связь между нарастающим значением величин потенциала промывок ( $\Pi_{II}$ ) и интенсивностью изменения общего содержания солей в воде коллектора ( $\Pi_I$ ) свидетельствует об увеличении последней в аналоге Кегейли (рис. 19).

Величина  $\Pi_I$  для этапов IV и V объекта Чимбай вычислена ранее при решении задачи 1 по формуле (15); для этапа IV она равна 5,58, а для этапа V — 6,84. Для вычисления величины  $\Pi_{II}$  (потенциала промывок почв от солей) используем уравнение

$$\Pi_{II(o)} = K_2 \Pi_{II(a)}. \quad (35)$$

Подставив в уравнение (35) значения  $\pi_{2(a)}$  из табл. 3 и  $K_2$  из табл. 4, получим

$$\begin{aligned} \Pi_{II(o)} &= 1,4 \cdot 47,0 = 65,0 \text{ (IV этап),} \\ \Pi_{II(o)} &= 1,4 \cdot 67,5 = 94,0 \text{ (V этап).} \end{aligned} \quad (36)$$

На рис. 17 нанесем места расположения вычисленных точек для этапов IV и V и получим прогнозную кривую ( $B$ ).

**Решение задачи 6.** Для определения соотношения величин потенциала промывок и интенсивности изменения минерализации грунтовых вод построим график связи (рис. 20). Видно, что этап II аналога и объекта характеризуется высокими значениями интенсивности изменения минерализации грунтовых вод ( $\Pi_I$ ) при начальных объемах водоподачи ( $\Pi_2$ ). С дальнейшим ростом водоподачи (этапы III, IV, V аналога) уменьшается приращение минерализации грунтовой воды. Это можно объяснить

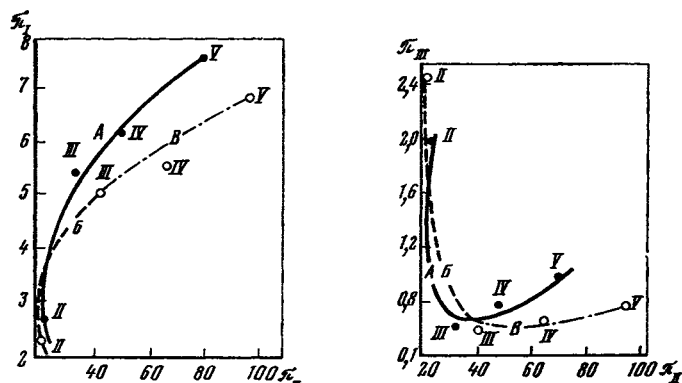


Рис. 19. Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобию  $\Pi_I$  (показателем интенсивности изменения содержания солей в воде коллектора) и  $\Pi_{III}$  (потенциалом промывок почв от солей)

$A$  — для аналога Кегейли,  $B$  — для изученных этапов объекта Чимбай;  $V$  — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай.  $I$ — $V$  — этапы

Рис. 20. Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобию  $\Pi_I$  (потенциал промывок почв от солей) и  $\Pi_{III}$  (показатель интенсивности изменения минерализации грунтовой воды)

$A$  — для аналога Кегейли;  $B$  — для изученных этапов ( $II$ ,  $III$ ) объекта Чимбай,  $V$  — для прогнозируемых этапов ( $IV$ ,  $V$ ) объекта Чимбай

уменьшением выноса солей из почв и зоны аэрации в результате истощения солевых запасов.

Для прогнозируемых этапов  $IV$  и  $V$  аналога величины интенсивности изменения минерализации грунтовых вод ( $\Pi_{III}$ ) были получены ранее из уравнения (34) при решении задачи 1. Для этапа  $IV$  она составила 0,64, а для этапа  $V$  — 0,70. Величины потенциала промывок ( $\Pi_I$ ) для тех же этапов объекта также получены по формуле (35) при решении задачи 5. Они для этапа  $IV$  равны 65, а для этапа  $V$  — 94. Найдя эти значения на рис. 18, графически выразим прогнозные значения искомых величин. Как видно, они тождественны аналогу, но имеют отклонения, связанные со спецификой почвенных условий объекта.

#### Методика составления количественных прогнозов изменения засоления почв объекта Чимбай

Сформулируем условия данного прогноза для объекта на этапы  $IV$  и  $V$  их развития (1978—1988 гг.).

Задача 7 — оценить интенсивность изменения солей в почвах по изменениям количества солей в воде коллектора.

Задача 8 — оценить величины интенсивности изменения содержания солей в почвах под влиянием промывок засоленных почв.

Задача 9 — определить предполагаемые изменения в содержании солей в почвах (абсолютные величины) под влиянием промывок.

**Решение задачи 7.** Для определения соотношения величин интенсивности изменения количества солей в почвах и интенсивности изменения общего содержания солей в коллекторной воде построен график связи (рис. 21). Этапы II и III аналога и объекта характеризуются понижением величины интенсивности изменения содержания солей в почвах от начального этапа освоения к последующим. Величины интенсивности изменения общего содержания солей в коллекторной воде на этапах II и III увеличиваются, что свидетельствует о значительном выносе солей из почв и зоны аэрации.

