

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ВЫПУСК

8

**Методические
вопросы**

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

МИНИСТЕРСТВО МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ПО ИЗЫСКАНИЯМ
И ИССЛЕДОВАНИЯМ ИНСТИТУТА «СОЮЗГИПРОВОДХОЗ»

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Научные исследования и изыскания

Выпуск 8. Методические вопросы

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ИЗДАНИЙ ДЛЯ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»
МОСКВА, 1987

ОТВЕТСТВЕННЫЕ РЕДАКТОРЫ:

Минкин Е. Л. (ИВП АН СССР),
Ядков В. Б. (СОИЗИ «Союзгипроводхоз»)

Редколлегия:

Буряков В. Я., Дьячков А. Б.,
Концевовский С. Я., Местечкин В. Б., Сойфер А. М.

Р $\frac{1903030200-425}{042(02)-87}$ 170-86-III

© Главная редакция изданий для зарубежных стран
издательства «Наука», 1987

СОДЕРЖАНИЕ

✓ Предисловие	5
✓ Воропаев Г. В., Местечкин В. Б. Методы определения суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур в зоне орошаемого земледелия СССР	11
Пряжинская В. Г., Лернер С. А. Экономические аспекты перспектив развития орошения на Северном Кавказе	27
Гельбух Т. М., Кутенкова Т. Н. Пространственная изменчивость внутригодового распределения элементов водного баланса водосборов рек в бассейне Иртыша	39
✓ Минкин Е. Л., Красильщиков Г. Л. К методике определения питания грунтовых вод или их расходования на испарение и транспирацию в условиях орошения	47
Кошелева Н. Е., Пашковский И. С. Численное моделирование влагопереноса в связи с прогнозом водного режима зоны аэрации при орошении	56
Голубев С. М., Сойфер А. М., Шмаков А. И. Особенности решения прогнозных мелиоративно-гидрогеологических задач численными методами	64
Хлыбов Г. Н. Оценка точности прогноза уровня грунтовых вод при фильтрации воды из канала	70
Мирошников Ю. П. Учет расходной части баланса подземных вод при оценке их эксплуатационных ресурсов	79
Мамонтов В. К. Влияние естественных запасов подземных вод в разделяющих толщах на формирование напорно-безнапорной фильтрации	83
Колочинский В. Ю. Применение регрессионного анализа при обработке данных наблюдений за уровнем подземных вод	90
Абрамов А. М., Соломин И. А. Определение эрозионно-допустимых поливных норм с учетом растительного покрова	99
Абрамов А. М., Соломин И. А. Опыт определения эрозионно-допустимых поливных норм светло-каштановых почв Волгоградской области	107
Попырина А. О. Антропогенные модификации ландшафтов Бенгальской дельты	114

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый сборник продолжает серию «Рациональное использование водных ресурсов. Научные исследования и изыскания». Выпуск составлен в основном по материалам работ специалистов СОИЗи института Союзгипроводхоз Минводхоза СССР, а также ИВП АН СССР (Воропаев Г. В., Местечкин В. Б., Пряжинская В. Г., Гельбух Т. М., Кутенкова Т. Н.), ВНИПИ экономики (Лернер С. А.), ЦИГиГЭ Мингео РСФСР (Кошелева Н. Е., Пашковский И. С.) и МИИЗ Минсельхоза СССР (Абрамов А. М.).

Выпуск открывается большой статьей Воропаева Г. В. и Местечкина В. Б., в которой рассмотрены и критически проанализированы советские и зарубежные методики оценки суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур. Рассмотренные методики основаны на метеорологической и биологической информации. Авторами предложен вариант биоклиматического метода. Изложены его положения и некоторые результаты.

В работе Пряжинской В. Г. и Лернер С. А. рассмотрены математические модели оптимального размещения водных ресурсов по отраслям сельского хозяйства Северо-Кавказского региона с целью определения наименьших суммарных затрат.

В статье Гельбух Т. М. и Кутенковой Т. Н. дан пример районирования водосборов рек бассейна Иртыша с учетом внутригодового распределения атмосферных осадков, испарения и стока. В основу районирования положен объективный математический метод.

В работе Минкина Е. Л. и Красильщикова Г. Л. рассматриваются методики определения инфильтрационного питания и испарения грунтовых вод с помощью парных пьезометров. Приводятся основы теоретического алгоритма и указывается на возможность разработки системы мониторинга инфильтрационного питания на этой основе.

Интерес вызывает новая статья Кошелевой Н. Е. и Пашковского И. С. о численной модели влагопереноса в зоне аэрации, совмещенной с вероятностной моделью климата. С помощью численного моделирования производится выбор оптимального режима орошения и расстояния между дренами.

Особенности решения прогнозных мелиоративно-гидрогеологических задач рассмотрены в статье С. М. Голубева, А. М. Сойфера и А. И. Шмакова.

Хлыбовым Г. Н. изучено влияние точности определения исходных геофильтрационных параметров на прогноз уровня грунтовых вод. Результаты работы могут быть использованы не только для оценки прогноза, но и для уточнения объема опытно-фильтрационных работ.

Мирошников Ю. П. в своей работе показывает (на примере Дамаской предгорной впадины, Сирия) возможность существенного повышения точности региональной оценки эксплуатационных ресурсов при анализе опыта эксплуатации подземных вод.

В статье А. О. Попыриной рассматриваются антропогенные изменения ландшафтов Бенгальской дельты. Даются прогнозы развития сельского хозяйства на равнинах Силхет, Читангонг и др.

В статье Мамонтова В. К. приведены расчеты процессов водопритока в горные выработки.

Выпуск заканчивается двумя новыми статьями Абрамова А. М. и Соломина И. А., в которых дается теоретическое обоснование рациональных норм и опыт расходования воды при орошении.

Редакционная коллегия надеется, что предлагаемый сборник представит интерес для научных работников, изыскателей, проектировщиков и других специалистов, работающих в области использования водных ресурсов и охраны окружающей среды.

PREAMBULO

El compendio que se ofrece continúa la serie "Aprovechamiento racional de los recursos hidráulicos. Investigaciones científicas y exploraciones".

La publicación está constituida principalmente por los materiales de los trabajos de los especialistas del Instituto Soyuzguiprovodjoz adjunto al Ministerio de Recursos Hidráulicos de la URSS, así como del Instituto de Problemas Hidráulicos de la AC de la URSS (G. Voropáev, V. Mestechkin, V. Priazhinskaya, T. Guélbuj, T. Kutenkova), del Instituto Nacional de Investigaciones Científicas y de Proyección Económica (S. Lérner), del Instituto Central de Hidrotécnica e Hidroenergética del Ministerio de Geología de la RSFSR (N. Kósheleva, I. Pashkovski) y del Instituto de Ingenieros Agrícolas de Moscú del (A. Abrámov).

La publicación comienza con un voluminoso artículo de G. Voropáev y V. Mestechkin, en el cual se examina y analiza críticamente los métodos nacionales y extranjeros de evaluación del consumo sumario de agua por los cultivos agrícolas. La metodología examinada está basada sobre la información meteorológica y biológica. Los autores proponen la variante del método bioclimático. Se exponen sus posiciones y algunos resultados.

En el trabajo de V. Priazhinskaya y S. Lérner se examinan los modelos matemáticos de distribución óptima de los recursos hidráulicos por las distintas ramas de la agricultura de la región Nordcaucasiana con objeto de determinar los mínimos gastos sumarios de agua.

En el artículo de T. Guélbuj y T. Kutenkova se da el ejemplo de regionalización de acumulaciones del agua fluvial de la vertiente del río Irtych teniendo en cuenta la distribución interna de las precipitaciones atmosféricas anuales, la evaporación y el escurrimiento. La regionalización se basa en el método matemático objetivo.

En el trabajo de E. Minkin y G. Krasilshikov se examina la metodología de determinación de la alimentación por infiltración y de la evaporación de las aguas freáticas por el método de piezómetros pares. Se exponen las bases del algoritmo teórico y se señala la posibilidad de elaboración sobre esta base de un sistema de monitoring de alimentación por infiltración.

Incita interés el nuevo artículo de N. Kósheleva e I. Pashkovski referente

al numérico de traslado de humedad en la zona de airación coincidente con la probabilidad del modelo climático. Sobre la base de la simulación numérica expuesta se hace posible la elección del régimen óptimo de riego y de la distancia entre los drenes.

Las peculiaridades de solución de problemas pronósticos de mejoras hidrogeológicas se examinan en el artículo de S. Gólubev, A. Sóyfer y A. Shmákov.

G. Jlíbov examina la influencia de la exactitud de determinación de los parámetros iniciales de geofiltración sobre el pronóstico del nivel de las aguas freáticas. Los resultados del trabajo pueden aplicarse tanto en la evaluación de la precisión del pronóstico, como en la determinación del volumen de trabajos experimentales de filtración.

Yu. Miróshnikov en su trabajo demuestra con el ejemplo de la depresión damasquina (Siria) la posibilidad de elevar substancialmente la precisión de evaluación regional de los recursos de explotación analizando la experiencia de explotación de las aguas subterráneas.

En el artículo de A. Popírina se examinan los cambios antropogénicos de los paisajes del delta del Bengala. Se dan pronósticos de desarrollo agrícola en las llanuras del Siljet, Chitangong y otros.

En el artículo de V. Mámontov se exponen los cálculos y las investigaciones del proceso de afluencia de agua en las excavaciones mineras.

La publicación termina con dos artículos nuevos de los autores A. Abrámov e I. Solomin en los cuales se da la fundamentación teórica de las normas racionales y la experiencia de consumo de agua en regadío.

El Consejo de redacción espera, que el compendio que se ofrece presente interés para los trabajadores científicos, exploradores y de diseño y para otros especialistas en la rama del aprovechamiento de los recursos hidráulicos y protección del medio ambiente.

al numérico de traslado de humedad en la zona de airación coincidente con la probabilidad del modelo climático. Sobre la base de la simulación numérica expuesta se hace posible la elección del régimen óptimo de riego y de la distancia entre los drenes.

Las peculiaridades de solución de problemas pronósticos de mejoras hidrogeológicas se examinan en el artículo de S. Gólubev, A. Sóyfer y A. Shmákov.

G. Jlíbov examina la influencia de la exactitud de determinación de los parámetros iniciales de geofiltración sobre el pronóstico del nivel de las aguas freáticas. Los resultados del trabajo pueden aplicarse tanto en la evaluación de la precisión del pronóstico, como en la determinación del volumen de trabajos experimentales de filtración.

Yu. Miróshnikov en su trabajo demuestra con el ejemplo de la depresión damasquina (Siria) la posibilidad de elevar substancialmente la precisión de evaluación regional de los recursos de explotación analizando la experiencia de explotación de las aguas subterráneas.

En el artículo de A. Popírina se examinan los cambios antropogénicos de los paisajes del delta del Bengala. Se dan pronósticos de desarrollo agrícola en las llanuras del Siljet, Chitangong y otros.

En el artículo de V. Mámontov se exponen los cálculos y las investigaciones del proceso de afluencia de agua en las excavaciones mineras.

La publicación termina con dos artículos nuevos de los autores A. Abrámov e I. Solomin en los cuales se da la fundamentación teórica de las normas racionales y la experiencia de consumo de agua en regadío.

El Consejo de redacción espera, que el compendio que se ofrece presente interés para los trabajadores científicos, exploradores y de diseño y para otros especialistas en la rama del aprovechamiento de los recursos hidráulicos y protección del medio ambiente.

INTRODUCTION

The present issue of the series *Optimum Water Management. Scientific Research* includes, mainly, works by the specialists of the SOIzI of the "Soyuzgiprovodkhoz" Institute, and also those by the workers of the Institute of Water Problems, USSR Academy of Sciences (G. Voropaev, V. Mestechkin, V. Pryazhinskaya, T. Gelbukh, T. Kutenkova), the VNIPI of Economics (S. Lerner), TsIG and GE of the Ministry of Geology of the RSFSR (N. Kosheleva, I. Pashkovsky) and MIIZ (A. Abramov).

The publication opens with an article by G. Voropayev and V. Mestechkin who examine and provide a critical analysis of techniques used at home and abroad to assess total water use by agricultural crops. The techniques are based on meteorological and biological data, and the authors propose a version of the bioclimatic method, presenting its principles and some results.

V. Pryazhinskaya and S. Lerner analyze mathematical models of optimal water resources distribution according to branches of agricultural economy in the North Caucasian region, to determine optimal overall costs.

T. Gelbukh and T. Kutenkova provide an example of Irtysh basin rivers catchment zoning with allowance for the distribution of atmospheric precipitation, evaporation and run off. The zoning is based on an objective mathematical method.

E. Minkin and G. Krasilshchikov examine a technique to determine infiltrational intake and evaporation of ground water by paired piezometers. Foundations of a theoretical algorithm are provided and a development of a system to monitor infiltrational supply is indicated as possible on the basis of this method.

Of interest is a new article by N. Kosheleva and I. Pashkovsky. It is devoted to a digital model of moisture transfer in the aeration zone, combined with a probabilistic climate model. This facilitates a choice of optimal irrigation conditions and of distances between the drains.

In their article, S. Golubev, A. Soifer and A. Shmakov consider solving reclamation and hydrogeological forecast problems.

G. Khlybov analyzes the impact of the accuracy of determination of initial geofiltrational parameters on the forecasting of ground-water level.

The results may be used in assessing forecast accuracy and in determining the scale of filtration-test work.

Yu. Miroshnikov, drawing on the Damascus piedmont depression (Syria) as an example, shows that it is possible to substantially increase the accuracy of regional assessment of usable water resources when analyzing the experience gained in ground water use.

A. Popyrina examines the anthropogenic changes in the Bengal delta landscapes. Forecasts of agriculture development in the Silhet, Chittagong, etc. valleys are provided.

V. Mamontov gives a computation and analyzes the process of water inflow into mining developments.

Two new articles by A. Abramov and I. Solomin with a theoretical substantiation of irrigation optimal rates and water expenditure experience conclude the issue.

The editors hope it will be of interest to the researchers, designers and other workers employed in water use and protection of the environment.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ЗОНЕ ОРОШАЕМОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ СССР

Г. В. Воропаев, В. Б. Местечкин

Расширение сельскохозяйственного производства в Советском Союзе, увеличение посевных площадей и интенсификация их использования обусловили широкое, нарастающее развитие орошаемого земледелия. Орошение развивается быстрыми темпами не только в аридных, традиционных для ирригации областях СССР, но и в зоне неустойчивого и даже избыточного естественного увлажнения.

В связи с этим сохраняется и повышается актуальность проблемы научного обоснования режима орошения сельскохозяйственных культур. Диапазон частных научных задач, объединенных в рамках этой проблемы, очень широк и генетически разнообразен. Он охватывает широкий комплекс вопросов водопотребления орошаемых сельскохозяйственных культур на основе физико-географических, технико-экономических, социальных, экологических и природоохранных факторов.

Одним из важнейших научных направлений в рамках указанной проблемы является разработка методов определения суммарного водопотребления в системе «почва – растение – атмосфера».

Этот уровень оценки, с нашей точки зрения, представляет собой физический базис решения проблемы ирригационного водопотребления в целом. Он позволяет определить значение суммарного водопотребления «нетто» и его пространственно-временную изменчивость в зависимости от природных факторов, биологических особенностей орошаемых растений и агротехники их возделывания. Он базируется на решении известного уравнения совместного водно-энергетического баланса корнеобитаемого слоя почвы, живого тела сельскохозяйственного растения и приземного слоя атмосферы.

Составляющие баланса задаются двумя основными способами: результатами непосредственных инструментальных измерений с последующей их агрегацией и результатами решения агрометеорологических уравнений, описывающих закономерности формирования отдельных составляющих баланса и соотношения между ними.

Способы первой группы весьма многообразны и позволяют оперативно следить за текущим водно-энергетическим состоянием орошаемых массивов путем измерения влажности почвы, суммарной радиации, испарения, состоянием посевов (физиологические характеристики) и других показателей.

Методы, входящие во вторую группу, предназначены для получения прогностических оценок водопотребления различного ранга.

Можно выделить два основных подхода к составлению и решению агрометеорологических уравнений.

1. Исследование процессов тепло-влагообмена для единичного сельскохозяйственного растения в условиях орошения с последующим обобщением результатов.

2. Исследование закономерностей формирования водопотребления полем сельскохозяйственных растений в целом с последующим обобщением результатов для более крупных территориальных единиц.

Оба подхода имеют право на существование и в известной степени дополняют друг друга. Однако в общем случае они применяются для решения различных водохозяйственных задач.

Методы определения водопотребления единичных растений очень кропотливы и трудоемки, требуют обширной и нередко уникальной исходной информации. Крайне низкая степень репрезентативности результатов, получаемых для единичного растения, очень затрудняет их пространственно-временное обобщение, недостаточно обеспечивает его достоверность и надежность. В то же время высокая точность единичного расчета водопотребления, достигаемая путем значительных экспериментальных и вычислительных усилий, теряется при пространственно-временном обобщении результатов. Она также не является необходимой при решении многих задач практики орошаемого земледелия ввиду неравноточности с другими составляющими комплекса ирригационных расчетов. На современном этапе научной разработанности и в условиях отсутствия достаточной базы исходной информации методы определения суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур, входящие в первую группу, перспективны для решения сугубо локальных ирригационных задач. Они эффективны для оперативного управления режимом орошения небольших массивов, однородных по всем показателям и изученных детальнейшим образом.

В ирригационной практике для обоснования режимов орошения крупных сельскохозяйственных систем широко применяются методы, основанные на учете закономерностей формирования водопотребления полем сельскохозяйственных растений в целом. Они, конечно, менее детальные, чем методы первой группы. Однако лучшие из них имеют хорошее физическое обоснование, обеспечены исходной информацией, характеризуются надежностью и допустимой точностью результатов.

В последние годы такие методы получили широкое распространение в практике орошаемого земледелия. Не следует забывать, что все они имеют достоинства и недостатки, ту или иную сферу применения. В каждом конкретном случае выбор расчетного метода определения суммарного водопотребления должен быть обоснован постановкой водохозяйственной задачи, возможностью его применения в заданном

пространственно-временном диапазоне и наличием исходной информации.

Рассмотрим основные методы, применяющиеся в условиях орошаемого земледелия СССР.

Группа методов турбулентной диффузии (градиентных) разработана М. И. Будыко, А. А. Скворцовым и другими исследователями. Они основаны на определении турбулентной диффузии водяного пара, обуславливающей влагообмен между подстилающей поверхностью и атмосферой. Закон ярусности конвективного тепло- и влагообмена выражается в импульсивном переходе тепла и влаги из припочвенного яруса в следующий тонкий ярус атмосферы. В пределах яруса предполагается замкнутая циркуляция. Скорость испарения dE_c/dt в приземном слое воздуха над однородной подстилающей поверхностью выражается уравнением

$$E_c = \rho k \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (1)$$

где t — время; q — удельная влажность воздуха; ρ — плотность воздуха; k — коэффициент турбулентного обмена; $\partial q/\partial z$ — вертикальный градиент удельной влажности; после интегрирования уравнения по z получается уравнение

$$E_c = \rho k_1 \frac{q_{z_1} - q_{z_2}}{\ln(Z_1/Z_2)}, \quad (2)$$

где k_1 — коэффициент обмена на единичной высоте; Z_1 и Z_2 — высоты измерения влажности (q) в приземном слое.

Таким образом, для определения водопотребления методом турбулентной диффузии необходимы градиентные наблюдения над температурой воздуха и влажностью на двух высотах, знание коэффициента турбулентности, который зависит от данных градиентных измерений скорости ветра и температуры воздуха. Метод за счет погрешностей измерительных приборов, наблюдателей и т. д. может давать ошибки 30–40% и более.

Метод теплового баланса является одним из наиболее физически обоснованных. Он связан с решением уравнения теплового баланса

$$R = LE + P + B, \quad (3)$$

где R — радиационный баланс; P — турбулентный теплообмен; B — теплообмен в почве; LE — затраты тепла на испарение (L — скрытая теплота испарения).

Радиационный баланс измеряется непосредственно приборами. Члены P и B (кал/см² · мин) определяются по данным градиентных наблюдений за температурой и влажностью воздуха. В наиболее простом

варианте метода теплового баланса получается расчетная зависимость вида

$$E_c = \frac{P - B}{1 + 0,64 \frac{\Delta T}{\Delta l}}, \text{ мм/час,} \quad (4)$$

где ΔT —градиент температуры; Δl —градиент влажности воздуха на двух высотах наблюдений.

Средняя квадратическая ошибка метода составляет для месяцев и декад величину $\pm 15\%$. Сейчас в Советском Союзе работает около 70 теплосбалансовых станций. Срок продолжительности наблюдений на них составляет 10 лет и более. Однако метод не обеспечивает достаточной точности в пасмурную погоду, ночью и в сумерки, в условиях пересеченной местности. Метод также не рекомендуется применять для условий очень сухих районов (пустынь и полупустынь), где точность определения составляющих уравнения теплового баланса современными средствами пока является недостаточной.

Многие исследователи предлагают учитывать затраты воды растениями путем определения коэффициента суммарного водопотребления или удельного суммарного водопотребления на единицу урожая.

Широко известна формула А. Н. Костякова, имеющая вид:

$$E_c = Y E_y, \text{ м}^3/\text{га,} \quad (5)$$

где E_c —суммарное водопотребление, $\text{м}^3/\text{га}$; E_y —коэффициент водопотребления, учитывающий климатические условия, биологию растений, свойства почвы, агротехнику, урожайность и т. д., определяемый эмпирически; Y —урожайность, ц/га .

На той же основе, что и формула А. Н. Костякова, построены зависимости С. Н. Рыжова, В. М. Легостаева, Б. С. Конькова и многих других авторов. Они широко применяются в орошаемых хозяйствах За-волжья, Киргизии (бассейн р. Чу), Украины и других районов зоны орошения СССР.

Формула А. Н. Костякова и близкие к ней зависимости включают в себя коэффициент водопотребления или транспирации, величина которых весьма непостоянна.

По данным В. Р. Вильямса, А. М. Алпатьева и других исследователей, коэффициент транспирации колеблется в очень широком диапазоне: для пшеницы—от 217 до 755, для хлопчатника—от 350 до 1651, для люцерны—от 446 до 1210 и т. п. Даже для одного и того же пункта при одинаковой влажности почвы, но при различных метеорологических характеристиках воздуха транспирационные коэффициенты фиксированной культуры могут меняться в 2–3 раза. Несколько более устойчивыми являются коэффициенты водопотребления, но и они нуждаются в многочисленных, пока недостаточно изученных и трудно учитываемых поправках и не могут считаться достаточно обоснованными.

Большую группу зависимостей составляют методы, опирающиеся на совместный учет элементов теплового и водного баланса (иногда с использованием некоторых эмпирических соотношений). Сюда относятся методики Торнвейта и Мазера и др. Формула Торнвейта и Мазера основана на эмпирической зависимости между средней температурой воздуха и потенциальной эвапотранспирацией. Она имеет вид:

$$E_{p_i} = 1,6 \left(10 \frac{T}{I} \right)^a, \quad (6)$$

где E_{p_i} — месячная потенциальная эвапотранспирация (см); T — средняя месячная температура ($^{\circ}\text{C}$); I — тепловой индекс, постоянный для конкретной местности и являющийся функцией T ; a — эмпирический коэффициент, являющийся функцией.

Таким образом, для определения E_{p_i} необходимо иметь данные лишь по температурному режиму и географической широте исследуемой территории. Это обусловило большую популярность метода Торнвейта и Мазера за рубежом. Однако узкая региональность числовых параметров зависимости существенно затрудняет ее широкое применение.

В основу метода Х. Л. Пенмана положено использование упрощенного уравнения теплового баланса

$$E_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \frac{R}{L} + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}; \quad (7)$$

$$E_a = 0,35(1 + 0,537I) \cdot (l_a - l_d) = 0,75Q - K_{\text{эф}},$$

где E_0 — потенциальная эвапотранспирация; R — радиационный баланс; Q — суммарная радиация; L — удельная теплота парообразования; $K_{\text{эф}}$ — эффективное излучение; I — скорость ветра; l_a — упругость насыщения водяного пара; l_d — парциальное давление водяного пара; Δ/γ — коэффициент, зависящий от температуры воздуха.

Для случаев, когда затруднено получение всех требуемых для формулы Пенмана показателей, Линэком предложено ее упрощение, требующее лишь определения температуры

$$E = \frac{700 \cdot \tau_m (100 - A) + 15 (\tau - \tau_d)}{80 - \tau} \text{ (мм/сутки)}, \quad (8)$$

$$\tau_m = 0,006h + \tau,$$

где h — высота над уровнем моря (м); τ — средняя температура; A — широта места; τ_d — средняя точка росы.

Среднемесячные значения $(\tau - \tau_d)$ могут быть взяты из таблиц или вычислены по формуле (для случаев, когда величина среднемесячных осадков не менее 5 мм, а $(\tau - \tau_d)$ — не менее 4°C)

$$(\tau - \tau_d) = 0,0023h + 0,53R + 0,35R_{am} + 0,37\tau - 10,9^\circ\text{C},$$

где R — среднемесячная амплитуда температур; R_{am} — амплитуда среднемесячных температур самого теплого и самого холодного месяца.

✓ Экспериментальная проверка формулы проведена для условий различных климатических районов СССР. Она показала среднее отклонение расчетной скорости эвапотранспирации от определенной экспериментально в размере 0,3 мм/сутки для среднегодовых, 0,5 мм/сутки для среднемесячных, 0,9 мм/сутки для недельных и 1,5 мм/сутки для среднесуточных значений эвапотранспирации.

Л. Тюрк на основании лизиметрических исследований разработал полуэмпирическую зависимость для определения испарения за небольшие промежутки времени с почвы, покрытой растительностью. Суммарное испарение E (мм/декада) вычисляется по формуле

$$E_c = \frac{p + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{p + a}{l} + \frac{V}{2l}\right)^2}}, \quad (9)$$

где p — осадки за декаду; a — изменение влагосодержания оголенной почвы за декаду; V — «фактор растительности», зависящий от прироста сухой массы растений, дефицита влажности почвы и др.; l — индекс максимального декадного испарения с оголенной почвы, зависящей от температуры воздуха и суммарной солнечной радиации.

Экспериментальная проверка зарубежных методов в условиях нашей страны показала, что не все из них обеспечивают удовлетворительную точность особенно в аридных зонах и в течение весеннего переходного периода.

М. И. Будыко был предложен комплексный метод определения суммарного испарения, уточненный Л. И. Зубенок. Он основан на совместном решении уравнений теплового и водного балансов при учете зависимости скорости испарения от влажности почвы, установленной экспериментально.

По М. И. Будыко, величина испарения E_c равна испаряемости E_0 при влажности верхнего слоя почвы W выше критического значения W_0 и пропорционально испаряемости и влажности верхнего слоя почвы (при W ниже критического значения W_0). Основные расчетные зависимости комплексного метода имеют вид (для интервала времени — месяц, год)

$$E_c = E_0 \text{ при } W \geq W_0;$$

$$E_c = E_0 \text{ при } W < W_0, \quad (10)$$

где W —количество продуктивной влаги в активном для растений слое почвы, принятом толщиной 1 м.

Испаряемость определяется на основе пропорциональности испарения с увлажненной поверхности дефициту влажности воздуха, определенному по температуре испаряющей поверхности. Формула E_0 представляет собой весьма сложную зависимость, включающую теплобала-лансовые, влажностные и другие параметры. Для практического применения М. И. Будыко и Л. И. Зубенок были разработаны графики, по которым определяется величина E_0 в зависимости от среднего месячного дефицита влажности воздуха и климатических условий (зона по геоботанической карте) A , т. е.

$$E_0 = f(d, A).$$

Значение критической влажности почвы W_0 определялось из соотношения $W_0 = E_0/EW$. Величины E_0 устанавливались по приведенной выше формуле, E_c —по уравнению водного или теплового баланса, средние месячные влагозапасы почвы берутся из агроклиматического справочника, как $W = W_1 + W_2/2$, где W_1 и W_2 —влагозапасы на начало и конец месяца. Такие расчеты были выполнены по 90 пунктам СССР.

По данным ряда исследователей и также в соответствии с «Рекомендациями по расчету испарения с поверхности суши» относительная стандартная ошибка комплексного метода достигает 20–30%.

В последние годы широкое применение получил метод А. Р. Константинова, основанный на принципе турбулентной диффузии, но использующий только данные стандартных метеорологических наблюдений. Суть этого метода заключается в использовании соотношений

$$E_c = \rho k \partial q / \partial z. \quad (11)$$

Обозначения прежние (T —температура воздуха, величины вертикальных градиентов скорости ветра— I , испарение воздуха— e). Они находятся по исправленным стандартным значениям T и e . Величины поправок, учитывающие инерционность тепло- и влагообмена между подстилающей поверхностью и стандартным уровнем 2,0 м, даются в виде таблиц.

Методика А. Р. Константинова проста и доступна. Она учитывает по соответствующим графикам влияние различных сельскохозяйственных культур на испарение, однако на точность расчетов оказывает большое влияние расположение отдельных метеостанций. Смена синоптической ситуации также может резко исказить ее. Средние месячные отклонения от эталонных методов водного баланса и испарителей несмотря на вве-

дение различных поправок, по данным А. Р. Константинова, достигают 30–35%. В отдельных случаях возможны ошибки в 1,5–2 раза.

Влияние биологии растения на величину и характер его водопотребления убедительно доказаны многими отечественными и зарубежными исследователями, такими, как А. Н. Костяков, А. М. Алпатьев, И. А. Максимов, П. С. Петин, С. М. Рыжов, С. И. Харченко, Х. Ф. Блэни и У. Д. Криддл, Р. О. Слейчер и другими.

В литературе приводится и обосновывается значительное число формул, графиков, коэффициентов, определяющих качественно и количественно биологический аспект водопотребления на сегодняшний день.

Рассмотрим наиболее разработанные для практического использования и дающие относительно надежные результаты методы определения водопотребления, учитывающие биологию растений.

Группа формул И. А. Шарова отражает эмпирическую зависимость водопотребления растений от температуры воздуха, влажности и силы ветра и имеет вид

$$E = aT + 4B, \text{ м}^3/\text{га}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{при сильном ветре} \quad E' &= E(1 + 0,02I), & \text{м}^3/\text{га} \\ E &= Ba(T - T_0), & \text{м}^3/\text{га} \\ E &= 2B(1 + 0,02I + B)(T - T_0) + T(1 + 0,02I) \times \\ &\quad \times 0,5a, \end{aligned}$$

где I – скорость ветра (м/сек); T – средняя суточная температура воздуха за расчетный период, °С; T_0 – средняя разность показаний сухого и смоченного термометров (психометрическая разность), °С; B – продолжительность расчетного периода, в днях; a – коэффициент расхода воды полем на 1°С (положительный) температуры воздуха, м³/га.

Г. К. Льгов модифицировал формулу И. А. Шарова для условий Северного Кавказа, получив

$$E = K\Sigma T, \quad (13)$$

где K – коэффициент, аналогичный a .

Зависимости И. А. Шарова и различные их модификации широко применяются в практике орошения. Несмотря на свой эмпиризм, они дают надежные и весьма точные результаты. Среднее отклонение их от метода водного баланса составляет 10–15%, однако экстремальные ошибки могут достигать 200%, особенно в условиях переменного увлажнения.

Значение параметра a , так называемого биофизического коэффициента, определено не для всей орошаемой зоны и не совсем стабильно во времени.

За рубежом применяется способ Х. Ф. Блэни и У. Д. Криддла. В нашей стране он проверялся Л. В. Дуниным – Барковским, С. А. Миркиным, М. Е. Осташевой, Л. И. Зубенок и другими авторами.

Формула метода имеет вид

$$E_T = 25,4 KF, \quad (14)$$

где E_T —эвапотранспирация (см) в условиях орошения; T —средняя месячная температура воздуха ($^{\circ}F$); p —процентное отношение светлого времени суток за месяц к световому времени суток за год; K —эмпирический коэффициент, зависящий от вида культуры, климатических условий и имеющий годовой ход.

Большинство советских авторов, проверяющих этот метод в условиях СССР, отмечают занижение результатов в районах недостаточного увлажнения летом на 10–30% и завышение их на 10–20% в зонах достаточного увлажнения. Таким образом, по данным различных советских исследователей, следует сделать вывод о рациональности использования зависимости Блэйн — Кридла только в условиях, близких к условиям, в которых она была получена.

Метод А. И. Будаговского по нашему мнению, является в настоящее время одним из наиболее всесторонне обоснованных и надежных способов расчета водопотребления. Он основан на учете тепло- и влагообмена в системе «почва — растение — атмосфера». Теоретические исследования А. И. Будаговского тесно связаны с экспериментальными, взаимно уточнены.

А. И. Будаговский предлагает ряд зависимостей, связанных единой теоретической основой, но в различной степени упрощенных и модифицированных, в зависимости от постановки задачи и наличия исходной информации. Они позволяют определить транспирацию растениями и испарение с поверхности сельскохозяйственного поля. Затем по уравнению водного баланса корнеобитаемого слоя почвы определяется оросительная норма. Параметрами модели являются дефицит влажности воздуха, составляющие радиационного баланса на верхней границе растительного покрова и на поверхности почвы, теплообмен в почве, скорость ветра, относительная площадь листьев и всей поверхности растений (отношение площади листьев к общей площади посева), влажность и критическая влажность почвы, ординаты биологических кривых водопотребления растений, ряд эмпирических коэффициентов и стандартные составляющие уравнения водного баланса корнеобитаемого слоя почвы.

Точность расчетов по модели А. И. Будаговского достигает 3–5% по сравнению с эталонным методом.

Весьма широко применяется для определения режимов орошения тепловодно-балансовый метод С. И. Харченко. Он апробирован в орошаемых хозяйствах Поволжья, Ростовской области, Казахстана, Украины и дал хорошие результаты. Основная его зависимость имеет вид

$$D = E_{\text{сop}} - E_c. \quad (15)$$

Формула метода имеет вид

$$E_T = 25,4 KF, \quad (14)$$

где E_T — эвапотранспирация (см) в условиях орошения; T — средняя месячная температура воздуха ($^{\circ}F$); p — процентное отношение светлого времени суток за месяц к световому времени суток за год; K — эмпирический коэффициент, зависящий от вида культуры, климатических условий и имеющий годовой ход.

Большинство советских авторов, проверяющих этот метод в условиях СССР, отмечают занижение результатов в районах недостаточного увлажнения летом на 10–30% и завышение их на 10–20% в зонах достаточного увлажнения. Таким образом, по данным различных советских исследователей, следует сделать вывод о рациональности использования зависимости Блэйн — Криддла только в условиях, близких к условиям, в которых она была получена.

Метод А. И. Будаговского, по нашему мнению, является в настоящее время одним из наиболее всесторонне обоснованных и надежных способов расчета водопотребления. Он основан на учете тепло- и влагообмена в системе «почва — растение — атмосфера». Теоретические исследования А. И. Будаговского тесно связаны с экспериментальными, взаимно уточнены.

А. И. Будаговский предлагает ряд зависимостей, связанных единой теоретической основой, но в различной степени упрощенных и модифицированных, в зависимости от постановки задачи и наличия исходной информации. Они позволяют определить транспирацию растениями и испарение с поверхности сельскохозяйственного поля. Затем по уравнению водного баланса корнеобитаемого слоя почвы определяется оросительная норма. Параметрами модели являются дефицит влажности воздуха, составляющие радиационного баланса на верхней границе растительного покрова и на поверхности почвы, теплообмен в почве, скорость ветра, относительная площадь листьев и всей поверхности растений (отношение площади листьев к общей площади посева), влажность и критическая влажность почвы, ординаты биологических кривых водопотребления растений, ряд эмпирических коэффициентов и стандартные составляющие уравнения водного баланса корнеобитаемого слоя почвы.

Точность расчетов по модели А. И. Будаговского достигает 3–5% по сравнению с эталонным методом.

Весьма широко применяется для определения режимов орошения тепловодно-балансовый метод С. И. Харченко. Он апробирован в орошаемых хозяйствах Поволжья, Ростовской области, Казахстана, Украины и дал хорошие результаты. Основная его зависимость имеет вид

$$D = E_{\text{сop}} - E_{\text{с}}. \quad (15)$$

Суммарное испарение (фактическое) E_c определяется по стандартному уравнению водного баланса зоны аэрации. При этом вводятся нижний и верхний критерии оптимума увлажнения незасоленной и засоленной почвы, определяемые по соответствующим зависимостям.

Оптимальное суммарное испарение $E_{оп}$ определяется в зависимости от радиационных и метеорологических условий, биофизических особенностей развивающегося растительного покрова, создающего в приземном слое специфические условия

$$E_{оп} = \frac{R - P - B}{L}, \quad (16)$$

где R — радиационный баланс; B — поток тепла в почву; P — турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы. P и B зависят от типа метеорологических условий, вида и фазы развития растений. В другой записи формула имеет вид

$$E_{оп} \approx \beta \frac{R}{L} \text{ или } E_{оп} \approx \beta E_0,$$

где β — биологический параметр культуры, учитывающий влияние особенностей развития на испарение.

Испаряемость E_0 определяется по методам М. И. Будыко, Л. И. Зубенок или А. Р. Константинова.

Метод С. И. Харченко дает достаточно надежные результаты, однако для проведения расчетов во всем диапазоне природных условий зоны орошения СССР необходимо уточнить значение параметра для различных физико-географических и агротехнических условий и детализировать их по видам сельскохозяйственных культур.

Широкое распространение в научной и проектной практике получил биоклиматический метод расчета режима орошения сельскохозяйственных культур, теоретические и практические основы которого разработаны А. М. Алпатьевым и С. М. Алпатьевым.

Главная идея метода заключается в том, что при оптимальной влагообеспеченности водопотребление растений зависит не только от географических условий среды, но и от их биологических особенностей. В общем виде эти закономерности выражаются зависимостью

$$E = K_B \cdot E_0, \text{ мм} \quad (17)$$

где E — водопотребление (суммарное испарение) с орошаемого поля, мм; E_0 — испаряемость, мм; K_B — биологический коэффициент водопотребления (испарения).

По А. М. Алпатьеву, биологический коэффициент K_B отражает сложившийся в филогенезе наследственный ритм развития растений, связанный с сезонным ритмом климата; ход накопления растительной массы одновременно с качественным изменением самого растения; сте-

пень затенения почвы и устойчивость фитолимата, т.е. в основном биологические особенности водопотребления растений.

Глубокие исследования А. М. Алпатьева послужили базой для развития, практического обоснования и внедрения биоклиматического метода в различных районах Советского Союза, начиная с Ленинградской и Тюменской областей (север страны) и кончая югом Средней Азии. В этой области известны разработки С. М. Алпатьева, А. К. Абдулаева, Г. Г. Белобородовой, М. Г. Голченко, Н. В. Данильченко, М. И. Каплинского, Л. П. Косовой, В. И. Костина, В. П. Остапчика, Э. А. Струнникова, П. И. Шабалина, коллектива под руководством В. Р. Шредера, Д. И. Штойко и многих других исследователей.

За рубежом подобные исследования выполнялись Д. Велевым, Г. Марковым, И. Делибалтовым, И. Цоневым, Х. Христовым, М. Пихой и др.

Расчеты водопотребления сельскохозяйственных культур биоклиматическим методом основаны на использовании стандартных данных метеорологических и агрогидрогеологических наблюдений, выполняемых на сети станций Гидрометеорологической службы СССР. Основная сложность расчета заключается в подборе репрезентативных для данного района значений биологического коэффициента K_B , которые определены их авторами для конкретных опытных сельскохозяйственных полей, расположенных в той или иной почвенно-климатической зоне.

Для массовых расчетов режима орошения на территории СССР, отличающейся неоднородностью почвенно-климатических условий, необходимо достаточно четко определить ареалы применения тех или иных значений K_B , предложенных различными авторами, установить эти значения для всех природных зон, оценить их изменчивость.

Известны попытки оценить пространственную изменчивость биологических коэффициентов. Ю. Т. Карандеев построил схематическую карту изменчивости K_B зерновых культур для Европейской территории СССР, из которой следует, что биологические коэффициенты водопотребления уменьшаются с севера на юг — от 0,65 (северо-запад) до 0,40 (южные районы ЕТС). Э. А. Струнников, проанализировав данные различных авторов, отметил, что даже в пределах Европейской территории Советского Союза K_B существенно отличаются друг от друга. На северо-западе они колеблются в пределах 0,50–0,70, на юге ЕТС — 0,35–0,48. В орошаемых районах Узбекистана K_B понижается до 0,22. Практически биологические коэффициенты в зависимости от почвенно-климатических условий изменяются от 0,7 до 0,2. Для отдельных почвенно-климатических зон значения K_B также меняются в зависимости от почвенно-климатических условий в период вегетации. Так, для северо-запада Э. А. Струнников дает значение биологического коэффициента (среднего за вегетацию) для крайне засушливого и влажного лета соответственно 0,45 и 0,65. Степень засушливости он выражает через сумму дефицитов влажности воздуха (мб).

На сегодняшний день практически не существует достаточно четких и полных указаний для интерполяции значений биологических коэффициентов на всей территории орошаемой зоны СССР для различных сельскохозяйственных культур. В то же время специальные исследования показывают, что использование одних и тех же коэффициентов в различных почвенно-климатических зонах приводит к существенным ошибкам. Например, применение коэффициентов, разработанных для юга ЕТС, в условиях Ленинградской области (северо-запад) дают ошибку в 45–50%. По нашим данным, применение этих коэффициентов в Белоруссии, Центральном районе, Западной и Восточной Сибири, Южном Казахстане в среднем приводит к ошибкам соответственно 30, 29, 29, 35, 25%.

Нами разработана схема интерполяции экспериментальных K_B на основной части орошаемой зоны СССР и определен географический диапазон их применения.

Коэффициенты K_B , как указывают их авторы, определялись по стандартной методике, которая выражается зависимостью

$$K_B = \frac{E}{E_0} \quad (18)$$

Обозначения прежние, однако значение испаряемости E_0 определялось двумя путями:

Иванов
$$E_0 = K \cdot 0,0018 (25 + T)^2 \cdot (100 - f), \text{ мм} \quad (19)$$

или

Александров
$$E_0 = K \Sigma d, \text{ мм}, \quad (20)$$

где T – средняя месячная температура воздуха, °C; f – среднемесячная относительная влажность воздуха, %; Σd – сумма средних суточных дефицитов влажности воздуха за расчетный период, в мб; K – суммарный коэффициент, учитывающий микроклиматическую, редуционную, температурную и другие поправки, различные у каждого автора.

Формула (20) является упрощенной формой зависимости (19) и тесно связана с ней. Следовательно, биологические коэффициенты K_B , полученные по этим формулам, также должны быть связаны между собой.

Нами составлена таблица взаимного перевода K_B , полученных по обеим формулам (19) и (20), и осреднена для всех реальных значений относительной влажности. Связь $K_{B(19)}$, $K_{B(20)}$ носит нелинейный характер и зависит от температуры воздуха, причем величина отношения $K_{B(19)}$ к $K_{B(20)}$ возрастает с ее повышением.

По данным авторов, значения K_B определялись в различные по энергетическим параметрам периоды времени и затем осреднялись, поэтому при переводе следует ориентироваться на среднюю для расчетного интервала времени температуру воздуха или на среднюю расчетную сум-

му температур (для таблиц K_B , где он привязан к нарастающей сумме температур воздуха).

Таблица перевода была проверена по реальным значениям биологических коэффициентов известных нам наборов K_B для различных сельскохозяйственных культур.

Средняя величина относительных отклонений, рассчитанных K_B от экспериментальных, составила 3–7%, максимальная – 11%.

На основе таблицы перевода все известные нам наборы биологических коэффициентов были приведены к одному виду по формулам (18) и (20) и получены их средние значения за вегетацию. Затем были построены графические зависимости между этими средними значениями K_B и соответствующими суммами дефицитов влажности воздуха за периоды оптимального водопотребления для различных сельскохозяйственных культур (периоды оптимального водопотребления принимались по стандартным мелиоративным положениям).