Как видно из рис. 21, на этапах IV и V аналога содержание солей в почвах стабилизируется.

Для вычисления величины  $\Pi_{IV}$  — интенсивности изменения количества солей в почве — используем уравнение

$$\Pi_{IV(o)} = K_4 \Pi_{IV(a)}. \quad (37)$$

Подставив в уравнение (37) значения  $\pi_{4(a)}$  из табл. 3 и  $K_4$  из табл. 4, получим

$$\Pi_{IV(o)} = 0,9 \cdot 0,015 = 0,013 \text{ (IV этап)}, \quad (38)$$

$$\Pi_{IV(o)} = 0,8 \cdot 0,014 = 0,012 \text{ (V этап)}.$$

Используя найденные результаты (38), построим кривую *Б* (рис. 21) в ее прогнозируемой части (этапы IV и V). Заметим, что объект Чимбай в течение этапа III будет иметь все уменьшающиеся значения интенсивности солепроявления, а затем, на этапе V, стабилизируется на фоне прогрессирующего засоления почв.

**Решение задачи 8.** Для определения интенсивности изменения солепроявления почв под влиянием промывок построим график связи параметров  $\Pi_{II}$  и  $\Pi_{IV}$  (рис. 22). Как видно, при увеличении потенциала промывок уменьшается величина солепроявления. Первые этапы аналога и объекта имеют тождественный ход изменения величины  $\Pi_{IV}$ . Для прогноза  $\Pi_{IV}$  на этапах IV и V объекта найдем значения  $\Pi_{II}$  и  $\Pi_{IV}$ . Они рассчитаны ранее по уравнениям (35), (37) задач 3 и 5. Величина потенциала промывки для этапа IV равна 65, а для этапа V — 94; величины интенсивности приращения солей в почвах соответственно равны 0,013 и 0,012. Используя эти данные, построим кривую *Б* (рис. 22) в ее прогнозной части, т. е. для этапов IV и V. Видно, что в ближайшие годы (с III по IV этапы) интенсивность солепроявления в почвах будет прогрессивно понижаться, а затем, с IV и V этапа, стабилизируется. Эта стабилизация будет связана с подъемом грунтовых вод выше критического уровня, ухудшением работы дренажной сети, переполивами и, как следствие,

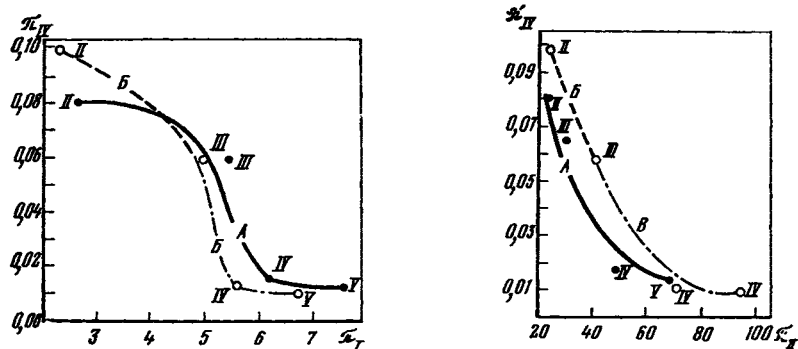


Рис. 21. Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобию  $\Pi_1$  (показатель интенсивности изменения содержания солей в воде коллектора) и  $\Pi_{IV}$  (показатель интенсивности солепроявления в почве)

A — для аналога Кегейли; B — для изученных этапов объекта Чимбай; V — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай. II—V — этапы

Рис. 22. Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобию  $\Pi_2$  (потенциал промывок почв от солей) и  $\Pi_4$  (показатель интенсивности изменения солепроявления в почве)

A — для аналога Кегейли; B — для изученных этапов объекта Чимбай; V — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай. II—V — этапы

началом вторичного засоления почв (при условии, что способы и темпы освоения останутся прежними).

**Решение задачи 9.** Для количественного определения засоленности почв объекта необходимо знать величины:

1) определенные в задаче 1 параметры интенсивности изменения солей в почвах для этапов IV и V (по табл. 4 они равны 0,013 и 0,012);

2) фактическую засоленность почв объекта в конце III — начале IV этапа. По табл. 3 она равна 310 т/га.

Таким образом, для этапа IV в формуле критерия подобию  $\Pi_{IV(0)} = \Delta C / C_n$  нам известны величины  $\Pi_{IV(0)}$ , равные для прогнозируемого этапа IV 0,013, а также величину начальной засоленности почв объекта  $C_n = 310$  т/га.

Подставив эти величины в формулу  $\Pi_{4(0)}$ , находим

$$\Delta C = C_k - C_n, \quad C_n = X - 310, \quad 0,013 = \frac{\Delta C}{310},$$

$$\Delta C = 0,013 \cdot 310 = 4, \quad 4 = X - 310, \quad x = 314 \text{ т/га.}$$

Таким образом, в конце развития этапа IV, который начался в 1978 г. и будет длиться ближайшие 3—4 года, засоленность почв увеличится и достигнет 314 т/га.