Эмпирические точки на графиках этих зависимостей легли достаточно тесно и закономерно, образовав однозначные графические криволинейные зависимости. Некоторое рассеяние эмпирических точек, по нашему мнению, объясняется погрешностями при экспериментальном определении биологических коэффициентов их авторами, различиями в почвенных и других природных условиях на участках определения K_B , биологическими особенностями транспирации и рядом других подобных причин.

Для проверки полученных кривых связи для различных природных зон (по материалам Гидрометеослужбы и Госсортсети) нами по формуле (18) были рассчитаны средние за вегетацию биологические коэффициенты водопотребления сельскохозяйственных культур. При этом были использованы данные лишь для лет, когда влажность почвы была оптимальной (0,60–0,80 НВ), а урожай достаточно высокие. Полученные таким образом аналитические значения K_B хорошо совпали с реальными и удовлетворительно наложались на графики, подтвердив кривые графических зависимостей. ✓

Исследование биологических коэффициентов водопотребления было выполнено для всех основных орошаемых культур (зерновые, овощные, плодово-ягодные и т.д.).

Все экспериментальные данные, прошедшие соответствующую отбраковку, сведены в единый массив, организованный для каждой сельскохозяйственной культуры в соответствии с диапазоном измерения величины дефицита влажности воздуха, принятым согласно наличию экспериментальных данных. Этот диапазон постоянно расширяется по мере накопления данных. На сегодняшний день он охватывает практически всю зону орошения Советского Союза. 9/6

Обращение к массиву K_B выполняется по трем основным показателям: среднему за период значению дефицита влажности воздуха (от всходов или высадки рассады) и виду сельскохозяйственной культуры.

В настоящей статье нет необходимости детально излагать технологию применения метода интерполяции биологических коэффициентов, мы ограничились изложением основных его принципов.

В течение 1977–1984 гг. метод был апробирован для различных районов орошаемой зоны СССР, существенно расширен диапазон его применения, в первую очередь путем расширения массива экспериментальных значений K_B , их уточнения, введения биологических коэффициентов для новых видов орошаемых сельскохозяйственных культур.

Принципиальное значение имеет коррекция метода интерполяции биологических коэффициентов в целях снижения погрешности осреднения K_B в течение периода вегетации. На первом этапе применения метода на основе суммы среднесуточных дефицитов влажности и температуры воздуха расчетного пункта определялось среднее за вегетацию значение биологического коэффициента и соответственно выбирался набор K_B для конкретного расчетного периода. Таким образом, наборы биологических коэффициентов принимались различными не только для каждого района, но и для фиксированного расчетного района (пункта) в разные по тепловлагообеспеченности сезоны вегетации. Такой прием лишь косвенно позволял учитывать динамику водопотребления внутри периода вегетации. В то же время анализ функционирования метода интерполяции K_B показал значительное разнообразие возможных вариантов внутривегетационного распределения дефицита водопотребления даже при близких по величине средневегетационных значениях биологического коэффициента и соответственно дефицита водопотребления. В настоящее время метод пространственной интерполяции биологических коэффициентов модифицирован с целью устранения указанного недостатка. Введен скользящий внутри периода вегетации способ выбора значений K_B , т.е. одновременно в единичном расчете задействовано несколько вегетационных наборов биологических коэффициентов, в зависимости от изменения значений дефицита влажности и температуры воздуха в течение периода вегетации. Согласно исследованиям в области физиологии растений, сельскохозяйственные культуры корректируют свой филогенез в связи с изменением гидрометеорологической обстановки в течение 3–10 суток, в зависимости от фазы развития растений, степени и характера воздействия и т.п. Выполненный на основе этих данных анализ водопотребления показал допустимость скользящего способа выбора биологических коэффициентов для внутривегетационных расчетных временных интервалов – декады и более. При этом максимальные погрешности расчета по сравнению с эталонным методом экспериментального водного баланса не превышают стандартно принятых погрешностей биоклиматического метода.

Широкое апробирование метода во всем диапазоне природных условий зоны орошения СССР дало удовлетворительные результаты.

Погрешности по сравнению с эталонным методом водного баланса

(данные натурных и численных экспериментов) составили для месяца и периода в целом соответственно 7-15 и 4-10%.

Наибольший эффект от применения метода достигается для зон достаточного и переменного естественного увлажнения, а также засушливой зоны. Для острозасушливых условий пустынных и полупустынных ландшафтов эффект применения метода снижается вследствие низкого значения абсолютной величины K_B и их слабой многолетней и внутри-вегетационной изменчивости. Тем не менее даже в этих условиях метод остается полезен для определения значений биологических коэффициентов и, как следствие, режима орошения на вновь осваиваемых орошаемых массивах.

Опыты использования метода пространственной интерполяции показывают широкие возможности его применения в водохозяйственной практике. Непременным условием для этого является тщательное обоснование физико-географических и водохозяйственных аналогий при подборе значений биологических коэффициентов водопотребления.

Выполненные нами различными методами контрольные расчеты суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур для всего диапазона природных условий зоны орошаемого земледелия СССР показали среднюю ошибку результатов относительно эталонного инструментального метода водного баланса порядка 15-30% для большинства методов.

Для средних условий расхождение между результатами расчета по различным методикам не превышает 25-30%. Однако экстремальные ошибки, как отмечалось ранее, у ряда методов достигают очень больших значений.

По нашему мнению, на сегодняшний день для проведения массовых расчетов наиболее надежными, достоверными и обеспеченными исходной информацией являются методы А. И. Будаговского, биоклиматический и И. А. Шарова - Г. К. Льгова.

Метод А. И. Будаговского следует применять для расчетов в рамках небольших районов при наличии детальной и многолетней изученности местных особенностей процесса водопотребления и необходимости получения очень точных результатов.

Для оценки суммарного водопотребления в более широких пространственно-временных масштабах и с меньшей точностью наиболее перспективным представляется применение биоклиматического метода на основе способа интерполяции биологических коэффициентов, разработанной авторами статьи.

Метод И. А. Шарова - Г. К. Льгова удобен для предварительных ориентировочных оценок водопотребления, когда надо получить лишь общий порядок величины водопотребления.

Опыт расчетов суммарного водопотребления в ирригации показывает, что выбор расчетной методики необходимо делать исходя из кон-

кретной постановки задачи, при наличии исходной информации для расчетов и анализа природной и агротехнической обстановки исследуемого объекта.

Литература

1. *Беляева Т. В., Местечкин В. Б.* Опыт математического моделирования водопотребления в орошаемом земледелии. ВНИИТЭИСХ, 1983.
2. *Воропаев Г. В., Местечкин В. Б.* Физико-географические основы формирования водохозяйственных балансов. М., Наука, 1981.
3. *Местечкин А. Б., Пращикин А. В.* Динамика перспективного водопотребления в промышленности и сельском хозяйстве бассейна Нижней Волги. В сб.: «Рациональное использование водных ресурсов», 1985, вып. 4.
4. Укрепленные нормы водопотребления и водоотделения в различных отраслях промышленности. М., Стройиздат, 1983.
5. *Харченко С. И.* Гидрология орошаемых земель. Л., Гидрометеиздат, 1975.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ОРОШЕНИЯ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ

В. Г. Пряжинская, С. А. Лернер

Одним из компонентов широкой и разносторонней программы интенсификации сельского хозяйства является проведение крупномасштабных работ по мелиорации земель. Масштабы и темпы мелиоративного строительства в СССР не имеют себе равных в мире.

Главный резерв дальнейшего увеличения производства сельскохозяйственной продукции – коренное улучшение земли как главного средства производства в сельском хозяйстве. Продуктивность сельскохозяйственных угодий при осуществлении оросительных и осушительных мелиораций значительно возрастает. По расчетам отдела экономики ВНИИГиМа, произведенная на мелиорированных землях, валовая продукция сельского хозяйства по всем категориям хозяйств на 1 га пашни и многолетних насаждений составила в восьмой пятилетке 1034 руб., в девятой – 1168 и в десятой – 1241 руб. [1].

Необходимо отметить, что характерной чертой аграрной политики в 80-е годы является рациональное использование имеющихся ресурсов, рост окупаемости капитальных вложений. В связи с этим повышение эффективности производства и достижение лучших конечных результатов – ключевые проблемы развития нашего общества.

Повышение эффективности производства в сельском хозяйстве непосредственно связано с ростом урожайности культур и продуктивности животноводства. Такой курс закреплён в решениях майского (1982 г.) Пленума ЦК КПСС, принявшего Продовольственную программу, и предполагает рациональную систему ведения сельского хозяйства, учитывающую особенности каждой зоны и требования научно-технического прогресса.

Значимость мелиорации как важного фактора интенсификации сельскохозяйственного производства особенно возросла после октябрьского (1984 г.) Пленума ЦК КПСС. Повышение эффективности производства – задача, решаемая на современном этапе и не теряющая своей актуальности и при долгосрочном планировании. Это тем более важно, когда речь идет об отдаче значительных капитальных вложений в мелиорацию земель.

Одна из важнейших задач планирования мелиораций состоит в установлении экономически обоснованных масштабов и темпов их развития. Поскольку мелиорируемые земли являются составным элементом сельскохозяйственного производства, в основу планов развития мелио-

раций должно быть положено экономически обоснованное распределение общих заданий по производству сельскохозяйственной продукции между мелиорированными и немелиорированными землями.

Для повышения экономической эффективности мелиораций важно на мелиорированных землях выращивать такие культуры, которые наиболее отзывчивы на те или иные виды мероприятий. В то же время имеет значение и конкретный состав культур на этих землях, так как он устанавливается с учетом потребностей государства в различных видах продукции. В этой связи особое значение имеет разработка плановых вариантов для обширных территорий, охватывающих целые природные зоны, крупные экономические районы или отдельные административно-территориальные единицы, страну в целом. С другой стороны, при планировании необходимо сопоставлять мелиоративные мероприятия со всеми другими способами получения дополнительной продукции, чтобы выбрать наилучший вариант [2, 3].

Метод сравнительной экономической эффективности капитальных вложений хорошо согласуется с использованием методов экономико-математического моделирования.

Экономический анализ оптимальных перспективных планов размещения водоемких сельскохозяйственных производств позволяет обосновать основные тенденции развития орошения в крупном регионе. В статье анализируются расчеты, выполненные для условий Северного Кавказа, где орошение является важным средством получения высоких и гарантированных урожаев. Планирование развития и размещения орошаемых земель осуществляется для двух уровней развития с помощью линейной динамической модели. Модель позволяет проанализировать варианты развития сельского хозяйства Северо-Кавказского экономического района (СКЭР) в динамике, обосновать размещение орошаемых площадей в разрезе семи административных единиц. В условиях Северного Кавказа велика роль богарного земледелия. В модели учтено возделывание культур на неорошаемых землях и предусмотрена возможность трансформации земельных угодий разного вида. Необходимость создания в стране зон гарантированного производства зерна, в том числе кукурузы, а также создание надежной кормовой базы на Северном Кавказе в перспективе возможно за счет развития орошения.

Однако в регионе довольно напряженная водохозяйственная обстановка. Основные водисточники региона — реки Дон, Кубань, Терек, Сулак, Самур, Кума. Собственные водные ресурсы в бассейне Дона, выделенные на орошение земель, при планируемых темпах развития мелиорации будут исчерпаны практически к 1990 г. Дальнейший рост орошаемых площадей в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях возможен только за счет переброски стока из Волги в Дон. Ростовско-Краснодарский канал предназначен для подачи воды из реки Дон на массивы орошения, расположенные в междуречье Дона и Кубани в административных границах Ростовской области и Красно-

дарском крае на базе переброски Волги в Дон. Северо-восточные засушливые районы Ставропольского края в настоящее время испытывают дефицит водных ресурсов. Здесь перспективное развитие орошаемых земель возможно за счет привлечения водных ресурсов реки Волги. Увеличение располагаемых водных ресурсов Кубани для орошения связано с углублением регулирования стока реки путем увеличения емкостей имеющихся и строительства ряда новых водохранилищ, строительства водораспределительного гидротурбинного узла в низовье реки Кубани, расширения пропускной способности ряда каналов. В бассейне реки Терек рост орошаемых площадей возможен при полном регулировании стока системы водохранилищ с учетом переброски избытков стока реки Сулак в бассейн Терека.

Охарактеризуем в общем виде использованную для расчетов экономико-математическую модель (ЭММ).

1. Агрегирование информации выполнено по семи административным единицам: Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская область, Дагестанская, Кабардино-Балкарская, Северо-Осетинская и Чечено-Ингушская АССР.

2. Планирование ведется на уровень 1990 г. и отдаленную перспективу, условно названную 2000 годом. На каждом уровне административные единицы связываются уравнениями, охватывающими несколько районов. Оба временных горизонта в целом по СКР объединяются в связующем блоке, формирующем целевые функции задачи, а также в блоках, отражающих поэтапное освоение мелiorативного фонда в каждой административной единице и в целом по району.

3. Задания по производству продукции в разрезе административных единиц и регионов в целом задаются извне.

4. Принято, что возможно применять сниженные опосредованные нормы (на 20%) для озимой пшеницы и кукурузы на зерно с соответствующим снижением урожайности на 8 и 14%.

5. Используется несколько критериев оптимальности:

- минимум суммарных приведенных затрат;
- максимум производства зерна в целом;
- максимум производства кукурузы;
- максимум производства говядины.

Задача состоит в отыскании максимального или минимального значения целевой функции

$$F(z) = cz,$$

т.е. в определении

$$\min(\max) cz$$

(1)

при условии выполнения следующей системы ограничений (2):

$$A_1X + A_2Y \leq B_1,$$

$$A_3X + A_4S \leq B_2, \quad X, Y, W, S \geq 0 \quad (2)$$

$$A_5X + A_6W \leq B_3.$$

Здесь $A_1 \div A_6$ — матрицы нормативов затрат и продуктивности; B_1, B_2, B_3 — векторы плановых заданий и ограничений ресурсов различного вида; X — площади, занимаемые отдельными сельскохозяйственными культурами на богаре и при орошении; Y — поголовье различных видов скота и птицы; W — водные ресурсы, дифференцируемые по районам СКЭР (поверхностные, подземные, перебрасываемые из других районов); S — земельные ресурсы разного вида (богарные и орошаемые, сенокосы и пастбища) и разной категории (требующие реконструкции и т.д.).

Составляющими вектора удельных затрат $C = C(C_X \cdot C_Y \cdot C_W \cdot C_S)$ являются:

C_X — сельскохозяйственные издержки в растениеводстве в расчете на 1 га возделываемой площади; C_Y — затраты на производство единицы животноводческой продукции; C_W — удельные капитальные вложения и текущие издержки на регулирование, транспортировку и подачу воды, на переброску; C_S — удельные капитальные вложения и издержки на реконструкцию оросительных систем и мелиоративное строительство.

Уравнения ЭММ носят характер балансов производства и потребления продукции сельского хозяйства, использования органических ресурсов воды, земли, кормов. Введены специальные уравнения, характеризующие освоение мелиоративного фонда и имеющие вид:

$$\tilde{S}_{op} = S_0 + \Delta S^I \quad \text{— для уровня 1990 г.,} \quad (3)$$

$$S_{op} = \tilde{S}_{op} + \Delta S^{II} \quad \text{— для уровня 2000 г.,} \quad (4)$$

где $\tilde{S}_{op}$ и S_{op} — орошаемые земли для первого и второго уровней развития; ΔS^I и ΔS^{II} ; S_0 и $\tilde{S}_{op}$ в уравнениях (3) и (4) — земли существующего орошения на уровне 1981 и 1990 гг. соответственно, требующие капиталовложений только на реконструкцию.

Ирригационный фонд района на современном уровне составляет 15226,9 тыс. га (99,1% от общего мелиоративного фонда). В районах, где в современных условиях развивается осушение (Краснодарский край, Ростовская область, Северо-Осетинская АССР), фонд этих площадей невелик, поэтому правомерно рассматривать только орошение, считая его основным видом мелиораций, проводимых на Северном Кавказе.

По сравнению с существующим уровнем продуктивности на орошении в перспективе к 1990 г. урожайность предполагается увеличить в 1,5–2,5 раза (по различным культурам), к 2000 г. — в 2–3 раза в соответствии с проектными проработками по рассматриваемому региону. Ис-

пользованные при расчетах нормативные уровни урожайности на орошаемых землях в сравнении с урожайностью на богарных землях к 1990 г. приняты по зерновым культурам выше в среднем в 1,8 раза, по овощам – в 1,5–1,6, по картофелю – в 1,4–1,5, по кормовым – в среднем в 1,7 раза; соответственно к 2000 г. по зерновым – в среднем в 2 раза, по овощам – в 1,8–2, по картофелю – в 1,6–1,9, по кормовым – в среднем в 2,4 раза.

В статье в качестве анализируемого рассматривается вариант, просчитанный по критерию «минимум приведенных затрат».

Проанализируем структуру растениеводства на орошаемых и богарных землях для четырех уровней развития: двух базовых – 1970 и 1980 гг. и двух модельных – 1990 и 2000 гг. (табл. 1,2, рис. 1,2).

Площадь орошаемых сельскохозяйственных угодий за период с 1970

Таблица 1

Структура орошаемого земледелия на Северном Кавказе

Культуры, угодья	Годы			
	1970	1980	1990	2000
Зерновые – всего	50,4	46,4	44,5	48,5
в том числе				
озимая пшеница	23,2	12,2	11,2	13,9
кукуруза	5,8	7,3	18,9	22,2
рис	12,9	19,2	12,9	10,1
зерновые фуражные (без кукурузы)	8,5	7,7	1,5	2,3
Технические – всего	3,6	1,9	—	—
в том числе				
подсолнечник	2,7	1,1	—	—
сахарная свекла	0,9	0,8	—	—
Картофель и овощи – всего	8,8	7,1	7,3	5,8
в том числе				
картофель	1,1	0,8	1,8	1,3
овощи	7,7	6,3	5,5	4,5
Кормовые – всего	37,2	44,6	48,2	45,7
Итого пашни	100,0	100,0	100,0	100,0
	84,2	88,0	77,3	79,2
Культурные пастбища и сенокосы	2,0	3,1	17,5	12,9
Многолетние насаждения	13,8	8,9	5,2	7,9
Всего сельхозугодий	100,0	100,0	100,0	100,0

Структура богарного земледелия на Северном Кавказе

Культуры, угодья	Годы			
	1970	1980	1990	2000
Зерновые – всего	49,9	53,5	72,2	71,2
в том числе				
озимая пшеница	30,2	34,4	35,7	34,9
яровые	3,0	3,0	8,2	8,9
кукуруза	2,0	3,0	3,5	0,8
зерновые фуражные (без кукурузы)	14,7	13,1	24,8	26,6
Технические – всего	9,8	9,6	8,0	9,0
в том числе				
подсолнечник	8,3	7,9	5,5	6,5
сахарная свекла	1,5	1,7	2,5	2,5
Картофель и овощи – всего	2,1	2,4	1,1	1,0
в том числе				
овощи	1,0	1,2	0,5	0,4
картофель	1,1	1,2	0,6	0,6
Кормовые – всего	30,2	26,1	11,5	11,7
Пары	8,0	8,4	7,2	7,1
Итого посевов	100,0	100,0	100,0	100,0
	64,1	62,8	65,3	67,0
Естественные кормовые угодья	34,8	36,2	32,4	31,8
Многолетние насаждения	1,1	1,0	2,3	1,2
Всего сельхозугодий	100,0	100,0	100,0	100,0

по 1990 г. увеличится на 117,0% и составит 11,4% от общей площади суммарных сельхозугодий (богарных и орошаемых). К 2000 г. площадь орошаемых сельхозугодий по сравнению с 1970 г. возрастет на 191,1% и составит 15,1% от общей площади суммарных сельхозугодий.

Удельный вес орошаемой пашни, составляющий в 1970 г. 84,2% от площади орошаемых сельхозугодий, к 1990 г. уменьшится до 77%, а в 2000 г. составит 79%, что связано с ростом площадей, отводимых под многолетние насаждения и культурные пастбища. Наибольшая доля пашни в сельхозугодьях в среднем за 1970–1980 гг. приходится на Краснодарский край (97%), на втором месте – СО АССР (92%), далее следуют КБ АССР (88%) и Ростовская область (87%). В соответствии с опти-

Рис. 1. Структура пашни на орошаемых землях в СКЭР.

Рис. 2. Структура пашни на богарных землях в СКЭР.

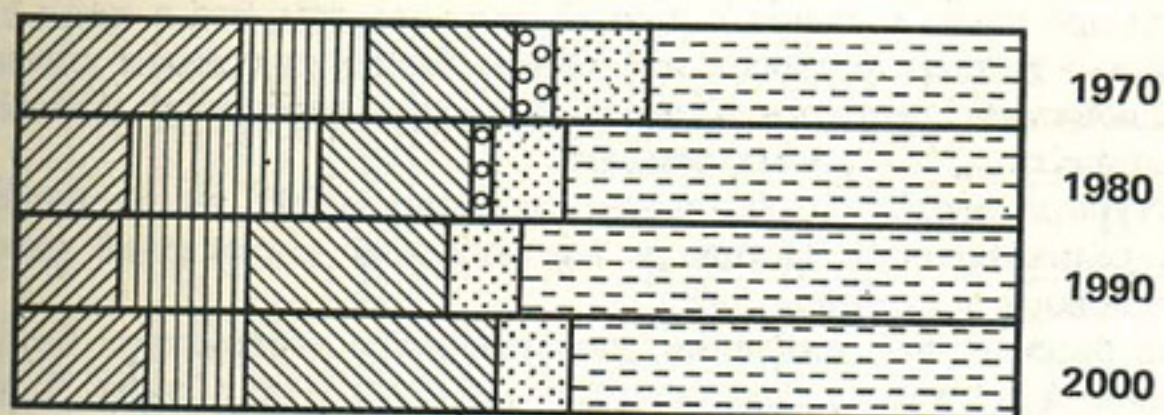


Рис. 1.

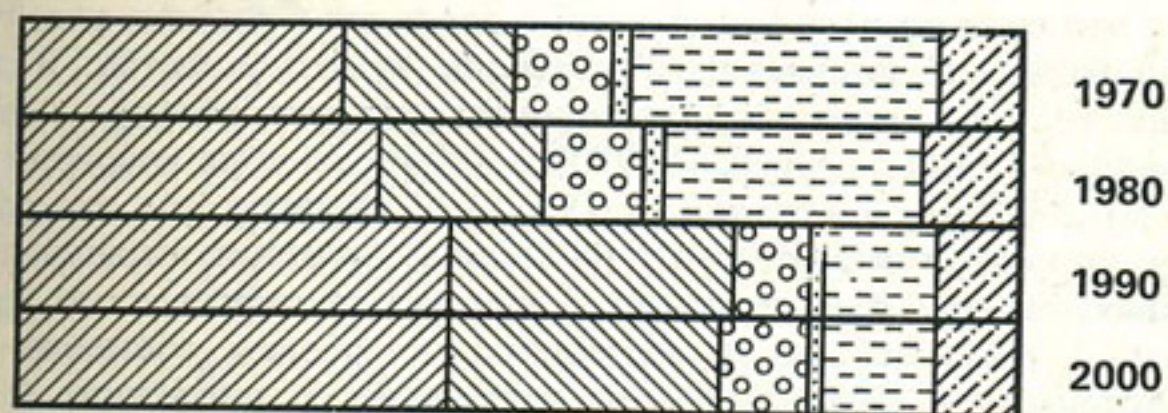


Рис. 2.

мальным решением в 1990 г. высока доля орошаемой пашни в КБ АССР, Ставропольском крае, ЧИ АССР (в среднем 99%), в 2000 г. — в тех же районах (в среднем 92%). В целом по СКЭР за 10 лет (с 1990 по 2000 г.) орошаемая пашня увеличится на 37,5%, площадь орошаемых сельхозугодий — на 34,1%.

В структуре растениеводства на орошаемых землях как в современных условиях, так и в перспективе (табл. 1, рис. 1) преобладают зерновые. При этом доля озимой пшеницы с 1970 по 1980 г. имела тенденцию к снижению (с 23 до 12%). В соответствии с расчетами по модели на уровне 1990 г. сохраняется тот же уровень (11%), а к 2000 г. он возрастает до 14%. Яркая выраженная тенденция к росту характеризует кукурузу на зерно (с 5% в 1970 г. до 22% в 2000 г.). Это полностью согласуется с намеченным курсом на создание зоны устойчивого производства зерна кукурузы на орошаемых землях. Доля риса изменяется следующим образом: с 13% в 1970 г. имеет тенденцию к возрастанию в 1980 г. до 19%, далее снижается до 13% в 1990 г., до 10% в 2000 г. Доля овощей и картофеля также имеет тенденцию к сокращению — с

8,8% в 1970 г. до 5,8% в 2000 г. Кормовые культуры в 1970 и 1980 гг. занимали 37 и 45%, а в последующие два десятилетия в среднем 48%.

Однозначно объяснить эти тенденции трудно. Сокращение доли ряда культур вызвано, с одной стороны, ростом их урожайности и ростом площадей орошения в целом, с другой стороны, тем, что в связи с ограниченностью водных ресурсов и в целом благоприятными климатическими условиями Северного Кавказа часть культур можно и даже нужно выращивать на богарных землях.

Культурные пастбища составляют в среднем 20% от площади орошаемых сельхозугодий. Площади многолетних насаждений невелики; они составляют в среднем 5–8%.

Далее рассмотрим тенденции, наметившиеся в структуре богарного земледелия за анализируемый период – с 1970 по 2000 г. (табл. 2, рис. 2). В целом растет доля зернового клина – с 49,9% в 1970 г. до 71,2% в 2000 г. Такой рост происходит в основном за счет увеличения в структуре зерновых доли фуражных культур (с 14,7% в 1970 г. до 26,6% в 2000 г.), что связано с необходимостью создания в регионе устойчивой кормовой базы для дальнейшего развития животноводства. В то же время наметилась интересная тенденция по кукурузе, которая выделена из состава фуражных культур. С 1970 по 1990 г. ее доля возрастет с 2% до 3,5%, а к 2000 г. резко упадет до 0,8%. Это связано с тем, что данную культуру, хорошо отзывающуюся на полив, выгоднее выращивать на орошаемых землях. Доля технических культур претерпевает за рассматриваемый период небольшие колебания, в среднем составляя 9,1%. Доля картофеля и овощей имеет тенденцию к снижению (с 2,1% в 1970 г. до 1% в 2000 г.). Выращивание овощей на поливе обеспечивает получение высоких и гарантированных урожаев этой важной культуры. Доля кормовых культур в посевах снижается (с 30,2% в 1970 г. до 11,7% в 2000 г.), так как кормовые культуры хорошо отзываются на орошение.

Доля пашни в площади богарных сельхозугодий в 2000 г. несколько возрастет (на 2,9%) по сравнению с 1970 г.

Доля многолетних насаждений невысока – составляет порядка 1–2%. Естественные кормовые угодья имеют тенденцию к снижению (с 34,8% в 1970 г. с подъемом до 36,2% в 1980 г. и до 31,8% в 2000 г.).

Проанализируем структуру животноводства на перспективу (1990 и 2000 гг.) в разрезе административных единиц СКЭР и выход животноводческой продукции в расчете на 100 га земельной площади (табл. 3).

Наибольшее поголовье крупного рогатого скота приходится на Ростовскую область и Краснодарский край. В 1990 г. доля этих районов в общем поголовье СКЭР составит соответственно 36,5 и 30,9%, в 2000 г. – 35,8 и 29,4%. В этих районах высок удельный вес свиноводства: в 1990 г. соответственно 40 и 37%, в 2000 г. – 39,5 и 38%. Доля овцеводства высока в Ростовской области и Ставропольском крае: от общего поголовья СКЭР составит в 1990 г. по 36,4, в 2000 г. – 40 и 33%. Доля птицы наиболее высока в Ростовской области: в 1990 г. составит 45,3%

Структура животноводства, обеспеченность кормами, выход мяса и молока на 100 га сельскохозяйственных угодий в разрезе административных единиц СКЭР

Показатели	Районы														СКЭР	
	Краснодар- ский край		Ставро- польский край		Ростовская область		Дагестан- ская АССР		Кабардино- Балкарская АССР		Северо- Осетинская АССР		Чечено-Ин- гушская АССР			
	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000		
Структура животновод- ства, %/о	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
Крупный рогатый скот	30,9	29,4	15,4	18,0	36,5	35,8	6,7	6,0	3,2	3,3	2,7	2,9	4,6	4,7	100	100
Свины	36,6	37,7	14,5	13,1	39,8	39,5	1,0	1,2	2,7	2,9	2,0	2,0	3,4	3,6	100	100
Овцы	6,4	6,6	36,4	33,2	36,7	40,3	13,7	13,5	1,9	1,7	0,6	0,8	4,3	3,9	100	100
Птица	25,0	28,0	15,6	16,1	45,3	43,1	3,1	3,45	4,1	3,3	3,2	2,85	3,7	3,1	100	100
Обеспеченность кормами на одну условную голову, ц к. е.	51,0	57,4	58,3	63,0	55,4	61,0	45,4	55,4	51,7	55,4	52,1	71,6	51,0	52,4	56,3	59,5
Выход мяса на 100 га сельхозугодий, ц	114	143	81	95	101	122	73	91	96	105	121	148	93	106	97	117
Выход молока на 100 га сельхозугодий, ц	359	429	175	206	225	281	277	342	395	443	589	728	385	436	262	318

в 2000 г.—43,1%. В Дагестанской АССР овцеводство составляет на перспективу в среднем 14% от общего поголовья СКЭР.

Наибольшим количеством кормов, производимых в расчете на одну условную голову в 1990 г., характеризуется Ставропольский край, на втором месте Ростовская область, наименьшим—ЧИ АССР, в 2000 г. наибольшим—СО АССР, Ставропольский край и Ростовская область, наименьшим—ЧИ АССР. Высокая обеспеченность кормами позволяет размещать значительное поголовье разных видов скота и птицы в Ростовской области, краях, Дагестанской АССР.

В табл. 3 приводится также выход животноводческой продукции на 100 га сельхозугодий. Наибольший выход мяса отмечается в СО АССР, Краснодарском крае, Ростовской области; наибольший выход молока также в этих районах. На рассматриваемые показатели оказывает влияние целый ряд факторов, такие, как структура отрасли животноводства, структура кормовых угодий и их продуктивность, плановое задание по производству продукции животноводства и т. д.

Оценивая роль орошаемого земледелия на Северном Кавказе, необходимо обратить внимание на тот факт, что на орошаемых землях СКЭР, составляющих к 1990 г. 11,4%, к 2000 г.—15,1% от площади сельхозугодий, будет производиться:

в 1990 г. весь рис, 15% зерна в целом, 60% кукурузы на зерно, 75% овощей, 46% картофеля, 15% фруктов, 49% винограда;

в 2000 г. весь рис, 21% зерна в целом, 91% кукурузы на зерно, 82% овощей, 44% картофеля, 50% фруктов, 68% винограда. В среднем 30% продукции животноводства производится за счет кормов, получаемых на орошаемых землях.

Оценка стоимостных показателей, характеризующих различные стороны процесса планирования, позволяет получить более полную картину перспектив развития сельского хозяйства рассматриваемого региона с учетом доли орошаемых земель в общей площади сельхозугодий.

В табл. 4 приведен ряд таких показателей:

- выход валовой продукции растениеводства и животноводства с орошаемых и богарных сельхозугодий на 1 га в стоимостном выражении;
- чистый доход с учетом налога с оборота на 1 га всех сельхозугодий;
- выход продукции с орошаемых земель в стоимостном выражении на 1 рубль капитальных вложений (капиталоотдача);
- выход продукции с орошаемых земель в стоимостном выражении на 1 м³ безвозвратного водопотребления (водоотдача).

Наибольший выход продукции на 1 га орошаемых сельхозугодий в денежном исчислении в 1990 г. возможен в Ростовской области и Краснодарском крае, наименьший—в ЧИ АССР. Соответствующие показатели для 2000 г.: наибольший выход продукции в Краснодарском крае и Ростовской области, наименьший—в КБ АССР. По сравнению с выходом продукции на 1 га богарных сельхозугодий выход продукции

с орошаемых сельхозугодий в среднем выше в 4–6 раз. В то же время в [1] отмечается, что продуктивность орошаемых земель при современном уровне их использования примерно в 5–6 раз выше продуктивности земель, где эти виды мелиорации не применяются. За период с 1990 по 2000 г. наибольший прирост выхода валовой продукции отмечается в СО АССР (61,2%) на орошаемых землях, в ДагАССР (25,2%) – на богарных.

Чистый доход с учетом налога с оборота на 1 га орошаемых сельхозугодий будет наиболее высок в 1990 г. в Ростовской области, на втором месте ДагАССР, наиболее низкий – в ЧИ АССР; в 2000 г. будет наибольший в Краснодарском крае, СО АССР и ДагАССР, наименьший в КБ АССР. Что касается богарных сельхозугодий, то на них наиболее высок чистый доход в расчете на 1 га в Красноярском крае, где климатические условия позволяют получить высокие урожаи и на богаре, наименьший – в ДагАССР, где довольно засушливый климат требует развития орошения, что поддерживается приведенными выше показателями, характеризующими доли орошаемых земель в общей площади сельхозугодий.

Наибольший выход продукции с орошаемых земель на 1 руб. капитальных вложений в 1990 г. приходится на Ростовскую область и ДагАССР, затем следует Краснодарский край; в 2000 г. наибольший в СО АССР, Краснодарском крае и Ростовской области. «Замыкающим» по показателю выхода продукции с орошаемых земель на 1 руб. капитальных вложений на обоих уровнях планирования является Ставропольский край. Одна из причин этого связана с ростом капиталовложений, кроме того, появляются дополнительные капиталовложения вследствие осуществления переброски Волга – Чограй.

Показатель, характеризующий использование водных ресурсов на орошение, будет наибольший в 1990 г. в КБ и СО АССР; в 2000 г. – в СО и КБ АССР, наименьший – в Ставропольском крае. Величина данного показателя определяется структурой водоемких сельскохозяйственных отраслей, рассматриваемых в задаче.

Литература

1. Дмитриев В. С. Экономика мелиорации земель. М., Экономика, 1984, 134 с.
2. Зузик Д. Т. Экономика водного хозяйства. М., Колос, 1980, 400 с.
3. Пряжинская В. Г. Математическое моделирование в водном хозяйстве. М., Наука, 1985, 135 с.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ВОДОСБОРОВ РЕК В БАССЕЙНЕ ИРТЫША

Т. М. Гельбух, Т. Н. Кутенкова

Воды суши находятся в непрерывном взаимодействии с окружающей природной средой, и возможные нарушения гидрологических особенностей территории, возникающие в результате хозяйственного использования речных систем, определенным образом отражаются на экологических взаимосвязях, присущих данной местности. В связи с отмеченным в разработке определенных водохозяйственных задач должны предшествовать исследования характера устойчивых естественных изменений основных составляющих водного баланса, формирующих характерную для данного района экосистему.

Анализ закономерностей пространственно-временных изменений составляющих водного баланса бассейнов рек Западной Сибири вызван необходимостью получить информацию по водному балансу отдельных участков разрабатываемого Обь-Иртышского водохозяйственного комплекса, в пределах которых формируется боковая приточность основных водотоков. В связи с этим были проведены исследования по выделению относительно однородных по водному режиму районов внутри бассейна р. Оби [1]. В настоящей работе проведено аналогичное районирование водосборов рек в бассейне Иртыша. Для выделенных районов описано характерное для них внутригодовое распределение составляющих водного баланса.

Вопросам водного баланса Западной Сибири и условиям формирования здесь стока посвящены работы, различные по своей направленности и использованному материалу, где приведены данные по составляющим водного баланса гидролого-климатических, физико-географических и природных зон. В данном исследовании закономерности пространственного распределения элементов водного баланса водосборов рек бассейна Иртыша рассмотрены на основе проведенного по единой методике районирования отдельных составляющих баланса в соответствии с их внутригодовым распределением (в среднем за многолетний период).

Применительно к выделенным районам рассчитаны величины слоев среднемесячного стока, осадков и испарения, их процентного распределения от годовых сумм и модульных коэффициентов (K) — характеристики пространственной изменчивости составляющих баланса по территории рассматриваемого бассейна.

В использованной для районирования объективной методике, подробно описанной в работе [4], задача классификации группы характеристик, принадлежащих какому-либо объекту, решается с позиции теории распознавания образов. Не останавливаясь на описании использованного математического приема, следует лишь напомнить, что решаемая данным методом задача районирования сводится к разделению множества объектов на группы, степень сходства внутри которых по классифицируемым признакам относительно велика, а между группами, наоборот, относительно велико различие.

Степень сходства (или мера различия) отдельных объектов-водосборов при рассмотрении тех или иных их характеристик оценивалась функцией

$$Y(d) = \frac{1}{1 + \alpha d^2}, \quad (1)$$

где α — коэффициент, характеризующий скорость убывания $Y(d)$ (в нашем случае принят равным 0,1); d — так называемое евклидово расстояние — мера сходства в многомерной статистике, исчисляемая по формуле

$$d_{mn} = \sqrt{\sum (x_{im} - x_{in})^2}. \quad (2)$$

Здесь x_{im} — значение i -х балансовых характеристик m -го водосбора; x_{in} — аналогичная характеристика n -го водосбора.

Для проведения районирования составляющих водного баланса в бассейне р. Иртыша использованы данные по внутригодовому распределению стока, осадков и испарения, приведенные в работе [2], по 34 водосборам, охватывающим площади от 3 до 118 тыс. км².

За пороговую величину функции $Y(d)$, как и при районировании элементов баланса р. Оби [1], принималось преимущественно ее значение, равное 0,8; внутри образованных районов, если представлялось возможным, выделялись подрайоны с более высокой мерой сходства между водосборами.

Районирование водосборов по характеру внутригодового распределения стока

По характеру внутригодового распределения стока в бассейне р. Иртыша выделено 8 районов, разделенных дополнительно на 12 подрайонов. Первые два района объединяют правобережные горные притоки р. Иртыша, слоии годового стока которых достигают 500–550 мм.

I–II районы — водосбор самого водообильного притока Иртыша — р. Убы, берущей начало в области вечных снегов. Годовой сток реки составляет 567 мм, наиболее многоводным является период апрель–июнь, когда проходит до 70% годового объема вод.

III район образует наибольшая по площади водосбора из правобережных притоков р. Омь. Водность Оми (40–50 мм годового слоя) значительно ниже, чем рек предшествующих районов; около половины всего стока приходится на май, в зимний период слой стока с водосбора составляет менее 0,5 мм.

IV район занимает обширную территорию засушливого юго-западного участка бассейна р. Иртыша и объединяет большую часть водосборов рек Ишима и Тобола и их притоки. В соответствии с особенностями внутригодового распределения стока выделено 3 подрайона. Годовой слой стока с водосборов этого района не превышает 20–30 мм; на протяжении 9 месяцев величины его составляют менее 0,5 мм и лишь в период апрель–июнь на водосборе Ишима они достигают 12 мм, а в бассейне Тобола – 6 мм. В верховьях этих рек годовой слой стока достигает порядка 20–30 мм, наибольшие расходы воды повсеместно наблюдаются в апреле и по величине они близки к годовому стоку.

V район объединяет в основном левые притоки р. Тобола, берущие начало с Уральских гор; годовой сток достигает здесь 65–95 мм. По особенностям распределения стока район разделен на три подрайона, лишь в одном из них (р. Тура – г. Верхотурье) величина стока увеличивается до 160 мм.

VI район, разделенный на два подрайона, входит р. Исеть с ее притоком р. Миасс (исключая верхний участок бассейна). Годовой слой стока этих рек всего 35–55 мм. Наиболее многоводным является в первом подрайоне апрель, а во втором – май, когда проходит 30–40% годового объема речных вод. В период межени слой стока составляет 1–2 мм.

VII район занимает северную облесенную и заболоченную часть правобережья р. Иртыша. Сток с этого участка бассейна относительно высок – 120–145 мм в год. Наибольшие его величины наблюдаются в мае (50–55 мм), в летне-осенний период они не падают ниже 6–10 мм.

VIII район – северная часть левобережья р. Иртыша, включающая водосборы р. Тавды с притоком р. Сосьвой, – подрайон VIII.1; р. Конды – подрайон VIII.2. Несмотря на имеющие место различия в характере водосборов и в годовых величинах стока соответственно 164 и 131 мм, особенности внутригодового распределения стока этих рек достаточно близки. В период наибольшей водности (май–июнь) проходит порядка 50–65% годового объема вод, в месяцы летне-осеннего периода слой стока колеблется в пределах 6–16 мм.

Годовые слои стока по районам меняются от 300–570 мм в районах, объединяющих реки горных и предгорных участков бассейна, до нескольких мм на засушливых его участках.

В период зимней и летней межени на равнинной территории бассейна сток исчезающе мал (до полного его прекращения), в предгорных районах его величины составляют порядка 10–20 мм (редко 30 мм). Наибольшие величины месячного стока, составляющие 150–190 мм, на-

блюдаются в период половодья в I и II районах, объединяющих водосборы горного и предгорного участков бассейна.

В дополнение к районированию гидрографов стока был рассмотрен характер изменения месячных слоев стока за холодный (ноябрь-март) и теплый (апрель-октябрь) периоды года.

По характеру распределения стока в холодный период года в бассейне р. Иртыша выделены 5 районов. Наиболее обильное грунтовое питание в зимний период имеет место на водосборах рек Юго-Западного Алтая (I район); несколько ниже оно на притоках Нижнего Иртыша (V район). В бассейнах рек Ишима, Тобола и Тары (II район) зимний сток исчезающе мал или полностью отсутствует.

По характеру распределения стока в теплый период года в бассейне выделены 7 районов, разделенных на 14 подрайонов. Количество группировок водосборов почти совпадает с числом их, выделенных по типам годовых гидрографов стока. Некоторое перераспределение рек внутри районов не изменило общий фон размещения полей повышенного стока и засушливых условий.

Для анализа причин, способствующих определенному характеру внутригодовой изменчивости стока, были проанализированы корреляционные функции его месячных величин на водосборах некоторых рек. Как отмечалось ранее [1], на водосборах одного и того же района связность рядов месячного стока может быть достаточно разной.

Районирование водосборов по характеру внутригодового распределения осадков

По характеру внутригодового распределения осадков в бассейне р. Иртыша выделены 7 районов. Наибольшее количество осадков (свыше 800–900 мм в год) выпадает на водосборах горных рек Бухтармы и Убы, при этом годовые их суммы и внутригодовое распределение существенно различны, в связи с чем оба водосбора выделены в отдельные районы I и II.

III район занимает среднюю часть правобережья р. Иртыша – водосборы рек Оми и Тары, а также водосбор притока Верхнего Иртыша – р. Курчум. Годовые суммы осадков здесь достигают 525 мм; наиболее влагообильный период июнь-август, когда выпадает 40% их годового объема.

IV район – водосбор р. Ишима с годовыми слоями осадков до 425 мм; наибольшие месячные их величины наблюдаются, как и в предшествующем районе, с июня по август.

V район включает бассейн р. Тобола, водосборы нескольких правобережных притоков Ишима и водосбор р. Кальджир (верховье Иртыша). Количество осадков здесь немного выше, чем в предыдущем райо-

не (достигает 450 мм), несколько меньше осадков выпадает в холодный период и больше – в теплый.

VI район – северный участок правобережья р. Иртыша, объединяющий водосборы рек Туя, Туртаса и Демьянки. Годовой слой осадков в этом районе в среднем на 150 мм выше, чем в последних двух, с выраженным снижением их в апреле.

VII район занимает левобережья р. Тобола и низовьев р. Иртыша. В соответствии с характером внутригодового распределения осадков выделено 4 подрайона, годовые суммы осадков в них колеблются от 520 до 610 мм, а в верховьях р. Туры (подрайон УП.1а) – до 740 мм. С июня по август выпадает здесь, как и в других районах, порядка 40% годового объема осадков, наименьшее их количество повсеместно приходится на февраль.