Величина засоления почв для этапа V прогнозируется при условиях, что  $\Pi_{4(0)}$  равно 0,012 (табл. 4),  $C_n$  равно 3,14 т/га

(уравнение 20). В таком случае

$$P_{IV(0)} = \frac{\Delta C}{C_n}, \quad 0,012 = \frac{\Delta C}{3,4}$$

$$\Delta C = 0,012 \cdot 314 = 4, \quad 4 = C_k - 314, \quad C_k = 318 \text{ т/га.}$$

Получаем, что в конце этапа V развития объекта, примерно через 8—10 лет (т. е. к 1985—1988 гг.) при существующих способах и темпах ирригационно-мелиоративного освоения, засоленность почв орошаемых массивов Чимбай достигнет 318 т/га. Это свидетельствует о необходимости применения более эффективных мер по их рассолению.

**Методика составления количественных  
почвенных прогнозов в зависимости от изменений  
во времени коэффициента земельного использования  
(КЗИ) объекта Чимбай**

Условия прогноза для объекта на этапы IV и V их предстоящего развития (1978—1988 гг.).

Задача 10 — оценить связь между интенсивностью изменения общего количества солей в воде коллектора и ростом КЗИ.

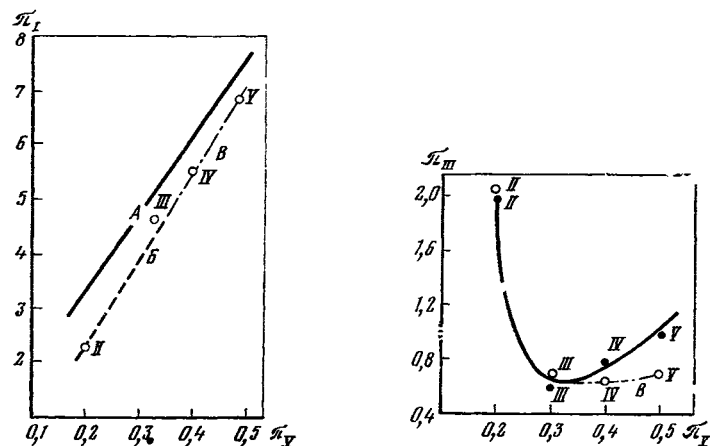
Задача 11 — выяснить возможную интенсивность изменения минерализации грунтовых вод в связи с увеличением КЗИ.

Задача 12 — определить величину интенсивности изменения засоленности почв в связи с ростом КЗИ.

**Решение задачи 10.** Для выяснения связи между интенсивностью изменения общего содержания солей в коллекторной воде КС-1 и ростом КЗИ для аналога построим график (рис. 23, А, Б). Как видно, на первых этапах освоения объекта и аналога линии связи параллельны. Это показывает, что масштабный коэффициент пропорциональности равен единице, т. е.  $K_{6(0)} = 1$  на этапах II и III, что дает возможность продолжить прямую линию объекта с этапа III до этапа IV ( $KЗИ = 0,4$ ) и с этапа IV до этапа V ( $KЗИ = 0,5$ ) параллельно прямой аналога на этих же этапах.

Эту задачу можно решить и другим путем, определив значения интенсивности изменения общего содержания солей в коллекторном стоке (они найдены ранее в задаче 1). Определив местоположение величин  $P_i$  на рис. 23 для этапов IV и V, обнаружим, что они легли на прямую линию, найденную выше при помощи масштабного коэффициента.

**Решение задачи 11.** Для оценки возможной интенсивности изменений минерализации грунтовых вод с ростом КЗИ построим график (рис. 24). На этапах II и III линии связи А и Б для аналога и объекта совпадают, так как значения  $\pi_3$  и  $\pi_6$  очень близки. На прогнозируемых этапах IV и V объекта величины  $\pi_{3(0)}$  (как было определено ранее, уравнение (15)) соответствен-



**Рис. 23.** Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобия  $\Pi_I$  (показатель интенсивности изменения содержания солей в коллекторной воде) и  $\Pi_V$  (КЗИ)

*A* — для аналога Кегейли, *B* — для изученных этапов объекта Чимбай; *B* — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай. II — V — этапы

**Рис. 24.** Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобия  $\Pi_{III}$  (показатель интенсивности изменения минерализации грунтовой воды) и  $\Pi_V$  (КЗИ)

*A* — для аналога Кегейли и изученных этапов объекта Чимбай, *B* — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай. II — V — этапы

но равны 0,64 и 0,70. Определив местоположение этих величин на рисунке, графически выразим возможную интенсивность изменения минерализации грунтовых вод в зависимости от величины КЗИ. Она будет прогрессивно возрастать от этапа к этапу, а фактическая минерализация грунтовой воды будет уменьшаться (см. табл. 3).

**Решение задачи 12.** Для оценки величины интенсивности засоленности почв в связи с изменениями КЗИ построим график связи параметров  $\Pi_{IV}$  и  $\Pi_{VI}$  (рис. 25). Как видно, при увеличении КЗИ уменьшается величина солепроявления.

На прогнозируемых этапах IV и V объекта величины  $\Pi_{IV(0)}$  [определено ранее, уравнение (19)] соответственно равняется 0,013 и 0,012, т. е. уменьшается от этапа к этапу, хотя засоленность почв увеличивается. Определив их местоположение на рисунке, графически выразим возможные изменения интенсивности солепроявления почв в зависимости от величины КЗИ.

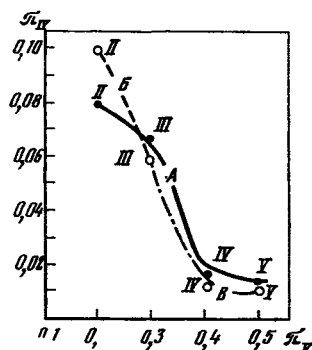


Рис. 25. Поэтапный характер связи между критериями почвенного подобия  $\Pi_{гv}$  (показатель интенсивности изменения солепроявления в почве) и  $\Pi_v$  (КЗИ)

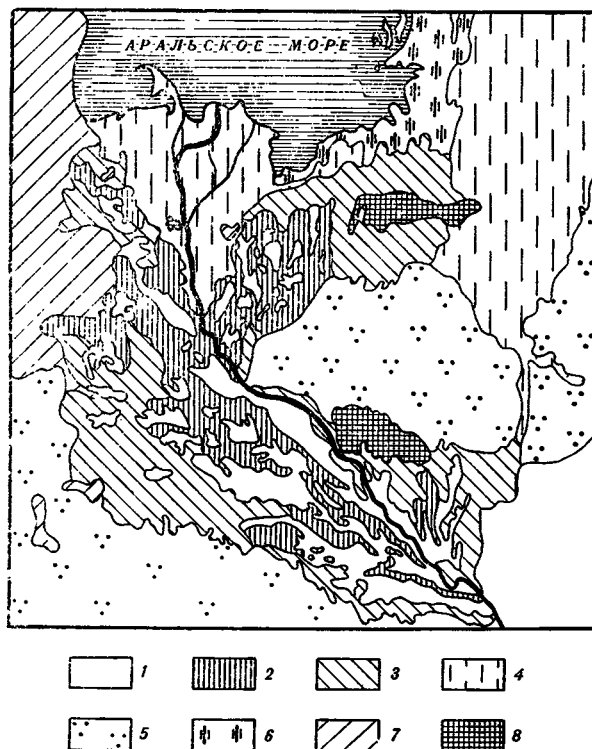
A — для аналога Кегейли;  
B — для изученных этапов объекта Чимбай;  
V — для прогнозируемых этапов объекта Чимбай, II—V — этапы

### Прогнозы возможных изменений почв дельты Амударьи

В предыдущих разделах было решено 12 задач. Их число можно было бы увеличить, например, для того, чтобы прогнозировать и другие процессы почвообразования: химические, органо-минеральные, минералогические. Эти процессы здесь не рассматриваются, так как задачи прогнозов ограничивались лишь определением солевого режима почв, притом его наиболее известной части. Тем не менее, полученные результаты по засолению почв и вод свидетельствуют о том, что почвенные прогнозы могут быть выражены количественно. Однако необходимо дальнейшее их совершенствование.

Опыт изучения орошения и мелиорации почв дельты Амударьи свидетельствует, что данная территория в общем находится в начальной стадии освоения. Низкие величины КЗИ (0,3, редко 0,4), слаборазвитая коллекторно-дренажная сеть (15, реже 18 м/га), несовершенная ирригационная сеть с низкими значениями КПД (0,3—0,5) приводят к подъему грунтовых вод выше критического уровня (1,2—1,4 м), повышению их минерализации (5—10 г/л), приобретению неблагоприятных солевых свойств ( $\text{SO}_4 - \text{Na}$ ,  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ ). Несмотря на проведение ирригационно-мелиоративных работ, это способствует прогрессирующему вторичному засолению почв и пород.

Почвенные прогнозы составлены на территории с лугово-такырными почвами, которые не так давно (5—10 лет назад) были лугово-болотными, болотными и луговыми. В результате отступления Аральского моря (за последние годы на 6 м) дельта Амударьи стала обсыхать. Обводненность территории резко уменьшилась и грунтовые воды опустились. Этому способствует также углубление русла Амударьи и ликвидация ее многорукавности. Тугайная растительность чахнет, органические остатки минерализуются, почвы в целом деградируют, засоляются, теряют плодородие, превращаются в бесструктурное безгумусное вещество, вязкое, липкое в мокром и пылеватое в сухом состоя-



**Рис. 26.** Схема рациональной очередности освоения западной части Узбекистана и северо-запада Туркмении. Составлена по результатам анализа бассейнов коллекторов