Как видно из приведенного материала, годовые суммы атмосферных осадков по районам меняются от 820–950 мм на водосборах рек Южного Алтая до 380–440 мм в условиях засушливого климата бассейнов рек Ишима и Тобола. В остальных районах бассейна они достаточно стабильны (550–570 мм), возрастая до 750 мм лишь на водосборах малых рек, расположенных на склонах Уральских гор (подрайон VII.1а).

В холодные месяцы года количество выпадающих осадков меняется от 20–30 до 40–50 мм. В теплый период различия существенно возрастают, и наибольшие месячные суммы осадков в это время от 40–50 мм в засушливой части бассейна возрастают до 80–100 мм в районах предгорий. В отдельные месяцы холодного периода года выпадает 3–9% годовой суммы осадков, в летние месяцы – 9–15%.

Районирование водосборов по характеру внутригодового распределения испарения

В соответствии с изменчивостью месячных величин испарения водосборы рек бассейна Иртыша объединены в 8 районов и 12 подрайонов.

I и II районы, как и для других составляющих баланса, занимают крайнюю часть бассейна Иртыша и, в свою очередь, подразделяются каждый на 2 подрайона. Годовой слой испарения с водосборов I района составляет 320–380 мм, II – не превышает 225 мм.

III район – водосбор р. Оми. За год здесь испаряется свыше 475 мм, а в июле – порядка 120 мм.

IV район объединяет бассейны рек Ишима (до г. Ишим) и Тобола (до г. Курган). Годовые величины испарения на водосборах района колеблются в пределах 350–430 мм, наибольшие – приурочены к периоду май-июнь и не превышают 80–100 мм.

V район включает водосборы рек Исети и Туры с их притоками. Интенсивность испарения здесь существенно выше (более 500 мм), чем на

остальной территории бассейна р. Иртыша, чему способствуют достаточное количество осадков и благоприятный термический режим.

VI район полностью совпадает с выделенным по характеру внутригодового распределения осадков и стока. Годовые величины испарения в этом районе несколько ниже, чем в предшествующем, и не превышают 455 мм; небольшие слои месячного испарения 100–110 мм приходятся на июнь.

В VII район входит водосбор нижнего притока Тобола – р. Тавда.

VIII район включает два притока Иртыша: левобережный – р. Конду и правобережный – р. Тару. Годовые суммы испарения в этих районах близки и составляют порядка 400–415 мм, распределение величин испарения внутри года несколько различается.

На примере расположения полей отдельных составляющих водного баланса можно проследить их взаимосвязь, а также оценить степень влияния различных факторов на характер внутригодовой изменчивости стока. В распределении крупных районов, объединяющих водосборы рек с характерным внутригодовым распределением элементов баланса, наблюдается достаточная аналогия. При этом однотипный характер выпадения осадков присущ более обширным территориям. Процесс формирования стока определяется как особенностями выпадения атмосферных осадков, так и строением деятельной поверхности водосбора, следствием чего является значительное число подрайонов. Интенсивность испарения, помимо тепловых ресурсов, определяется также наличием влаги в поверхностных слоях водосбора, что зависит от его рельефа и характера почвогрунтов. В соответствии с этим количество однородных территориальных единиц по характеру внутригодового распределения испарения, как и для полей стока, возрастает.

Исходными компонентами природных зон являются водные (осадки) и тепловые (коррелирующие с испарением) ресурсы; сток является их замыкающим звеном; связь между составляющими баланса хорошо прослеживается.

Однако изменчивость величин месячного стока по территории бассейна Иртыша (табл.) существенно больше, чем осадков и испарения. Если коэффициенты вариации последних наблюдаются в среднем в пределах 0,20–0,40, то значения C_v слоев стока в отдельные месяцы превышают C_v осадков и испарения более, чем в 5–6 раз. Из приведенных данных следует, что колебания метеорологических факторов в бассейне Иртыша под воздействием особенностей водосборов вызывают в величинах стока более существенные изменения, причем условия формирования стока на отдельных участках бассейна Иртыша значительно разнообразней, чем на водосборах бассейна Оби [1]. C_v месячных слоев стока по территории первого бассейна в полтора-два раза выше, чем во втором.

Пространственные различия в распределении элементов баланса внутри года оценены сопоставлением хронологического изменения мо-

Изменчивость (C_v) составляющих водного баланса водосборов рек
по территории бассейна р. Иртыша

Составляющие баланса	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Сток	1,29	1,27	1,39	1,16	1,35	1,49	1,43	1,28	1,36	1,32	1,19	1,23
Осадки	0,26	0,33	0,26	0,29	0,28	0,21	0,19	0,24	0,25	0,30	0,34	0,35
Испарение	0,27	0,23	0,38	0,27	0,18	0,23	0,24	0,24	0,25	0,31	0,22	0,27

дульных коэффициентов K , рассчитанных по соотношению между месячными величинами осадков, испарения и стока конкретных районов и средней их величиной для всей рассматриваемой территории. Значения K для различных элементов баланса внутри годового периода существенно меняются, т. е. вклад различных участков в осредненный фон водности всего бассейна непостоянен.

Для сопоставления внутригодовой изменчивости составляющих водного баланса рассмотренных водосборов с колебаниями этих величин по территории временные (по 12 месяцам) и пространственные (по 34 водосборам) ряды были представлены в одинаковых относительных параметрах $K - 1/C_v$ и построены зависимости $K - 1/C_v = f(p)$. Из расположения точек на полученных графиках следует, что вероятность появления в бассейне редко и часто встречающихся величин стока выше, чем соответствующих величин осадков и испарения. Обеспеченность же элементов баланса, близких к их средним значениям, наоборот, возрастает от характеристик стока к осадкам и испарению.

Литература

1. Гельбух Т. М., Кутенкова Т. Н. Пространственная изменчивость внутригодового распределения элементов водного баланса водосборов рек в бассейне Оби. Труды ЗСРНИГМИ, 1985, вып. 72.
2. Плиткин Г. А. Элементы водного баланса р. Иртыша и их внутригодовое распределение. Труды ЗСРНИГМИ, 1975, вып. 17.
3. Родоман Б. Б. Математические аспекты формализации порайонных географических характеристик. Вестник МГУ, сер. географ., 1967, № 2.
4. Шимельниц И. Я., Исмаилов Г. Х., Федоров В. М. Методические основы водохозяйственного районирования. Водные ресурсы, 1975, № 1.

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ИЛИ ИХ РАСХОДОВАНИЯ НА ИСПАРЕНИЕ И ТРАНСПИРАЦИЮ В УСЛОВИЯХ ОРОШЕНИЯ

Е. Л. Минкин, Г. Л. Красильщиков

Весьма часто верхняя часть горизонта грунтовых вод на орошаемых территориях представлена связными породами — суглинками и супесями. Как правило, колебания уровня грунтовых вод (сезонные и годовые) ограничиваются в этих условиях также зоной связных пород, т.е. в пик подъема уровня максимальная мощность обводненной их части превышает максимальную амплитуду колебаний уровня. При этом толща обводненных связных пород может быть как сравнительно однородной, так и слоистой, представленной переслаиванием суглинков (легких и тяжелых).

При рассмотрении режима колебаний уровня в условиях орошения принимается допущение, в подавляющем большинстве случаев оправданное, что в пределах верхней водонасыщенной толщи связных пород вследствие процессов выравнивания бугров грунтовых вод, образующихся под каналами или поливными участками, преобладает вертикальная составляющая фильтрации.

Это обстоятельство определяет закономерные расхождения в величине напора по вертикали. В привершинных частях бугров грунтовых вод, характеризующихся нисходящей фильтрацией, напоры с глубиной уменьшаются, а на периферии бугров и прилегающих к ним территориях, где преобладает восходящее движение грунтовых вод, напоры с глубиной возрастают. При этом как в первом, так и во втором случае распределение напоров по вертикали в пределах каждой литологической разности связных пород осуществляется по линейному закону. Эпюра пьезометрических высот по вертикали в этих условиях (ось ординат — вертикальный разрез, ось абсцисс — пьезометрическая высота) для каждой литологической разности ограничена прямой линией, угол наклона которой к вертикали различен для каждой разности.

Эта закономерность вытекает из закона Дарси, если принимается допущение о преимущественно вертикальной фильтрации в толще связных пород, а значит и о постоянстве расхода фильтрующихся в вертикальном направлении грунтовых вод.

Изменчивость величины напора по вертикали, несмотря на указанный выше закономерный характер этой изменчивости, создает определенные затруднения при установлении истинного положения уровня грунтовых вод. Связано это с тем, что в любой наблюдательной сква-

жине, в той или иной мере вскрывающей горизонт грунтовых вод, их уровень устанавливается выше или ниже истинного уровня, в зависимости от направления вертикального фильтрационного течения. Для условий, когда верхняя часть горизонта грунтовых вод представлена сравнительно однородной толщей связных пород, задача решается просто. Детально она рассмотрена в работе Е. Л. Минкина [2].

В настоящей статье предлагаются методика установления истинного уровня грунтовых вод, верхняя часть горизонта которых представлена слоистой толщей связных пород, и основанная на этом методика определения питания грунтовых вод или их расходования на эвапотранспирацию по данным наблюдений за режимом колебаний истинного уровня.

Определение истинного уровня грунтовых вод

Рассмотрим разрез верхней части горизонта грунтовых вод, приведенный на рис. 1. Здесь выделяется три прослоя связных пород (сверху вниз): суглинок средний, супесь тяжелая и суглинок легкий. Ниже лежат пески, где движение грунтовых вод преимущественно горизонтальное, а величина напора по вертикали в каждый момент времени может приниматься постоянной. Для каждого из прослоев формула Дарси имеет вид:

$$q = k_i \frac{\Delta h_i}{m_i} = \text{const}, \quad (1)$$

где: q — фильтрационный расход по вертикали; k_i , m_i — соответственно, коэффициент фильтрации по вертикали и мощность соответствующего прослоя; Δh_i — разность напоров в кровле и подошве этого прослоя на момент определения величины q .

Составив выражение (1) для каждого из трех прослоев и последовательно приравняв их один другому, находим величину H_0 — превышение истинного уровня грунтовых вод над кровлей песков в данный момент времени

$$H_0 = \frac{H + q \left(\frac{1}{k_1} \sum_2^3 m_i - \sum_2^3 \frac{m_i}{k_i} \right)}{1 + \frac{q}{k_1}}, \quad (2)$$

где H — соответствующий этапу времени напор на кровле песков.

Из выражения (2) очевидно, что для любого числа n прослоев

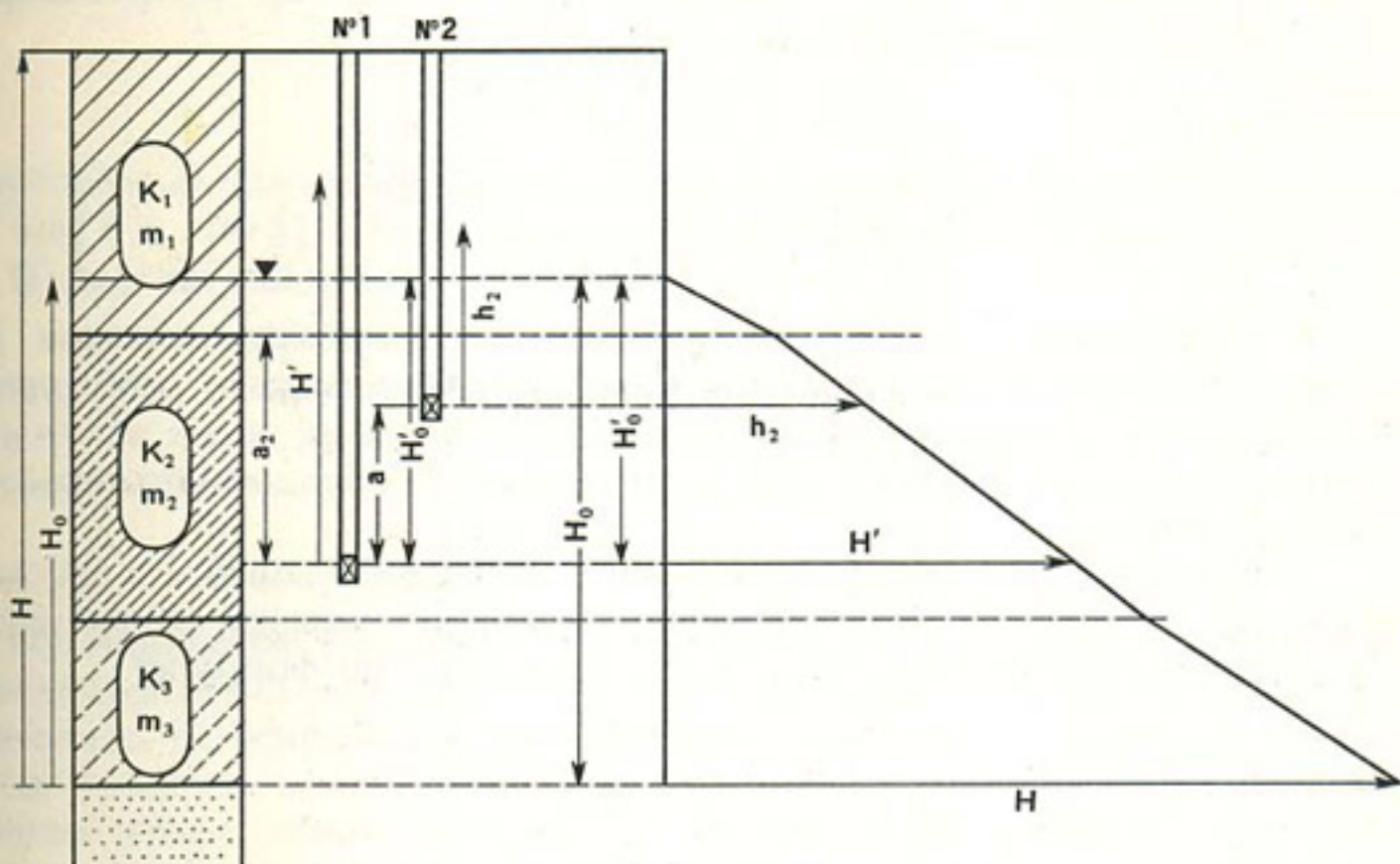


Рис. 1

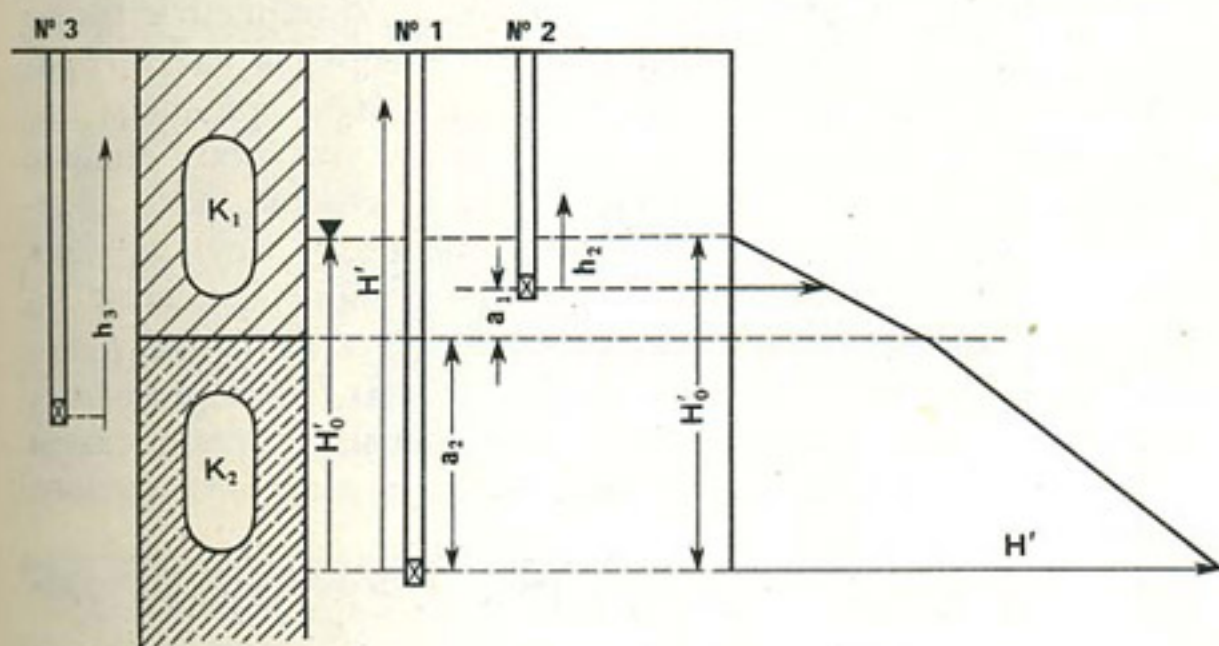


Рис. 2

$$(5) \quad H'_0 = \frac{H' + qa_2 \left(\frac{1}{1} \frac{k_1}{k_2} - \frac{1}{1} \right)}{1 + \frac{k_1}{q}}$$

шается до вида

Легко показать, что при $n = 2$ и $m_2 = a_2$ (рис. 1) выражение (3) упрощается до вида

уровня грунтовых вод. образом, чтобы верхняя из них была ниже минимально возможного в пределах нижнего из двух верхних прослоев связных пород таким ров (или презометрических высот) в двух любых точках, расположенных необходимо и в больши́нстве случаев достаточно знать величину напорного прослоев связных пород. В этом случае для определения величины H'_0 баний уровня грунтовых вод захватывает лишь не более двух верхних весьма часто задача существенно облегчается. Как правило, зона колебаний уровня грунтовых вод. В ряде случаев по тем или иным причинам это трации и мощности всех прослоев связных пород в верхней части горных из них состоит в том, что должны быть известны коэффициенты фильтрации выше способом связано с рядом серьезных неудобств. Основное определение истинного положения уровня грунтовых вод опирается на заданное время.

величины H'_0 на заданное время. считанное по формуле (4), в выражение (3), находим искомое значение K_p — коэффициент фильтрации этого прослоя. Подставив значение, под- в которой a — превышение этой точки над подошвой слоя « p », а

$$(4) \quad q = \frac{\sum_{i=1}^{p+1} \frac{k_i}{m_i} + \frac{k_p}{a}}{H - H'_0}$$

фильтрационный расход может быть определен по формуле: имеюшем номер « p » (если считать прослой по порядку сверху вниз). В случае, когда напор H' определен в точке, находящейся в прослое, связных пород.

презометрическую высоту в любой точке любого обводненного прослоя и достаточно, помимо напора H , определить на это же время напор или и фильтрационный расход q . Для нахождения последнего необходимо в выражениях (2) и (3) два неизвестных: искомая величина H'_0

$$(3) \quad H'_0 = \frac{1 + \frac{k_1}{q}}{H + q \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} - \frac{1}{\sum_{i=2}^n \frac{k_i}{m_i}} \right)}$$

ния

в момент определения напоров H и расхода определяется из выражения H'_0 связных пород в верхней части горизонта грунтовых вод величина

где H' — пьезометрическая высота в нижележащей точке, принимаемой за начало отсчета напора.

Выражение (4) приобретает при этом вид

$$q = k_2 \left(\frac{H' - H''}{a} \right), \quad (6)$$

в котором a — расстояние между верхней и нижней точками (рис. 1), а $H'' = h_2'' + a$, где h_2'' — пьезометрическая высота в верхней точке.

Подставив значение q из (6) в (5), получим

$$H'_0 = \frac{aH' \frac{k_1}{k_2} - a_2(H' - H'') \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right)}{H' - H'' + \frac{k_1}{k_2} \cdot a}. \quad (7)$$

Из выражения (7) можно видеть, что для определения истинного уровня грунтовых вод в рассматриваемом случае требуется лишь знать отношение коэффициентов фильтрации обоих верхних прослоев, положение замерных точек относительно границы раздела прослоев и расстояние между этими точками по вертикали. И, конечно, требуется знать величину напоров в замерных точках в тот момент, на который определяется истинный уровень грунтовых вод.

Если зона колебаний истинного уровня ограничивается только одним верхним прослоем связных пород, то в зависимости от мощности обводненной части верхнего прослоя при минимальном положении истинного уровня грунтовых вод обе замерные точки могут размещаться в пределах одного только верхнего прослоя или одна из них в верхнем, а вторая — во втором прослое. (Требуется, чтобы расстояние между замерными точками составляло не менее 0,8–1,0 м, чтобы разница напоров в них при вертикальном фильтрационном течении была значимой — не менее 0,01 м.)

В случае, когда обе замерные точки могут быть размещены в одном вертикальном прослое, для определения истинного уровня можно воспользоваться хорошо известной формулой (Минкин Е. Л., 1962), полученной для условий однородной в фильтрационном отношении толщи связных пород в верхней части горизонта грунтовых вод

$$H'_0 = \frac{aH'}{H' - H'' + a}, \quad (8)$$

получаемой из выражения (7) при подстановке $k_1/k_2 = 1$.

Для случая, когда в первом верхнем прослое может быть размещена только одна замерная точка, а вторая размещается уже во втором прослое на расстоянии a_2 ниже границы раздела (рис. 2), положение истинного уровня может быть найдено при подстановке в выражения (3) и (4)

значений $n = 2$, $m_2 = a_2$ и $P = 1$. При этом названные выражения будут иметь вид

$$H'_0 = \frac{H' + qa_2 \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right)}{1 + \frac{q}{k_1}}, \quad (9)$$

$$q = \frac{H' - H''}{\frac{a_2}{k_2} + \frac{a_1}{k_1}}, \quad (10)$$

где a_1 — превышение верхней замерной точки над границей раздела прослоев.

Подставив значение q из (10) в выражение (9), получим

$$H'_0 = \frac{(a_1 + a_2)H' + a_2H'' \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right)}{H' - H'' + (a_1 + a_2) + a_2 \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right)}. \quad (11)$$

В соответствии с вышеизложенным нахождение истинного уровня сводится в первую очередь к организации систематических наблюдений по этажным пьезометрам, размещенным описанным выше способом в зависимости от рассматриваемой схемы. Оборудование каждой скважины-пьезометра должно быть примерно одинаковым. При этом возможны два варианта: а) стенки скважины изолированы трубами, и вода поступает (или уходит) только через забой (точечный пьезометр); б) скважина оборудуется фильтром с тщательной его изоляцией сверху и снизу. В последнем случае рабочая часть фильтра не должна превышать 0,25 м, а расстояния между серединами фильтров этих пьезометров должны быть не менее 0,75 м.