1 — земли существующего орошения. Требуется реконструкция ирригационной и коллекторно-дренажной сети, а также повышение культуры земледелия; 2 — земли первой очереди орошения. Внутриазиатские и приоазисные земли, требующие капитальных водоохозяйственных мероприятий; 3 — земли второй очереди освоения. Прилегают к землям современного орошения и к землям первой очереди перспективного освоения. Требуют капитальных мелиораций, дополнительных больших объемов поливной воды; 4 — земли, пригодные к освоению. Требуют значительных объемов воды, трудовых ресурсов и мощной энерготехнической базы; 5 — песчаные пространства. Перспективны для очагового орошения с использованием местного поверхностного стока и подземных вод, частично водоводов; 6 — прогрессивно освобождающаяся от влияния вод Аральского моря, обсыхающая прибрежная морская равнина (ячеистые пески, солончаки). Необходимо создание водной завесы (сброс коллекторно-дренажных вод, закрепление растительностью, местами посевы риса) в целях предотвращения дефляции, образования подвижных засоленных песков; 7 — плато Устюрт и останцовые возвышенности с маломощными щебнистыми почвами. Возможно создание небольших по размерам долговременных культурных пастбищ; 8 — горы и возвышенности. Улучшение пастбищ путем дождевания

нии. Такие почвы относятся к лугово-такырным и такырным, и именно для них в настоящей работе разрабатывались прогнозы возможных изменений под влиянием орошения.

Лугово-такырных и такырных почв в современной дельте Амударьи более 0,4 млн. га. За счет интенсивной аридизации их площадь из года в год увеличивается. При осуществлении переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию такырные и лугово-такырные почвы станут основным объектом орошения. В первую очередь будут освоены внутриоазисные почвы с повышением КЗИ до 0,8, во вторую очередь — такырные почвы по периферии оазисов и в третью очередь — гидроморфные почвы дельты, которые через 10—30 лет станут автоморфными.

При освоении почв дельты могут возникнуть процессы солепроявления, не учтенные в наших прогнозах. Например, на 30% площади дельты возможно вторичное содовое засоление. Уже сейчас при орошении южной Ахчадарьи местами в почвах появилась сода, которая мигрировала из глубоко залегающих (10—20 м) глинисто-песчаных слоев. На 20% площади дельты грунтовые воды содовые.

При орошении почв дельты наиболее опасным окажется не засоление почв, а развитие дефляции. Уже сейчас на значительных площадях на супесчаных и песчаных почвах широко развивается ветровая эрозия. Образуются язвы дефляции, скопления незакрепленного золотого песка. Это явление нами также не прогнозировалось, так как для применения теории натурного подобия в целях прогнозов дефляции почв требуется другое уравнение связи, на основе которого можно составить критериальное уравнение.

Разработка почвенных прогнозов позволила получить практические рекомендации и изобразить их картографически. Для Западного Узбекистана и северо-западной части Туркмении составлена схема, на которой показаны перспективные массивы орошения и очередность их освоения (рис. 26). Основная специализация сельского хозяйства — рисосеяние и хлопководство. Значительная роль отводится животноводству с созданием долговременных культурных пастбищ. Рост орошаемых площадей окажется возможным при проведении мероприятий по реконструкции ирригационной и коллекторно-дренажной сети, а также в случае прихода не менее 10 км<sup>3</sup> сибирской воды. Необходимо резкое повышение культуры орошаемого земледелия.

## ЛИТЕРАТУРА

---

- Авенесян И. М.* Гидрологические основы прогноза солевого режима и баланса грунтов зоны аэрации орошаемых земель.— В кн.: Материалы межведомственного совещания по мелиоративной гидрологии и инженерной геологии. Минск, 1969.
- Аверьянов С. Ф.* Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод.— В кн.: Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М.: Изд-во АН СССР, 1956, т. 1.
- Аверьянов С. Ф.* Расчет комбинированных дренажных систем в условиях напорного питания.— Изв. ТСХА, 1963, № 2.
- Аверьянов С. Ф.* Некоторые вопросы предупреждения засоления орошаемых земель и меры борьбы с ним в Европейской части СССР.— В кн.: Орошаемое земледелие в Европейской части СССР. М.: Колос, 1965.
- Аверьянов С. Ф.* Борьба с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1978.
- Айдаров И. П.* Вопросы обоснования мероприятий по борьбе с засолением орошаемых земель.— В кн.: Теория и практика борьбы с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1971.
- Апполов Б. А.* Учение о реках. М.: Изд-во МГУ, 1952.
- Баер Р. А.* Методика расчета водно-солевого баланса орошаемых земель для различных условий.— В кн.: Материалы межведомственного совещания по мелиоративной гидрогеологии и инженерной геологии. Минск, 1969.
- Балаев Л. Г., Кочина П. Я., Марков Е. С., Решеткина Н. М.* Натурные исследования — основа технических решений и прогнозов в мелиорации.— Гидротехника и мелиорация, 1978, № 1.
- Барон В. А.* К вопросу прогноза солевого режима почвогрунтов.— В кн.: Теория и практика борьбы с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1971.
- Боровский В. М.* Геохимия засоленных почв Казахстана. М.: Наука, 1978.
- Бриджмэн П. В.* Анализ размерностей. М.: ОНТИ, 1934.
- Бунге В.* Теоретическая география. М.: Прогресс, 1967.
- Вавилов А. П., Гринев Э. И.* Водный баланс орошаемого участка в Голодной степи.— Вопросы гидротехники, 1969, вып. 30, Изд-во АН УзССР.
- Веников В. А.* Примерные теории подобия и физического моделирования в электротехнике. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949.
- Веников В. А.* Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. М.: Высшая школа, 1966.
- Веригин Н. Н.* Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелиорации и гидротехники. ИАП СССР, ОНТИ, 1953, № 10.
- Вернадский В. И.* Химическое строение биосферы земли и ее окружения. М.: Наука, 1965.

- Вернадский В. И.* Биосфера.—Избранные труды по биогеохимии. М.: Наука, 1967.
- Волобуев В. Р.* Промывка засоленных почв. Баку: Азернешр, 1948.
- Волобуев В. Р.* О промывных нормах при мелиорации засоленных земель.— Гидротехника и мелиорация, 1959, № 2.
- Волобуев В. Р.* Промывка и дренаж засоленных почв.— В кн.: Проблема засоления почв и водных источников. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
- Волобуев В. Р.* Об общей закономерности в процессах изменения солевых запасов в почвах орошаемых и мелиорируемых земель.— Почвоведение, 1964, № 5.
- Волобуев В. Р.* Количественные критерии оценки солевого режима орошаемых и мелиорируемых земель. Баку: Изд-во АН АзССР, 1967.
- Волобуев В. Р.* Расчет промывки засоленных почв. М.: Колос, 1975.
- Воронков П. П.* Гидрохимические обоснования выделения местного стока и способ расчленения его гидрографа.— Метеорология и гидрология, 1963, № 8.
- Воронков П. П.* Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР (основы гидрохимического принципа картирования). Л.: Гидрометеиздат, 1970.
- Вольфцун И. Б.* Расчеты элементов баланса грунтовых вод. М.: Гидрометеиздат, 1972.
- Гвишиани Л., Лисичкин В.* Прогностика. М.: Знание, 1968.
- Герасимов И. П.* Футурология в советской географии.— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1969, № 6.
- Глазовская М. А.* Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964.
- Глазовская М. А.* Техногенез и проблемы ландшафтно-геохимического прогнозирования.— Вестн. МГУ. Сер. V. География, 1968, вып. 1.
- Глушков В. Г.* Методы приближенного расчета стока при недостаточности гидрометрических данных.— В кн.: Труды II Всесоюз. гидрологического съезда в Ленинграде 20—27 апреля 1928, 1929, т. 2.
- Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977.
- Гнеденко Б. В.* Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1969.
- Горелов А. А., Момедов Н. М., Новик И. Б.* Философские вопросы моделирования.— В кн.: Философские вопросы естествознания. М.: Наука, 1976, ч. II.
- Денисов Ю. М., Сергеев А. И.* Расчет водного режима орошаемого массива, состоящего из отдельных участков.— Труды САРНИГМИ. 1976, вып. 39 (120).
- Звонкова Т. В.* Принципы и методы регионального географического прогнозирования.— Вестн. МГУ. Сер. V. География, 1972, № 4.
- Звонкова Т. В., Саушкин Ю. Г.* Проблемы долгосрочного географического прогноза.— Вестн. МГУ. Сер. V. География, 1968, № 4.
- Капица А. П., Симонов Ю. Г.* Основные проблемы регионального географического прогноза.— Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока, 1974, вып. 43.

- Карта типов химизма засоления почв СССР/Под ред. В. В. Егорова, Н. И. Базилевич. М.: ГУГК СССР, 1976.
- Кац Д. М. Режим грунтовых вод в орошаемых районах и его регулирование. М.: Сельхозиздат, 1963.
- Кац Д. М. Контроль режима грунтовых вод на орошаемых землях. М.: Колос, 1967.
- Керзум П. А. Закономерности развития засоленных почв и пути мелиоративного их освоения.— В кн.: Мелиорация почв Вахшской долины. Изд-во АН ТаджССР, 1957, т. 1.
- Кирпичев М. В. Теория подобия. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
- Кирпичев М. В., Конаков П. К. Третья теорема подобия.— Изв. ОТН АН СССР, 1949, № 1.
- Ковда В. А. Происхождение и режим засоленных почв. Т. 1, 2. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946—1947.
- Ковда В. А. Почвы аридной зоны как объект орошения. М.: Наука, 1968.
- Ковда В. А. Основы учения о почвах. М.: Наука, 1973.
- Ковда В. А. Биосфера, почвы и их использование.— В кн.: Материалы Международной конференции почвоведов. М.: Наука, 1974.
- Ковда В. А., Егоров В. В., Морозов А. Т., Лебедев Ю. Н. Закономерности соленакопления в пустынях Арало-Каспийской низменности.— Труды Почв. ин-та им. Докучаева, 1954, т. 44.
- Ковда В. А., Захарьина Г. В. Засоление орошаемых земель и их мелиорация в зарубежных странах. М.: Наука, 1969.
- Козловский Ф. И. Процесс соленакопления в почво-грунтах и методика его долгосрочного прогнозирования.— Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева, 1972, вып. V.
- Коноплянцев А. А. Применение методов математической статистики для анализа и прогноза режима уровня подземных вод.— В кн.: Методические указания. Сер. 79. М.: ВСЕГИНГЕО, 1967.
- Корнблум Э. А. О выборе методов прогнозирования изменений почв рисовых полей.— Почвоведение, 1978, № 2.
- Коронкевич Н. И. Характеристика водных ресурсов.— В кн.: Природные ресурсы Русской равнины в прошлом, настоящем и будущем. М.: Наука, 1976.
- Кочергин А. Н. Моделирование мышления. М.: Политиздат, 1969.
- Куделин Б. И. Подземный сток на территории СССР. М.: Изд-во МГУ, 1966.
- Кузьмин В. А. Прогноз изменения почвенного покрова котловин Северного Забайкалья в связи со строительством БАМ.— В кн.: Материалы III Всесоюз. совещ. по прикладной географии. Иркутск, 1975.
- Лебедев А. В. Методы изучения баланса грунтовых вод. М.: Госгеолтехиздат, 1963.
- Лебедев А. В. Методические рекомендации по изучению режима и баланса влаги в зоне аэрации в целях составления прогноза питания грунтовых вод. М.: ВСЕГИНГЕО, 1973.
- Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960.
- Лисичкин В. А. Теория и практика прогностики. М.: Наука, 1972.