Часто в полевых условиях оказываются затруднительными непосредственное определение значений коэффициентов фильтрации обоих верхних прослоев и нахождение отношения k_1/k_2 , входящего в основные расчетные зависимости (7) и (11).

Чтобы найти это отношение, можно использовать два способа. По первому способу следует непосредственно в поле определить положение истинного уровня способом «подлива». Для этого в соответствии с известными рекомендациями [1, 2] рядом с двумя имеющимися пьезометрами бурится третья скважина, первоначальная глубина которой определяется уровнями в имеющихся пьезометрах. Если в нижней замерной точке напор больше, то первоначальная глубина бурения — до отметки на 5 см — ниже уровня воды в верхней замерной точке. Если, наоборот,

напор больше в верхней замерной точке, то первоначальная глубина бурения — до отметки на 5 см — ниже уровня в нижней замерной точке. После этого в скважину подливается вода в количестве 0,1–0,2 л и скважина оставляется до следующего дня. Если утром обнаружится, что вода в скважине ушла, бурение продолжается еще на 0,1 м и снова подливается 0,1–0,2 л воды. Так продолжается до тех пор, пока в скважине не появится столб воды. Уровень воды в скважине и принимается как истинный уровень на момент замера. В этот же момент замеряется уровень и в обоих пьезометрах. В зависимости от схемы размещения замерных точек отношение k_1/k_2 определится из выражений:

а) при размещении обеих замерных точек в нижнем из двух верхних прослоев

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{(H' - H'')(H'_0 - a)}{a(H' - H'_0) - a_2(H' - H'')} ; \quad (12)$$

б) при размещении одной замерной точки в первом, а второй — во втором верхних прослоях

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{(H' - H'' + a_1)H'_0 - a_2(H' - H'') - a_1H'}{a_2(H'' - H'_0)} . \quad (13)$$

В выражениях (12) и (13) величина H'_0 — напор, соответствующий положению истинного уровня, найденного способом «подлива».

Второй способ определения отношения k_1/k_2 основан на оборудовании третьей замерной точки рядом с уже имеющимися двумя замерными точками. Если эти точки размещены обе в нижнем прослое, третью точку следует разместить в верхнем прослое, в зоне колебаний уровня. Если же замерные точки размещены одна в верхнем прослое, а вторая — в нижнем, третью точку следует разместить в нижнем прослое.

Отношение k_1/k_2 находится по этому способу попарным приравниванием правых частей выражений (7) и (11), записанных для соответствующих пар замерных точек, и решением полученного уравнения. При этом, конечно, выбираются такие периоды времени, когда все замерные точки находятся в обводненной части.

Определение инфильтрационного питания грунтовых вод или их расходования на эвапотранспирацию

Рассмотренная в предыдущем разделе методика установления истинного уровня грунтовых вод в ряде случаев может быть использована для приближенного определения величины их питания за счет инфильтрации или расходования на испарение и транспирацию. Действительно, зная изменения действительного уровня грунтовых вод (ΔH_0) и при-

нимая допущение о преимущественно вертикальной фильтрации в толще связных пород, можно составить балансовое уравнение

$$\mu_1 \Delta H_0 = q_{\text{ср}} \Delta t + w \cdot \Delta t, \quad (14)$$

где $q_{\text{ср}}$ — средний за период Δt фильтрационный расход по вертикали, определяемый в самом общем виде по формуле (4), а для более простых, рассмотренных в первом разделе, схем — по формулам (6) и (10); μ — недостаток насыщения (при $\Delta H_0 > 0$) или водоотдача (при $\Delta H_0 < 0$) того прослоя, в котором происходят колебания истинного уровня в период Δt ; w — инфильтрация (с обратным знаком — испарение).

Разрешив выражение (14) относительно w , получим

$$w = \mu \frac{\Delta H_0}{\Delta t} - q_{\text{ср}}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что стационарные наблюдения за уровнем попарным этажным пьезометром позволяют не только судить о режиме действительного уровня грунтовых вод при его размещении в толще связных пород, но и наблюдать за динамикой такой важной статьи водно-солевого баланса на орошаемых территориях, как инфильтрационное питание грунтовых вод и их расходование на испарение и транспирацию. Конечно, для этого необходимо располагать сведениями о величинах недостатка насыщения (или водоотдачи) и коэффициента фильтрации тех прослоев, где происходят колебания истинного уровня.

Чтобы определить величину недостатка насыщения (или водоотдачи), должны быть организованы специальные наблюдения за динамикой влажности в зоне аэрации. Методика этих наблюдений и обработки их результатов будут рассмотрены в отдельной статье в одном из следующих выпусков настоящего сборника.

Что касается определения значений коэффициента фильтрации верхних прослоев, в пределах которых происходят колебания уровня грунтовых вод, что необходимо для определения величины $q_{\text{ср}}$ в выражении (15) на разные периоды времени, то для этого могут быть рекомендованы два способа.

Во-первых, могут быть проведены лабораторные определения на образцах-монолитах, отобранных из этих прослоев, или (если фильтрационные свойства обводненной толщи связных пород сравнительно однородны) опытные наливов по методу Нестерова.

По второму способу искомые значения коэффициентов фильтрации могут быть найдены, если удастся установить такие периоды времени, когда заведомо известно, что ни инфильтрации, ни эвапотранспирации в это время нет. Как правило, такие условия часто имеют место в зимние месяцы. В этом случае, приравняв правую часть выражения (15) нулю и подставив значения q из выражений (6) или (10), получим соответственно

$$k_2 = \frac{a\mu}{H' - H''} \cdot \frac{\Delta H_0}{\Delta t} \quad (16)$$

и

$$k_2 = \frac{a_2 + a_1 \frac{k_2}{k_1}}{H' - H''} \mu \frac{\Delta H}{\Delta t}. \quad (17)$$

Так как отношение k_1/k_2 предполагается известным, то в случае, для которого приведено выражение (17), легко находится и значение k_1 .

Учитывая, что наблюдения за уровнями (напорами) в этажных пьезометрах могут быть автоматизированы, представляется возможным создание автоматического комплекса, включающего простейшую ЭВМ, позволяющего использование приведенных выше зависимостей для получения непрерывной информации о положении истинного уровня и о динамике инфильтрационного питания грунтовых вод или расходавания их на эвапотранспирацию. Исследования по созданию такого комплекса проводятся в Институте водных проблем АН СССР.

Литература

1. Минкин Е. Л. Уровень грунтовых вод в суглинках и методика его определения. БНТИ МГ и ОН СССР, 1958, № 4 (16).
2. Минкин Е. Л. К вопросу о режиме уровня грунтовых вод в условиях орошения. Сб. статей по геологии и гидрогеологии. Госгеолтехиздат, 1962.
3. Минкин Е. Л. Способ определения питания грунтовых вод или их расхода на испарение и транспирацию в условиях орошения. В сб.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии, № 20. Труды ВСЕГИН-ГЕО. Госгеолтехиздат, 1962.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА В СВЯЗИ С ПРОГНОЗОМ ВОДНОГО РЕЖИМА ЗОНЫ АЭРАЦИИ ПРИ ОРОШЕНИИ

Н. Е. Кошелева, И. С. Пашковский

В период освоения и эксплуатации орошаемых земель возникает необходимость решения ряда важнейших практических задач, связанных с прогнозом и оценкой изменения природной обстановки и, в частности, водного режима зоны аэрации и подъема уровня грунтовых вод.

Изучение изменения природных условий при орошении дает основание выделить два основных этапа, рассмотрение которых необходимо для прогноза водного и солевого режима на различных стадиях освоения территории [8]. Первый этап — переходного режима — соответствует начальному периоду орошения, когда подземные воды находятся еще на достаточно большой глубине и подъем их обусловлен фильтрационными потерями при орошении. Второй этап — эксплуатационного режима — характеризуется подъемом уровня к поверхности земли и непосредственным водообменом между подземными водами и корнеобитаемой зоной. Режим влажности и уровня подземных вод в этот период зависит не только от условий поступления и расходования влаги в корнеобитаемом слое, но и от условий оттока к дренажу.

При больших размерах орошаемого массива на слабодренируемых территориях боковым оттоком можно пренебречь и оценивать колебания уровня на основе вертикального влагопереноса, который определяется балансом осадков, испарения и запасов влаги в зоне аэрации. Особое значение при оценке изменений водного режима имеет изменчивость климатических условий, определяющая вероятностный характер прогноза. При этом искомыми являются статистические характеристики гидрогеологических процессов. Наиболее важными из них являются средние значения, дисперсии и эмпирические функции распределения.

Для решения задачи прогноза в такой постановке применительно к выделенным этапам целесообразно использовать одномерную геофильтрационную модель, в которой зона аэрации и зона насыщения рассматриваются совместно. Эта модель легко реализуется на ЭВМ и требует небольших затрат машинного времени по сравнению с получившимися распространение двумерными моделями. Вычислительная эффективность одномерной модели дает возможность осуществить имитацию орошения на фоне дренажа в многолетнем разрезе, задавая на вход модели реальные ряды метеорологических показателей или их искусственные реализации. Модель включает следующее уравнение [5]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = c \frac{\partial H}{\partial t} + E(t), \quad (1)$$

где $H = H(z, t)$ – напор; z – ордината точки над плоскостью сравнения, за которую будем принимать подошву водоносного горизонта; $k = k(\theta)$ – коэффициент влагопереноса; $c = c(H - z)$ – дифференциальная влагоемкость; $E(t)$ – интенсивность внутренних источников (стоков), через которую учитывается эвапотранспирация из верхнего корнеобитаемого слоя; t – время.

Зависимости коэффициента влагопереноса k от влажности θ , влажности и влагоемкости от давления $(H - z)$ аппроксимируются функциями вида

$$k = k_0 \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \right)^n, \quad (2)$$

$$c = \begin{cases} \frac{\theta_m - \theta_0}{H_k} \exp[(H - z)/H_k], & H < z, \\ 0, & H \geq z, \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 + (\theta_m - \theta_0) \exp[(H - z)/H_k], & H < z, \\ \theta_m, & H \geq z, \end{cases} \quad (4)$$

где H_k – приведенная высота капиллярного поднятия; θ_m – полная влагоемкость; θ_0 – влажность устойчивого завядания; k_0 – коэффициент фильтрации.

Для задания граничного условия на поверхности земли следует выделить граничный слой, включающий корнеобитаемую зону, мощность которой зависит от характера культуры и фазы ее роста. При поливах или выпадении осадков промачивание этого верхнего слоя происходит достаточно быстро вследствие его значительной проницаемости. Расхождение влаги из него осуществляется за счет эвапотранспирации и влагопереноса в более глубокие слои.

Баланс влаги верхнего слоя учитывается в модели через граничное условие и правую часть уравнения (1). Осадки задаются в верхнем граничном условии II рода при $\theta < \theta_m$

$$-k \frac{\partial H}{\partial z} = O c(t), \quad (5)$$

которое заменяется при $\theta = \theta_m$ и $-k \partial H / \partial z|_{z=M} < O c(t)$ на условие I рода

$$H = M, \quad (6)$$

где M – отметка поверхности земли.

При этом вычисляется величина поверхностного стока как разница между расходом, поступающим к поверхности земли, и расходом в почву. В зимний период времени вследствие частых оттепелей накопление снега не учитывается. Предполагается, что все осадки, выпавшие за месяц, расходуются на насыщение зоны аэрации и на поверхностный сток.

Эвапотранспирация $E(t)$ определяется в зависимости от температуры воздуха T и дефицита влажности e . Для рассматриваемых условий по данным трех МС (Одесса, Николаев, Баштанка) $e = 0,5 T$, т.е. для эвапотранспирации справедлива зависимость

$$E = \alpha T, \quad (7)$$

где $\alpha = 0,5 k_p$, k_p — биологический коэффициент растения. В зимний период при отрицательной температуре воздуха и понижении влажности ниже θ_0 $E = 0$.

Таким образом, для описания в модели гидрометеорологических условий на поверхности земли оказалось достаточным задание двух параметров: осадков и температуры воздуха.

На нижней границе зоны аэрации ($z = 0$) задается граничное условие II рода, пока свободная поверхность h не достигнет глубины заложения дрен h_d

$$-k \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad \text{при } h < h_d, \quad (8)$$

которое заменяется на условие III рода, когда начинается отток через дрена [1]

$$-k \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{h - h_d}{\Phi_d} \quad \text{при } h \geq h_d. \quad (9)$$

Оно характеризует связь напора между дренами с самой дренай. Здесь Φ_d — сопротивление дренажа, которое определяется в зависимости от конструкции дренажа и фильтрационных свойств дренируемой толщи. Положение свободной поверхности h находится из условия $H = z$, которое выполняется в точке, где давление $(H - z)$ меняет знак.

При орошении в корнеобитаемом слое, имеющем мощность m , создается оптимальный режим влажности. Регулирование влажности проводится в определенных пределах увлажнения — нижнего θ_n и верхнего θ_v

$$\theta_n \leq \theta \leq \theta_v. \quad (10)$$

Им соответствует поливная норма нетто $v_n = m(\theta_v - \theta_n)$. Значения θ_v и θ_n обычно устанавливаются на опытных агробиологических станциях. Если они имеют допуск, то они могут уточняться в дальнейшем при численных экспериментах. Когда в процессе имитации влажность в корнеобитаемом слое снижается до значения θ_n , моделируется полив:

влажность в корнеобитаемом слое мгновенно увеличивается до значения θ_v .

Для проведения расчетов по уравнению (1) необходимо также задание начальных условий для напоров. Но они мало влияют на результаты расчетов, так как емкость зоны аэрации сравнительно невелика. Поэтому начальные условия могут быть заданы приблизительно, в зависимости от сезона, и даже произвольно.

Решение системы уравнений (1)–(4), (7) с начальными и граничными условиями и ограничением (10) проводилось нами с помощью итерационного метода Гаусса-Зейделя для неявной конечно-разностной схемы. Вычисления велись по следующему алгоритму. Сначала по начальным значениям напоров вычислялись влажность и коэффициенты k и c , затем решалось уравнение (1) с граничными условиями (5), (6), (8), (9). Полученные из решения напоры использовались для определения влажности по формуле (4), которая, в свою очередь, использовалась для уточнения коэффициентов k и c , и вновь решалось уравнение (1). Эти вычисления повторялись до тех пор, пока изменение напоров и влажности от итерации к итерации становилось очень незначительным.

Этот вычислительный алгоритм учитывает нелинейный характер задачи, обусловленный ограничениями на влажность и параметры влагопереноса, а также переходом от одного рода граничных условий к другому. В этом алгоритме значительно смягчены требования к виду функций $k(\theta)$ и $\theta(H - z)$, которые могут быть аппроксимированы кусочно-дифференцируемыми зависимостями.

С помощью описанной модели можно рассчитать водный режим зоны аэрации орошаемого массива в течение года и определить средние значения и стандартные отклонения для расходов на УГВ, а также количество поливов в разные по водности годы. Для того чтобы судить о режиме работы оросительной системы за период эксплуатации, необходимо провести моделирование ее работы за многолетний период. С этой целью на входе модели можно использовать фактические ряды наблюдений за осадками и температурами воздуха. Однако более привлекательным представляется использование искусственных рядов, так как результаты расчетов по очень длинным рядам будут более надежными.

Нами была разработана простая вероятностная модель климата, позволяющая генерировать средние месячные температуры воздуха и осадки. Предполагалось, что эти показатели климата взаимно независимы и могут быть представлены периодическими процессами с периодом 1 год, к которым добавляются независимые нормально распределенные случайные величины. Случайный процесс такого типа был предложен в работе [6] для описания сезонной вариации осадков и температуры воздуха. Периодическая составляющая задается в виде средних многолетних значений месячных сумм осадков $\overline{O_s}(t)$ (температур $\overline{T}(t)$) по МС Баштанка в Одесской области, случайная составляющая

$\xi_1(t)$ $\xi_2(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию, равную дисперсии осадков (температуры) в соответствующем месяце.

Полученные таким образом ординаты внутригодового распределения осадков и температур умножаются на коэффициент α_1 или α_2 , учитывающие неравномерность лет по водности или теплу. Этот коэффициент имеет единичное математическое ожидание и дисперсию, равную дисперсии годовых сумм осадков или средней годовой температуры воздуха. В конечном виде расчетные формулы, по которым проводились вычисления сумм осадков и температур воздуха за месяц t , имеют вид

$$Oc(t) = (\overline{Oc}(t) + \sigma_{oc}(t) \xi_1(t)) \alpha_1^i, \quad (11)$$

$$T(t) = (\overline{T}(t) + \sigma_T(t) \xi_2(t)) \alpha_2^i, \quad (12)$$

где $t = \overline{1,12}$; $i = \overline{1,n}$ лет.

Эта простейшая стохастическая модель может быть уточнена путем учета положительной корреляции температуры и количества осадков в холодное время года и отрицательной корреляции в теплое время [4]. Ряды осадков и температур могут быть связаны, например, с помощью функции

$$Oc(t) = \alpha + \beta T(t) + \xi(t), \quad (13)$$

где $\xi(t)$ — доля $T(t)$, необъяснимая с помощью $Oc(t)$: α , β — параметры, определяемые по методу наименьших квадратов. При $\beta > 0$ $Oc(t)$ находится в фазе с $T(t)$, при $\beta < 0$ — в противофазе.

Уточнение модели возможно и за счет учета автокорреляции месячных величин осадков и температуры воздуха, хотя по этому вопросу не существует единого мнения. Так, Ч. Кайсл считает, что «инерционность месячных температур и «белые» серии осадков являются характерными для метеоявлений» [6]. П. Я. Гройсман склонен считать и месячные ряды «реализацией периодически коррелированного случайного процесса с периодом ковариации год» [3].

Для того чтобы установить целесообразность включения в модель перечисленных факторов, необходимо исследовать временную структуру метеорядов. Это потребует анализа большого объема данных наблюдений за осадками и температурами воздуха. В представленном же варианте мы ограничились заданием только средних многолетних значений температуры и осадков и их средних квадратичных отклонений. Поэтому при усложнении стохастической модели климата необходимо учитывать, что оно потребует значительного увеличения необходимой для этого информации и трудоемкости ее обработки.

Описанная модель влагопереноса совместно с вероятностной моделью климата была использована для оценки числа поливов и фильтрационных потерь в переходный период (при глубоком залегании уровня) и в эксплуатационный период (при работе дренажа) применительно к условиям юга Украины (Явкинская ОС). Начальная глубина до

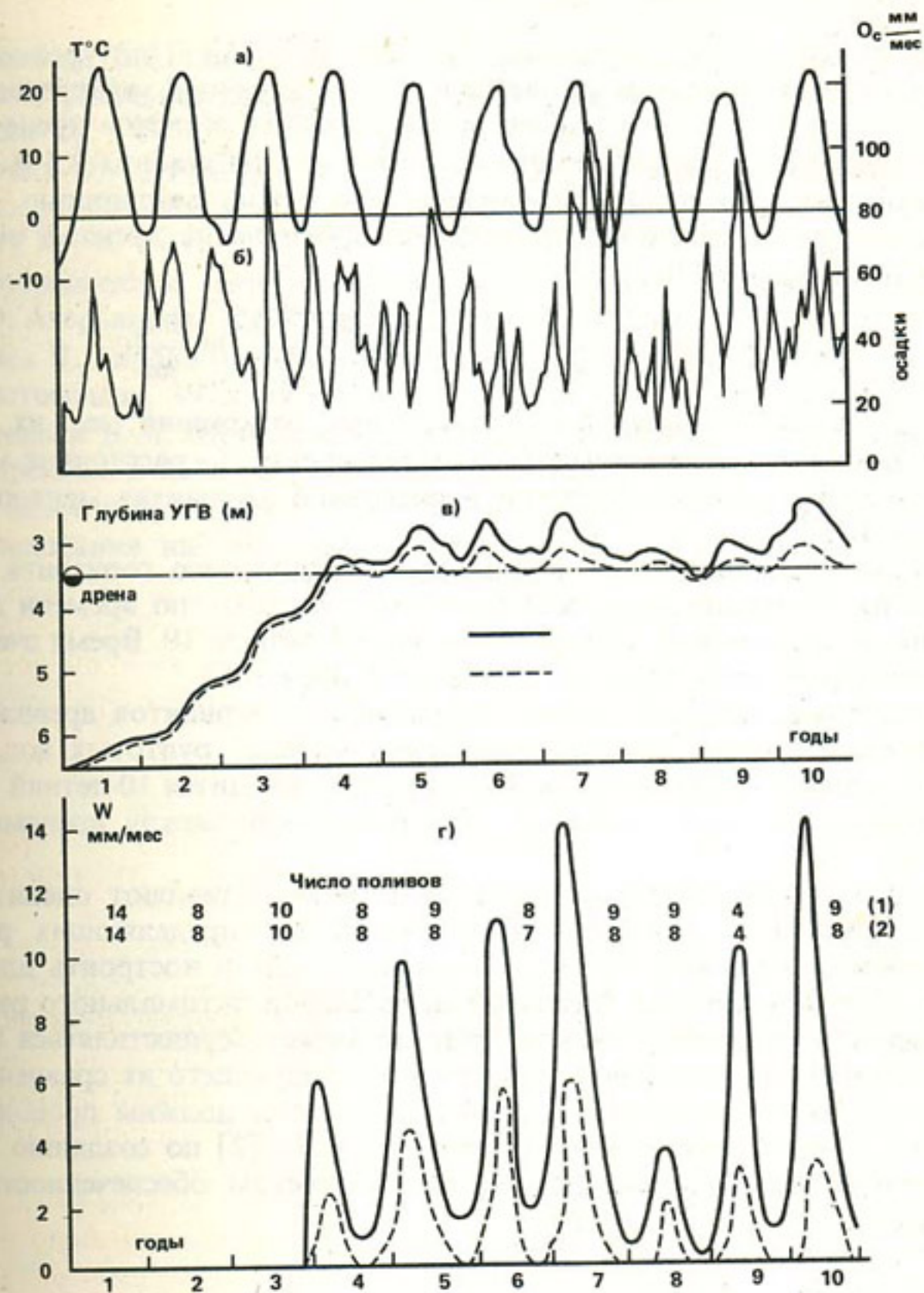


Рис. 1. Результаты имитации влагопереноса при орошении в условиях работы систематического дренажа:

а) температура воздуха; б) осадки; в) динамика уровня грунтовых вод во времени; г) модуля дренажа стока при расстоянии между дренами — 1–250 м и 2–100 м.
(8) — число поливов за год.