- Львович М. И.* Опыт классификации рек СССР.—Труды ГГИ, 1938, вып. 6.
- Львович М. И.* Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974.
- Макаренко В. А.* О гидрохимическом районировании грунтовых вод по химическому составу малых рек.—ДАН СССР, 1950, т. 24, № 3.
- Минашина Н. Г.* Мелиорация засоленных почв. М.: Колос, 1978.
- Минашина Н. Г.* Физико-химическая модель расчета нормы воды для промывки засоленных почв.—Почвоведение, 1972, № 3.
- Мустафаев А. А., Асланов Г. К.* Эффективный метод определения параметров промывки засоленных почво-грунтов.—В кн.: Тез. докл. III Межведомств. совещ. по вопросам прогнозирования гидрогеологических, инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных условий. М., 1976, вып. 3.
- Новикова А. В.* Прогнозирование вторичного засоления почв при орошении. Киев: Урожай, 1975.
- Огиевский А. В.* О подземном питании р. Днепра.—В кн.: Исследования рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1933, вып. 4.
- Панин П. С.* Процессы солеотдачи в промываемых толщах почв. Новосибирск: Наука, 1968.
- Панин П. С.* Прогноз вторичного засоления почв в северных зонах орошаемого земледелия Сибири.—В кн.: Тез. докл. III Межведомств. совещ. по вопросам прогнозирования гидрогеол., инж.-геол. и почв.-мелиор. условий. М., 1976, вып. 3.
- Парфенова Н. И.* Методика анализа гидрохимического режима грунтовых вод в связи с его прогнозом при орошении. М., 1971.
- Пачепская Л. Б., Пачепский Я. А., Моргун Е. Г.* Использование методов теории размерностей для анализа изменения почвенно-мелиоративных условий при орошении.—Почвоведение, 1977, № 12.
- Пачепский Я. А., Пачепская Л. Б., Мироненко Е. В., Комаров А. С.* Моделирование водно-солевого режима почво-грунтов с использованием ЭВМ. М.: Наука, 1976.
- Перельман А. И.* Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975.
- Полынов Б. Б.* Процессы засоления и рассоления и солевой профиль почв.—Избр. труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956.
- Поляков Б. В.* Определение связи между подземными водами и поверхностным стоком.—Труды ЦИП, 1947, вып. 2 (29).
- Попов О. Ё.* Подземное питание рек. Л.: Гидрометеиздат, 1968.
- Рабочев И. С.* Мелиорация засоленных почв. Ашхабад: Туркмениздат, 1964.
- Рабочев И. С.* Мелиорация засоленных почв среднего течения Аму-Дарьи. Ашхабад: Туркмениздат, 1968.
- Расулов А. М.* Повышение плодородия почв хлопковой зоны. М.: Колос, 1976.
- Рахимбаев Ф. М., Ибрагимов Г. А.* Использование дренажных и грунтовых вод для орошения. М.: Колос, 1978.
- Резняков А. Б.* Метод подобия. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959.
- Рекс Л. М.* О прогнозе засоления почв после промывок.—Почвоведение, 1969, № 7.
- Рекс Л. М.* Прогноз переноса солей.—Гидротехника и мелиорация, 1970, № 8.
- Решеткина Н. М.* Вертикальный дренаж. М.: Колос, 1966.