уровня грунтовых вод составляла 6,5 м. Зона аэрации до уровня подземных вод считалась однородной и имела следующие характеристики: $\theta_m = 0,45$, $\theta_0 = 0,17$, $k_0 = 0,01$ м/сут, $n = 3$, $H_k = 3$ м. Напор в дрене задавался равным 3 м, что соответствует глубине ее заложения 3,5 м. Регулирование влажности в корнеобитаемом слое мощностью 0,5 м осуществлялось в заданных пределах. Сопротивление дренажа определялось по формуле (7)

$$\Phi_d = \frac{T_b}{(0,125L^2 + LL_{нд}}, \quad L_{нд} = \frac{0,783 \cdot k'}{T_b} \ln \frac{2m_b}{\pi d}, \quad (14)$$

где k' — коэффициент фильтрации покровных отложений; m_b — их мощность; T_b — водопроводимость; d — диаметр дрены; L — расстояние между дренами. Сопротивление дренажа в различных вариантах менялось от 10^{-3} до 10^{-4} 1/сут.

Для расчетов вся толща до подошвы водоносного горизонта была разбита на 10 блоков размером $\Delta x = 1$ м. При шаге по времени $\Delta t = 1$ сутки число итераций на каждом шаге не превышало 10. Время счета на ЭВМ для 20-летнего периода составило 5 мин.

В результате моделирования для различных вариантов дренажа получены ряды средних месячных значений уровня грунтовых вод, дренажного стока и число поливов. На рисунке приводится 10-летний фрагмент рядов для двух вариантов — при расстоянии между дренами 250 и 100 м.

Данные моделирования многолетнего ряда позволяют оценить вероятностные характеристики для показателей, определяющих режим увлажнения почв и интенсивность потоков влаги, и построить для них соответствующие кривые обеспеченности. Выбор оптимального режима увлажнения и расстояний между дренами может осуществляться путем многовариантных расчетов по модели и последующего их сравнения на основе технико-экономических расчетов. Расчеты должны проводиться в соответствии с имеющимися рекомендациями [2] по созданию оптимального водного и солевого режимов с учетом обеспеченности его показателей.

Литература

1. Аверьянов С.Ф., Голованов А.И., Никольский Ю.Н. Расчет водного режима мелиорируемых земель. Гидротехника и мелиорация, 1974, № 3, с. 34–38.
2. Айдаров И.П., Голованов А.И., Мамаев М.Г. Оросительные мелиорации. М., Колос, 1982, 176 с.

3. Гройсман П. Я. Оценка автокорреляционных матриц рядов осадков, рассматриваемых как периодически коррелированные случайные процессы. Тр. ГГИ, 1977, вып. 247, с. 119–127.
4. Дроздов О. А., Григорьева А. С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1971, 158 с.
5. Изотермическое передвижение влаги в зоне аэрации. Под ред. С. Ф. Аверьянова. Л., Гидрометеиздат, 1972, 168 с.
6. Кайсл Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных. Л., Гидрометеиздат, 1972, 140 с.
7. Шестаков В. М. Методические указания по расчетам систематического дренажа в слоистых системах. М., Изд. ВСЕГИНГЕО, 1966, 66 с.
8. Шестаков В. М., Пашковский И. С., Сойфер А. М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М., Недра, 1982, 244 с.

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ МЕЛИОРАТИВНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

С.М. Голубев, А.М. Сойфер, А.И. Шмаков

В современных условиях дефицит пресных вод во многих районах мира, особенно в аридных областях, предопределяет необходимость тщательного исследования проблемы рационального использования водных ресурсов, в частности комплексного использования поверхностных и подземных вод. В области ирригации, являющейся основным потребителем водных ресурсов, задача чаще всего сводится к исследованию возможности использования фильтрационных потерь из поверхностных источников орошения, отбора подземных вод, формирующихся за счет естественных источников питания (в частности, временных водотоков в предгорных районах), учету взаимодействия поверхностных и подземных вод в зонах влияния крупных водоемов и водотоков. Специальный характер носит задача обоснования возможной экономии водных ресурсов при изучении проектов реконструкции старых оросительных систем, эксплуатируемых на протяжении многих десятилетий. Эти системы (часто полуинженерного типа) были построены исходя из предпосылки использования только поверхностных вод в условиях хорошей обеспеченности водными ресурсами. Опыт и многолетние наблюдения впоследствии показали, что ирригационное освоение в широких масштабах долин крупных рек в аридных областях за счет использования поверхностного стока имеет и ряд негативных последствий, выражающихся, в частности, в следующем:

- происходит значительный подъем уровня грунтовых вод ($H = 10-30$ и более метров), который в общем масштабе выражается значительными потерями водных ресурсов на заполнение емкости зоны аэрации;

- приближение уровня грунтовых вод к поверхности земли влечет за собой развитие процесса их засоления, вследствие этого горизонтальным дренажом возвращаются в водоток минерализованные воды и ухудшается качество речной воды в нижней части долины.

С учетом этих положений решение задачи рационального комплексного использования поверхностных и подземных вод представляется актуальными при исследовании проектов реконструкции ирригационных систем.

Исторически развитие ирригации складывалось таким образом, что осваивались лучшие земли, приближенные к источникам питания. В настоящее время развитие ирригации происходит в более сложных условиях, при этом часто осваиваются гипсометрически верхние части предгорных областей, высокие террасы рек, водораздельные равнины и другие районы. Для этих условий характерно активное гидродинамическое взаимодействие водоносных комплексов в пределах всего бассейна, включая староорошаемые земли, поэтому весь гидрогеологический бассейн должен быть объектом прогнозных исследований при изучении проблемы использования подземных вод в комплексе с поверхностными.

Для новых районов орошения, развивающихся на основе межбассейного перераспределения стока, возникает необходимость решения задач совершенно иного типа — прогнозной оценки гидродинамической роли новых водных трактов и ирригационных источников питания, коренным образом преобразующих гидрогеологические условия бассейнов с обедненным (до этого) подземным стоком.

Опыт исследований рассматриваемого направления, проведенных институтами Минводхоза СССР по многим объектам ирригационного строительства в СССР и многих других странах, показал, что при благоприятных гидрогеологических условиях рациональное использование ресурсов и емкостей бассейнов подземных вод с максимальной интенсификацией их отбора в периоды наибольшего водопотребления позволяет сократить забор из поверхностного источника до 20–25% от объема водопотребления, необходимого для ирригации.

Разнообразие и многоплановость задач гидрогеологического обоснования рационального использования водных ресурсов определяют необходимость целенаправленной постановки задачи и предварительного обоснования конкретных исследований [1]. Опыт исследований свидетельствует о необходимости создания математической модели объекта на самых ранних стадиях и проведения предварительных прогнозных расчетов, позволяющих обосновать постановку полевых исследований, выявить типовые фрагменты объекта (региональные линии тока, зоны влияния гидродинамических границ) для постановки локальных обратных задач. Упуская здесь рассмотрение традиционных аспектов гидрогеологических исследований (постановка разведки, опробования, геофильтрационная схематизация), остановимся на вопросах создания математических моделей крупных объектов.

Исследование этого направления показали прежде всего бесперспективность создания сложных универсальных моделей и целесообразность тщательного поиска путей упрощения моделей исследуемого процесса на основе геофильтрационной схематизации. Усложнение модели ведет к увеличению материальных затрат на ее создание и эксплуатацию, поэтому в большинстве случаев предел сложности модели определяется техническими возможностями средств вычислительной техники. Нельзя

не учитывать и то обстоятельство, что работа с моделью (подготовка и проверка исходных данных, подбор отдельных параметров, определяющих ход вычислительного процесса, обработка получаемых результатов) упрощается с понижением ее сложности. Объем и степень достоверности имеющейся исходной информации должны также учитываться при создании модели. Чем сложнее модель, тем выше уровень требований к качеству исходных данных, произвольное же введение недостающей информации на основе упрощающих допущений создает лишь иллюзию точности получаемых результатов, являясь в действительности источником трудновывяемых ошибок [5].

Изучение закономерностей регионального геофильтрационного потока целесообразно производить на одной крупной математической модели, которая строится на основе гидрогеологической модели, полученной на этапе схематизации, и учитывает всю совокупность действующих факторов. При этом проводящая среда рассматривается обычно как совокупность хорошо проводящих пластов и разделяющих слоев, геофильтрационный поток считается планово-плоским, нестационарным. Такая модель, как правило, достаточно сложна, однако значительного ее упрощения можно достигнуть, если использовать все особенности данной задачи. Модель такого рода можно считать постоянно действующей моделью (ПДМ) объекта.

Нельзя считать, что создание ПДМ процесс однократный. Связано это с тем, что часто модель строится уже на ранних стадиях гидрогеологических исследований объекта, и информация, заложенная в нее, постоянно уточняется и дополняется. На ранних стадиях создания модели зачастую остаются открытыми вопросы о количественной значимости различных внешних факторов, о локальном учете трехмерности потока в районе скважин, водозаборов, вопросы взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Кроме того, региональная модель может оказаться довольно грубой в районе отдельных сооружений, где требуется более детальный учет локальных факторов.

Указанные обстоятельства свидетельствуют в пользу создания спектра моделей различной сложности, призванных решить целый ряд частных задач. С одной стороны, локальные модели строятся на основе постоянно действующей модели объекта, поставляющей информацию о граничных условиях для выделенного фрагмента области, с другой — расширяют возможности региональной модели в плане детальной проработки отдельных важных фрагментов области, позволяют произвести количественную проверку основных предпосылок, положенных в основу большой модели, и вычислить отдельные параметры большой модели (например, несовершенство скважин, русел водотоков и др.).

При создании математического обеспечения необходимо учитывать особенности создаваемых моделей. Рассмотрим, в частности, аспекты, связанные с выбором методов численного моделирования.

Главными требованиями к численному методу, положенному в осно-

ву специализированного программного обеспечения региональной ПДМ, являются его эффективность в условиях конкретной задачи и правильность воспроизведения физики процесса. Под эффективностью метода в данном случае подразумевается экономия ресурсов ЭВМ (используемый объем оперативной памяти, процессорное время работы) при получении решения с заданной точностью.

Пространственная дискретизация области фильтрации, определяющая объем используемой оперативной памяти ЭВМ, традиционно осуществляется одним из двух методов — конечных разностей или конечных элементов. Практическое сравнение этих методов показывает примерно равную их точность. Большая физическая наглядность метода, а также близость его идей принципам аналогового моделирования на сеточных электроинтеграторах говорят в пользу метода конечных разностей. Сильной стороной метода конечных элементов является возможность использования различных по форме и размерам полигональных элементов, хорошо аппроксимирующих контуры внутренних и внешних границ области. Использование таких элементов вместо регулярных прямоугольных более предпочтительно, на наш взгляд, в специализированном программном обеспечении ПДМ по следующим причинам. Во-первых, применение полигональной разбивки позволяет значительно сократить общее число элементов, на которое разбивается область. Во-вторых, поскольку в ПДМ ввод и контроль информации о геометрии области производятся однократно, увеличение объема исходной информации, связанное с применением полигональной разбивки, не играет существенной роли.

Применение полигональной разбивки возможно и в рамках метода конечных разностей, при этом единственным ограничением являются случаи моделирования анизотропных проводящих сред, когда стороны элементов трудно сориентировать в направлении главных осей анизотропии.

При решении нестационарных задач фильтрации временную производную можно аппроксимировать как по методу конечных разностей, так и конечных элементов. Сравнение этих двух способов показало [7], что с вычислительной точки зрения более предпочтительна конечно-разностная схематизация временной производной.

Результаты тестирования различных конечно-разностных схем [6] позволяют дать некоторые практические рекомендации. В частности, выявлена зависимость эффективности экономических схем с расщеплением разностного оператора и схемы Кранка-Никольсона от параметров решаемой задачи. Несмотря на абсолютную вычислительную устойчивость этих схем, ограничения на допустимую величину временного шага все же приходится накладывать, чтобы избежать недопустимых колебаний в решении, появляющихся при нарушении условия монотонности. В этой связи эффективность указанных схем падает с увеличением времени прогноза. Напротив, эффективность неявной

схемы практически не зависит от параметров решаемой задачи. Более того, она надежна, так как обладает свойством безусловной монотонности, т.е. погрешности в решении не искажают физики процесса. По этим причинам неявная схема наиболее предпочтительна для создания сложных региональных постоянно действующих моделей. Усилия, направленные на поиски эффективной реализации неявной схемы, оправдываются для крупной модели при ее эксплуатации.

В условиях создания специализированного программного обеспечения ПДМ есть возможность значительного повышения общей эффективности модели путем одновременного использования нескольких методов. Это позволяет от принципа универсализации перейти к использованию более совершенного принципа адаптации программного обеспечения к решаемой задаче.

Локальные модели создаются для выяснения частных вопросов, и поэтому используются, как правило, однократно. Применение полигональных сеток теперь уже нельзя считать оправданным, поскольку увеличение объема исходной информации и сложности ее контроля в значительной мере замедляет процесс моделирования. Здесь важна гибкость, универсальность программного обеспечения. На этой стадии становится возможным применение экономичных, но не монотонных конечно-разностных схем, использующих идею расщепления разностного оператора [3]. Появляющиеся осцилляции в решении как следствие немонотонности схем хотя и искажают физику процесса, однако, если находятся в пределах допустимой погрешности, не препятствуют получению количественных характеристик. Поэтому в отличие от ПДМ локальные модели целесообразно создавать средствами специализированного пакета прикладных программ [4]. Такой пакет представляет пользователю возможность решения широкого класса геофильтрационных задач, а также наглядного представления результатов в виде карт, графиков и т.д. Вместе с тем унифицированные средства ввода исходной информации, единые формы выходной документации обеспечивают легкость перехода с одного класса задач на другой, соединяя требования гибкости программного обеспечения с его эффективностью.

Таким образом, решение прогнозных мелиоративно-гидрогеологических задач в свете современных представлений рассматривается как сложный комплекс прикладных исследований, включающих как изучение и схематизацию природных условий, так и обоснование математического обеспечения региональной постоянно действующей модели бассейна подземных вод. При этом, учитывая обычно ограниченный объем количественной гидрогеологической информации, значительная роль отводится решению серии частных задач на локальных моделях-фрагментах, таких, как профильные задачи по линиям тока естественного потока подземных вод, зонам влияния рек, каналов, линейного дренажа и другие. Решения локальных задач важны не только для обоснования конкретных инженерных решений, но и для более эффективной плано-

вой экстраполяции количественной информации. Опыт прогнозных мелиоративно-гидрогеологических исследований показывает, что надежные результаты прогнозов не могут быть получены без использования практических данных по строительству и эксплуатации мелиоративных систем в рассматриваемых или аналогичных условиях. Поэтому представляется целесообразным, чтобы применение постоянно действующих моделей крупных бассейнов подземных вод, перспективных для развития мелиорации или являющихся аналогами новых объектов, не ограничивалось прогнозными исследованиями. Эти ПДМ целесообразно развивать вводом новой информации по периодам строительства и эксплуатации новых систем, включая решения задач по проверке в натуре результатов прогнозных и проектных расчетов. Эти исследования при соответствующей их постановке могут дать неоценимую по важности информацию для внесения корректив в очередность строительства дренажа и режим эксплуатации, для разработки проектов новых мелиоративных систем и особенно проектов реконструкции, а также для совершенствования теоретических основ и методологии мелиоративно-гидрогеологических прогнозов.

Литература

1. Шестаков В. М., Пашковский И. С., Сойфер А. М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М.: Недра, 1982.
2. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1978, 512 с.
3. Самарский А. А. Введение в численные методы. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982, 272 с.
4. Колочинский В. Ю., Скворцов Ю. Л., Шмаков А. И. Автоматизированная система обработки данных (АСОД) изысканий для объектов мелиоративного строительства. Тезисы докладов IV Межведомственного совещания по мелиоративной гидрогеологии, инженерной геологии и мелиоративному почвоведению. Методы гидрогеологических, инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных прогнозов. М., 1980, с. 125–131.
5. Воеводин А. Ф., Шугрин С. М. Численные методы расчета одномерных систем. — Новосибирск. Наука. Сибирское отделение, 1981, 208 с.
6. Шмаков А. И. Решение прогнозных задач геофильтрации численными методами. — В сб.: Рациональное использование водных ресурсов, 1984, с. 116–121.
7. Neuman S. P. Saturated – unsaturated seepage by finite elements. I. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng., 99 (HY12), 2233–2250, 1973.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ ИЗ КАНАЛА

Г. Н. Хлыбов

При составлении гидрогеологического прогноза, базирующегося на решении уравнений фильтрации, проводимость водоносных пластов и их емкость известны с погрешностью, связанной как с ошибками определения этих параметров в результате опытных опробований, так и с дискретностью опробований. Существует бесконечное множество реализаций распределения коэффициентов емкости и проводимости водоносных пластов, соответствующих имеющимся экспериментальным данным, и это множество может быть описано случайными функциями координат.

Каждой реализации пространственного распределения коэффициентов емкости и проводимости пласта соответствует реализация распределения прогнозируемых гидрогеологических параметров: уровня грунтовых вод, потоков и др. Используя методы решения дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами (7), можно получить свойства ансамбля реализаций распределения прогнозируемых параметров, такие, как среднее значение, корреляционную функцию, дисперсию, которая характеризует ошибку прогноза.

В работе рассматривается прогноз уровня грунтовых вод при фильтрации воды из канала в полуограниченный напорный пласт с коэффициентами емкости и проводимости, имеющими случайные неоднородности. Уровень грунтовых вод в такой системе удовлетворяет дифференциальному уравнению фильтрации

$$M \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} T \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} T \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (1)$$

где T — проводимость водоносного пласта; M — емкость пласта.

Начальные и граничные условия этого уравнения имеют вид

$$H|_{t=0} = 0 \quad H|_{y=0} = H_r \quad H|_{y \rightarrow \infty} = 0. \quad (2)$$

Представим параметры среды M , T в виде

$$\begin{aligned} M &= M_0 + \mu(x, y) \\ T &= T_0 + \kappa(x, y), \end{aligned} \quad (3)$$

где M_0 , T_0 — средние значения параметров среды по рассматриваемой области; μ , κ — случайные отклонения от средних значений.

Вводя безразмерные параметры соотношениями

$$\tilde{t} = \frac{4at}{y_0^2}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{y_0}, \quad \tilde{\mu} = \frac{\mu}{M_0}, \quad \tilde{\kappa} = \frac{\kappa}{T_0}, \quad \tilde{H} = \frac{H}{H_r}, \quad (4)$$

где a — коэффициент уровнепроводности; y_0 — характерный размер области прогноза, и упуская для удобства обозначений знак « $\sim$ », перепишем (1), (2) в виде

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{4} \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{1}{4} \frac{\partial}{\partial y} \kappa \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{4} \frac{\partial}{\partial x} \kappa \frac{\partial H}{\partial x} - \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$$H|_{t=0} = H|_{y=0} = 1, \quad H|_{y \rightarrow \infty} = 0. \quad (6)$$

Предположим, что отклонения емкости и проводимости пласта от средних значений малы, т.е. выполняются соотношения

$$\langle \mu^2 \rangle \ll 1, \quad \langle \kappa^2 \rangle \ll 1. \quad (7)$$

Угловые скобки обозначают усреднение по совокупности возможных реализаций пространственного распределения этих параметров. В этом случае уравнение (5) можно решать, используя метод малых возмущений [2, 6]. Будем искать решение (5) в виде

$$H = H_0 + H_1 + H_2 + \dots, \quad (8)$$

причем

$$H_0 \gg H_1 \gg H_2 \gg \dots$$

Рассматривая случайные отклонения параметров среды от средних значений как возмущения, получим уравнение нулевого приближения

$$\frac{\partial H_0}{\partial t} = \frac{1}{4} \frac{\partial^2 H_0}{\partial y^2}. \quad (9)$$

Решение этого уравнения с граничными условиями (6) имеет вид

$$H_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{y/t}^{\infty} e^{-u^2} du = \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{\sqrt{t}}\right). \quad (10)$$

Подставляя это решение в (5), учитывая (8) и пренебрегая членами второго порядка малости, получим уравнение первого приближения

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} = \frac{1}{4} \frac{\partial^2 H_1}{\partial y^2} + f(x, y, t), \quad (11)$$

где

$$f = -\mu \frac{\partial H_0}{\partial t} + \frac{1}{4} \frac{\partial}{\partial y} \kappa \frac{\partial H_0}{\partial y} = -\mu \frac{y}{\sqrt{\pi t^3}} e^{-y^2/t} - \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \frac{\partial}{\partial y} (\kappa e^{-y^2/t})$$

—возмущающая функция, представляющая источники, образованные рассеянием невозмущенного потока на случайных неоднородностях среды.

Решение этого уравнения с нулевыми начальными и граничными условиями для произвольной реализации распределения емкости и проводимости пласта может быть записано через функцию Грина невозмущенной задачи

$$H_1 = \int_0^t \iint_{\Omega} G(r, \rho, t, \tau) \cdot f(\rho, \tau) d\Omega d\tau, \quad (12)$$

где

$$G(r, \rho, t, \tau) = \frac{1}{\pi(t-\tau)} [e^{-|r-\rho|^2/(t-\tau)} - e^{-|r+\rho|^2/(t-\tau)}];$$

$|r-\rho| = \sqrt{(x-\zeta)^2 + (y+\eta)^2}$ — расстояние между точкой наблюдения r с координатами (x, y) и произвольной текущей точкой ρ с координатами (ζ, η) ; $|r+\rho| = \sqrt{(x+\zeta)^2 + (y+\eta)^2}$ — расстояние между точкой наблюдения и зеркальным изображением текущей точки ρ относительно оси x . Интегрирование в (12) производится по полуплоскости $y > 0$.