- Решеткина Н. М., Сойфер А. М.* Прогноз минерализации стока горизонтальных дрен.— Хлопководство, 1976, № 3.
- Роде А. А.* Водный режим почв и его типы.— В кн.: Труды III Всесоюз. гидрогеол. съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1959, т. IX.
- Розовский Л. Б.* Введение в теорию геологического подобия и моделирования: (Применение природных аналогов и количественных критериев подобия в геологии). М.: Недра, 1969.
- Сабольч И., Дараб К., Варалли Д.* Прогноз и предотвращение процессов вторичного засоления почв при орошении в Венгерской низменности.— Почвоведение, 1972, № 1.
- Савельева Р. В.* Исследование солевого режима почво-грунтов под влиянием промывок на фоне вертикального дренажа.— В кн.: Теория и практика борьбы с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1971.
- Самойленко В. Г.* Методы натурного подобия в гидрогеологическом прогнозировании.— В кн.: Прогнозирование мелиоративных условий Средней Азии. Ташкент, 1974.
- Саушкин Ю. Г.* Географический прогноз антропогенных процессов в природе.— География в школе, 1968, № 3.
- Сватков Н. М.* Основы планетарного географического прогноза. М.: Мысль, 1974.
- Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977.
- Сляднев А. Ф.* Методы изучения баланса грунтовых вод. Ташкент; Изд-во АН УзССР, 1961.
- Соколенко Э. А.* Критическая скорость движения грунтовых вод — критерий засоленности почв.— В кн.: Тез. докл. на III Всесоюз. делегатском съезде почвоведов. Тарту, 1966.
- Соколенко Э. А., Делов В. М., Зеличенко Е. Н., Ковокин А. А.* Моделирование и управление водно-солевым режимом почв. Алма-Ата: Наука, 1976.
- Сочава В. Б.* Прогнозирование — важнейшее направление современной географии.— Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока, 1974, вып. 43.
- Степанов И. Н., Чембарисов Э. И.* Влияние орошения на минерализацию речных вод. М.: Наука, 1978.
- Уемов А. И.* Логические основы метода моделирования. М.: Мысль, 1971.
- Фелициант И. Н.* К вопросу о геоморфологическом строении и эволюции почвенного покрова левобережной части дельты Аму-Дарьи.— Изв. АН УзССР, 1953, № 2.
- Фридланд В. М.* Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972.
- Фриш М. А.* Ландшафтный прогноз и динамика ландшафтов.— Изв. ВГО, 1972, т. 104, № 6.
- Харченко С. И.* Гидрология орошаемых земель. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
- Ходжибаев Н. Н.* Естественные потоки грунтовых вод Узбекистана. Ташкент: Фан, 1970.
- Ходжибаев Н. Н., Самойленко В. Г.* Гидрогеолого-мелиоративные прогнозы. Ташкент: Фан, 1976.
- Ходжибаев Н. Н., Ковалев Ю. С.* Методика региональной оценки дренированности орошаемых земель в аридных условиях с учетом испаре-

- ния грунтовых вод. Ташкент: Мингео УзССР, НПО «Узбекгидрология», 1977.
- Чуев Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И.* Прогнозирование количественных характеристик. М.: Советское радио, 1975.
- Шестаков В. М.* К теории фильтрации растворов в грунтах.— В кн.: Вопросы формирования химического состава подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1963.
- Штофф В. А.* Моделирование и философия. М.; Л.: Наука, 1966.
- Щеглова О. П.* Питание рек Средней Азии. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1960.
- Шульгин Д. Ф.* Вопросы динамики подземных вод и солей в почво-грунтах орошаемых земель: — Автореф. докт. дис., М., 1972.
- Эйрес Р.* Научно-техническое прогнозирование и долгосрочное планирование. М.: Мир, 1971.
- Янг Э.* Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1974.

## СОДЕРЖАНИЕ

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| ВВЕДЕНИЕ . . . . . | 3 |
|--------------------|---|

### Часть I

#### ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НАТУРНОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ПОЧВЕННЫМ ПРОГНОЗАМ

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Общее представление о почвенных прогнозах . . .                                                                                          | 5  |
| Выявление условий применения метода натуральных ана-<br>логов при решении прогнозных задач в почвоведении                                | 10 |
| Нахождение критериев почвенного подобия для обос-<br>нованного изучения формирования ирригационно-ме-<br>лиоративных процессов . . . . . | 18 |

### Часть II

#### ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НАТУРНОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПОЧВЕННЫХ ПРОГНОЗОВ

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Опыт составления почвенных прогнозов методом на-<br>турных аналогов на примере орошаемого массива Ке-<br>гейли (аналог) и намечаемого к широкому орошению<br>массива Чимбай (объект) низовьев Амударьи . . . | 35 |
| ЛИТЕРАТУРА . . . . .                                                                                                                                                                                         | 77 |

**ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ СТЕПАНОВ**  
**ПОЧВЕННЫЕ ПРОГНОЗЫ**  
*последствия ирригационно-мелиоратив-*  
*ных мероприятий*

Утверждено к печати  
Институтом агрохимии и почвоведения АН СССР

Редактор издательства М. Е. Анцелович  
Художественный редактор Т. П. Поленова  
Технический редактор А. М. Сатарова  
Корректор К. П. Лосева

ИБ № 16029

Сдано в набор 10.08.79  
Подписано к печати 02.11.79  
Т-20505. Формат 60×90<sup>1/16</sup>  
Бумага № 2  
Гарнитура литературная  
Печать высокая  
Усл. печ. л. 5,25. Уч.-изд. л. 5,4  
Тираж 1000 экз. Тип. Зак. 4685  
Цена 80 коп.

Издательство «Наука»  
117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90  
2-я типография издательства «Наука»  
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10