Усредняя полученное решение по совокупности возможных реализаций пространственного распределения емкости и проводимости пласта, найдем, что

$$\langle H \rangle = H_0 \quad \langle H_1 \rangle = 0. \quad (13)$$

При этом мы учли, что в силу линейности операций интегрирования, дифференцирования и усреднения можно менять порядок их выполнения, а также, что

$$\langle M \rangle = M_0 \quad \langle T \rangle = T_0 \quad \langle \mu \rangle = 0 \quad \langle \kappa \rangle = 0. \quad (14)$$

Соотношение (13) показывает, что с точностью до членов второго порядка малости в качестве среднего значения уровня грунтовых вод может быть использовано решение невозмущенного уравнения (9), как это и делается обычно, когда емкость и проводимость пласта представляются детерминированными функциями.

Отклонение от среднего значения уровня грунтовых вод характеризуется дисперсией случайной функции $H(r, t)$, для нахождения которой вычислим вначале корреляционную функцию случайного процесса $H(r, t)$. Эта корреляционная функция определяется соотношением

$$\begin{aligned} K(r, r', t, t') &= \langle H(r, t) \cdot H(r', t') \rangle - \langle H(r, t) \rangle \langle H(r', t') \rangle = \\ &= \langle H_1(r, t) \cdot H_1(r', t') \rangle. \end{aligned} \quad (15)$$

Предел этого выражения при $r \rightarrow r', t \rightarrow t'$ представляет дисперсию случайной функции $H(r, t)$.

Подставляя в (15) отклонение уровня грунтовых вод от среднего значения из (12) и усредняя по совокупности возможных реализаций пространственного распределения емкости и проводимости пласта, находим

$$K(r, r', t, t') = \int_0^t \int_0^{t'} \iiint_{\Omega} \iiint_{\Omega} G(r, \rho, t, \tau) \cdot G(r', \rho', t', \tau') \times \\ \times \langle f(\rho, \tau) \cdot f(\rho', \tau') \rangle d\Omega' d\Omega d\tau' d\tau, \quad (16)$$

где

$$\langle ff' \rangle = \frac{1}{4\sqrt{\tau\tau'}} \frac{\partial^2}{\partial\eta\partial\eta'} [\langle \kappa(\zeta, \eta) \cdot \kappa(\zeta', \eta') \rangle e^{-\eta^2/\tau - \eta'^2/\tau'}] + \\ + \frac{\eta\eta'}{4(\tau\tau')^{3/2}} \langle \mu(\zeta, \eta) \cdot \mu(\zeta', \eta') \rangle e^{-\eta^2/\tau - \eta'^2/\tau'} + \frac{\eta}{4\sqrt{\tau^3\tau'}} \\ \frac{\partial}{\partial\eta'} [\langle \mu(\zeta, \eta) \cdot \kappa(\zeta', \eta') \rangle e^{-\eta^2/\tau - \eta'^2/\tau'}] + \\ + \frac{\eta'}{4\sqrt{\tau\tau'^3}} \frac{\partial}{\partial\eta} [\langle \kappa(\zeta, \eta) \cdot \mu(\zeta', \eta') \rangle \times e^{-\eta^2/\tau - \eta'^2/\tau'}]$$

— корреляционная функция возмущающего члена.

В выражении для $\langle ff' \rangle$ первый член определяется неоднородностью распределения проводимости пласта, второй член — неоднородностью распределения коэффициента емкости, третий и четвертый члены — возможной корреляцией между емкостными и проводящими свойствами среды.

Для корреляционных функций отклонений от среднего значения емкости и проводимости пласта по аналогии с [4] можно использовать гауссовский закон корреляции

$$\langle \kappa(\zeta, \eta) \cdot \kappa(\zeta', \eta') \rangle = \langle \kappa^2 \rangle e^{-(\rho - \rho')^2 / r_k^2} \\ \langle \mu(\zeta, \eta) \cdot \mu(\zeta', \eta') \rangle = \langle \mu^2 \rangle e^{-(\rho - \rho')^2 / r_k^2} \quad (17) \\ \langle \mu(\zeta, \eta) \cdot \kappa(\zeta', \eta') \rangle = \langle \kappa(\zeta, \eta) \cdot \mu(\zeta', \eta') \rangle = \langle \mu\kappa \rangle e^{-(\rho - \rho')^2 / r_k^2},$$

где r_k — эффективный размер неоднородности пространственного распределения емкости и проводимости пласта; $\langle \mu^2 \rangle$, $\langle \kappa^2 \rangle$ — дисперсия пространственного распределения емкости и проводимости пласта; $\langle \mu\kappa \rangle$ — взаимная корреляция отклонений емкости и проводимости пласта от средних значений.

Подставляя в (16) выражения (17), (12) и преобразуя область интегрирования, найдем

$$K(r, r', t, t') = \frac{1}{8\pi^3} \int_0^t \int_0^{t'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\langle \mu^2 \rangle \eta \eta'}{(\tau\tau')^{3/2} (t - \tau)(t' - \tau')} + \right.$$

$$+ \frac{\langle \kappa^2 \rangle (y - \eta)(y' - \eta')}{\sqrt{\tau \tau'} (t - \tau)^2 (t' - \tau')^2} - \frac{\langle \mu \kappa \rangle \eta (y' - \eta')}{\sqrt{\tau^3 \tau'} (t - \tau)(t' - \tau')^2} - \frac{\langle \mu \kappa \rangle \eta' (y - \eta)}{\sqrt{\tau \tau'^3} (t - \tau)^2 (t' - \tau')} \Big] \quad (18)$$

$$\left\{ \exp \left[- \frac{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2}{t - \tau} - \frac{(x' - \zeta')^2 + (y' - \eta')^2}{t' - \tau'} - \frac{(\zeta - \zeta')^2 + (\eta - \eta')^2}{r_k^2} - \frac{\eta^2}{\tau} - \frac{\eta'^2}{\tau'} \right] + \right. \\ \left. + \exp \left[- \frac{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2}{t - \tau} - \frac{(x' - \zeta')^2 + (y' - \eta')^2}{t' - \tau'} - \frac{(\zeta + \zeta')^2 + (\eta + \eta')^2}{r_k^2} - \frac{\eta^2}{\tau} - \frac{\eta'^2}{\tau'} \right] \right\} d\zeta d\zeta' d\eta d\eta' d\tau d\tau'.$$

Выполним в этом выражении интегрирование по пространственным координатам $\zeta, \zeta', \eta, \eta'$ [1]. Сделаем замену переменных $u = \tau/t, v = \tau'/t'$. Положим $t = t', x = x', y = y'$. Введем параметры Фурье для характерного размера неоднородности $R^2 = r_k^2/t$ и расстояния до канала $Y = y^2/t$ и представим дисперсию уровня грунтовых вод в виде трех слагаемых, связанных со случайными неоднородностями пространственного распределения проводимости пласта, его емкости и возможной корреляцией между емкостными и проводящими свойствами среды

$$D(H) = \langle \kappa^2 \rangle D_\kappa + \langle \mu^2 \rangle D_\mu - 2 \langle \mu \kappa \rangle D_{\mu\kappa}. \quad (19)$$

При этом имеют место выражения

$$D_\kappa = \frac{R^2}{2\pi} e^{-2Y^2} \int_0^1 \int_0^1 \frac{uv(E_1 - E_2)}{2\sqrt{PQ^3}} + \quad (20) \\ + \frac{Y^2}{\sqrt{PQ^5}} \{ E_1 [R^2 + (u + v)(1 - u)] [R^2 + (u + v)(1 - v)] + \\ + E_2 [R^2 + v + u(1 - u + v)] [R^2 + u + v(1 - v + u)] \} dudv, \\ D_\mu = \frac{R^2}{2\pi} e^{-2Y^2} \int_0^1 \int_0^1 \frac{(1 - u)(1 - v)(E_1 - E_2)}{2\sqrt{PQ^3}} + \\ + \frac{Y^2}{\sqrt{PQ^5}} \{ E_1 [R^2 + u(2 - u - v)] [R^2 + v(2 - u - v)] + E_2 [R^2 + v(u - v)] \times \\ \times [R^2 + u(v - u)] \} dudv,$$

$$D_{\mu\kappa} = \frac{R^2}{2\pi} e^{-2Y^2} \int_0^1 \int_0^1 \frac{[u(1-v) + v(1-u)](E_2 - E_1)}{2\sqrt{PQ^3}} + \frac{Y^2}{\sqrt{PQ^5}} \times$$

$$\times \{E_1 [R^2 + u(2-u-v)] [R^2 + (u+v)(1-v)] + E_1 [R^2 + v(2-u-v)] \times \\ \times [R^2 + (u+v)(1-u)] + E_2 [R^2 + u(v-u)] \cdot [R^2 + u+v(1-v+u)] + \\ + E_2 [R^2 + v(u-v)] [R^2 + v+u(1-u+v)]\} dudv,$$

где $E_1 = e^{-Y^2(u-v)^2/Q}$, $E_2 = e^{-Y^2(u+v)^2/Q}$, $Q = R^2 + u(1+u) + v(1-v)$, $P = R^2 + 2 - u - v$.

Для практического использования можно получить приближенные значения выражений дисперсии уровня грунтовых вод, дающие удовлетворительную точность в большинстве практически важных случаев.

Прежде всего заметим, что для $Y \gg 1$ дисперсия уровня грунтовых вод экспоненциально мала. Это связано с тем, что изменение уровня «не успевает дойти» до точек, отстоящих от канала на расстоянии $y \gg 4at$, и уровень грунтовых вод остается равным своему первоначальному значению независимо от распределения неоднородностей среды. Практически уже при $Y > 3$ ошибками в определении уровня можно пренебречь. Поэтому в дальнейшем, если не будет оговорено особо, мы будем предполагать, что $Y < 3$.

Рассмотрим вначале поведение уровня грунтовых вод на ранних стадиях процесса фильтрации, когда справедливо неравенство $R \gg 1$ или в размерном виде $r_k \gg 2\sqrt{at}$. В этом случае экспоненты E_1 и E_2 могут быть разложены в ряд Тейлора, и для (20) имеют место приближенные выражения

$$D_\kappa = D_\mu = D_{\mu\kappa} = \frac{Y^2}{\pi} e^{-2Y^2}. \quad (21)$$

Этот результат может быть получен непосредственно из (10), если предположить, что емкость и проводимость пласта в этом выражении испытывают малые отклонения от средних значений.

На поздних стадиях процесса фильтрации выполняется неравенство $R \ll 1$. В этом случае экспоненты E_1 и E_2 можно разложить в ряд Тейлора только для малых расстояний от канала, когда $y \ll r_k$. При этом приближенные выражения для (20) имеют вид

$$D_\kappa = \frac{3}{2\pi} Y^2 \quad D_\mu = \frac{3\sqrt{2}R^2}{4\pi} Y^2, \\ D_{\mu\kappa} = \frac{R^2}{2\pi} (3 + 2\ln R) Y^2. \quad (22)$$

Для вычисления дисперсии уровня грунтовых вод на больших по сравнению с размером неоднородностей расстояниях от канала воспользуемся тем обстоятельством, что экспоненты E_1 и E_2 имеют при $Y \gg R$ острый максимум вдоль прямых $u = v$ и $u = -v$. Соответственно и применяя метод перевала [3], найдем асимптотические выражения для (20)

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{R}{\sqrt{2\pi}} e^{-2Y^2} \left(\frac{1 - 2\sqrt{2}R}{12Y} + RY \right), \\ D_\mu &= \frac{R^2(1 - 2R)}{\sqrt{2\pi}} Y e^{-2Y^2}, \\ D_{\mu x} &= \frac{R^2}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{1 - 2\sqrt{2}R}{12Y} - Y \right) e^{-2Y^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Результаты расчета дисперсии уровня грунтовых вод по приближенным формулам (21), (22), (23), а также результаты расчета по точным формулам (20), выполненные при помощи ЭВМ, представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 кривая 1 соответствует расчетам, выполненным по формуле (21), при этом точные значения D_x , D_μ , $D_{\mu x}$, вычисленные по (20), отличаются от приближенных менее, чем на 1% для $R = 10$ и на 5–10% для $R = 3$.

Кривые 2, 3, 4 представляют значения D_x , D_μ , $D_{\mu x}$ в зависимости от Y для $R = 1$.

На рис. 2а,б,в представлены те же зависимости для параметра $R = 0,1$. Сплошные линии соответствуют расчетам, выполненным по

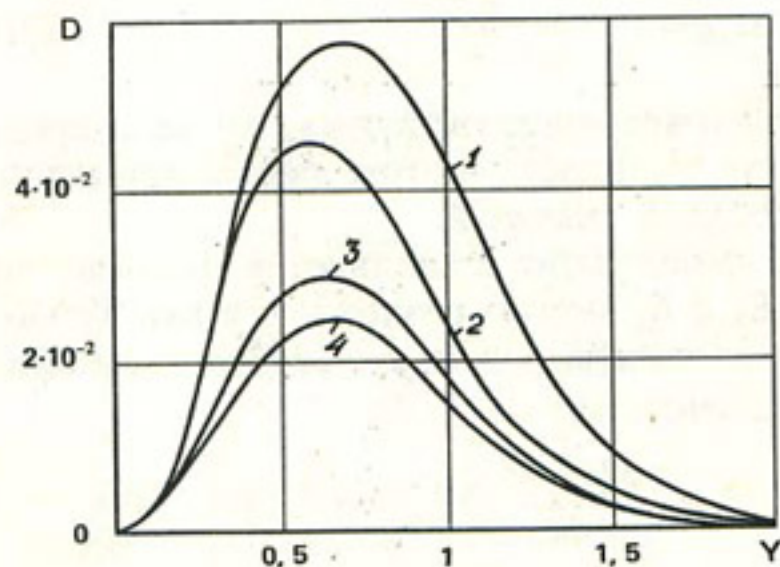


Рис. 1.

Рис. 1. Зависимость дисперсии уровня грунтовых вод от параметра Y :

1 — соответствует приближенному выражению (21);

2,3,4 — соответствуют D_x , D_μ , $D_{\mu x}$, вычисленным по (20) для $R = 1$.

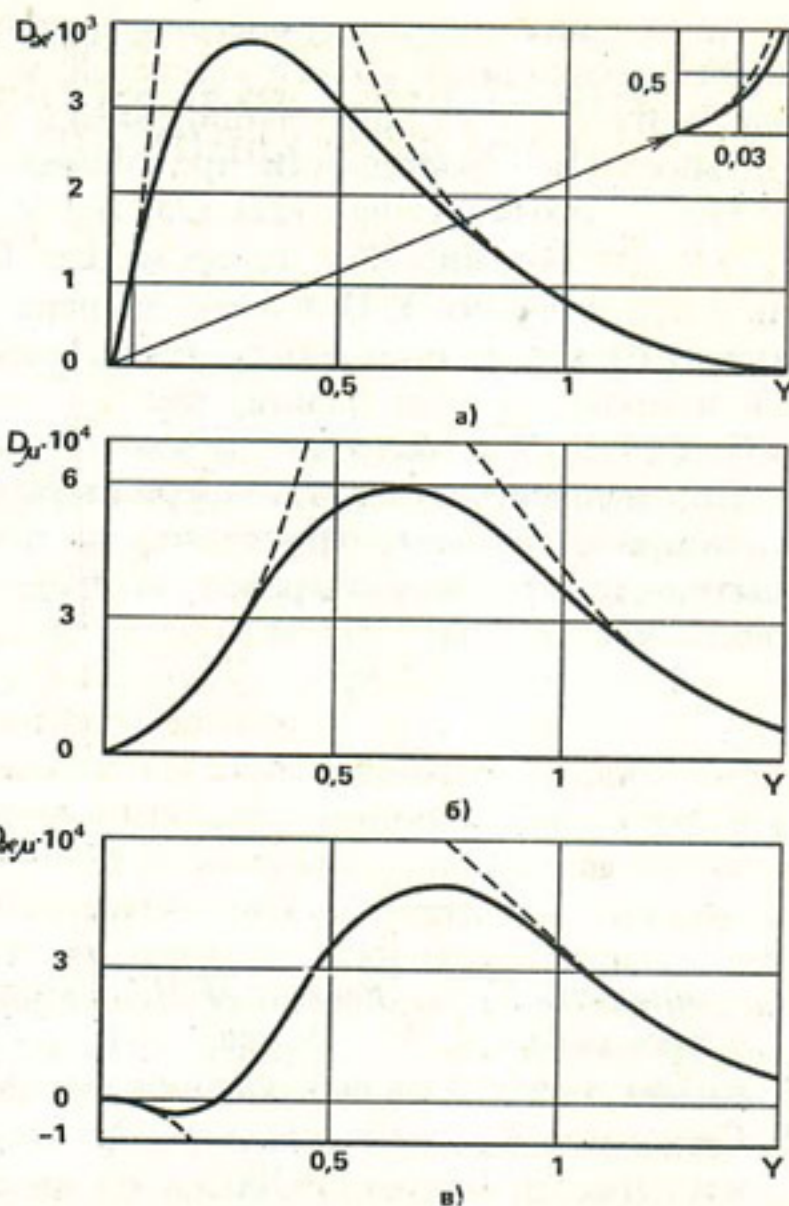


Рис. 2. Зависимость уровня грунтовых вод от параметра Y для $R = 0,1$:

2,а – соответствует $D_x(Y)$;
 2,б – соответствует $D_y(Y)$;
 2,в – соответствует $D_{xy}(Y)$.
 Сплошной линией представлены значения, вычисленные по (20), пунктиром – приближенные зависимости (22), (23).

Рис. 2.

точным выражениям (20), пунктирные – по приближенным выражениям: (22) – для малых Y , (23) – для больших Y .

Анализ полученных результатов показывает, что дисперсия уровня грунтовых вод значительно (20–200 раз) меньше, чем дисперсия неоднородностей среды. Это объясняет тот факт, что даже в случае, когда имеют место значительные ошибки в определении емкости и проводимости пласта, возможно получение достоверного прогноза уровня грунтовых вод.

На ранних стадиях процесса ($R \gg 1$), когда фильтрация в каждой неоднородности развивается независимо от других, вклад ошибок определения емкости и проводимости пласта в ошибку определения уровня грунтовых вод одинаков и не зависит от размера неоднородности. При этом существенное влияние на точность определения уровня грунтовых вод может оказать корреляция между отклонениями емкости и проводимости пласта от средних значений.

На поздних стадиях процесса фильтрации ($R \ll 1$) суммируется влияние большого числа неоднородностей, вовлеченных в процесс фильтрации. В этом случае наибольший вклад в дисперсию уровня грунтовых вод вносят неоднородности проводимости пласта.

Так, в соответствии с (22), (23) D_κ не зависит от R при малых Y и $D_\kappa \sim R$ при больших Y , в то время как D_μ , $D_{\mu\kappa} \sim R^2$ как при малых Y , так и при больших Y . При этом дисперсия уровня грунтовых вод слабо зависит от корреляции между отклонениями от средних значений емкости и проводимости пласта, так как если $\langle \kappa^2 \rangle \approx \langle \mu^2 \rangle \approx \langle \mu\kappa \rangle$, то $D = D_\kappa (D_\kappa \gg D_\mu D_{\mu\kappa})$, если же $\langle \mu^2 \rangle \gg \langle \kappa^2 \rangle$, то $\langle \mu^2 \rangle \gg \langle \mu\kappa \rangle$ и $D \approx D_\mu$.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки точности прогноза уровня грунтовых вод, а также при определении объема опытно-фильтрационных работ, необходимого для получения заданной точности прогноза.

Литература

1. Градштейн И. С., Рыжик И. Н. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Наука, 1971.
2. Найфэ А. Методы возмущений. М., Мир, 1976.
3. Свешников А. Г., Тихонов А. Н. Теория функций комплексного переменного. М., Наука, 1970.
4. Чернов Л. А. Волны в случайно-неоднородных средах. М., Наука, 1975.
5. Швидлер М. Т. Фильтрационные течения в неоднородных средах. М., Гостоптехиздат, 1963.
7. Van Kampen N. G. Stochastic Differential Equations, Phys. Rep, (Sec. C of Phys. Let.), V. 24, N 3, pp. 171-228, 1975.

УЧЕТ РАСХОДНОЙ ЧАСТИ БАЛАНСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

Ю. П. Мирошников

При проведении региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод нередко приходится сталкиваться с ситуацией, когда водоотбор в районе уже достаточно развит, а изученность гидрогеологических условий как региона в целом, так и эксплуатируемых участков низка. В этой ситуации применение гидродинамического метода оценки, как и метода гидрогеологической аналогии, затруднено и более оправдано использование гидравлического метода.

Гидравлический метод в приложении к региональной оценке заключается в анализе опыта существующей эксплуатации. Однако возможность оценки ресурсов этим методом возможна лишь при достаточной длительности и особенно интенсивности водоотбора. Так, интенсивность отбора в отдельные периоды (годы) должна быть близка к предельно допустимой, т. е. к величине эксплуатационных ресурсов при существующей схеме расположения водозаборов. Кроме того, на точность оценки ресурсов по опыту эксплуатации водозаборов существенное влияние оказывает точность определения информации о величине годового водоотбора и положении уровней, о качестве подземных вод, а также о характеристиках питания [1, 2]. Если исходные данные полны, то точность оценки ресурсов этим способом выше, чем с помощью любого другого метода, неизбежно связанного со схематизацией природных условий, с использованием неподдающихся точному определению параметров и, как правило, с осреднением последних.

Основным методом региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод, как правило, является балансовый метод.

Оценка ресурсов балансовым методом (в статье речь идет только о восполняемых ресурсах) состоит в раздельном определении и далее суммировании величин питания (природных статей баланса) подземных вод в прогнозных условиях эксплуатации. Указанные величины прямому измерению не поддаются и оцениваются косвенными способами — предпочтительно на основе данных специальных балансовых исследований. Но даже если такие исследования проведены, очевидно, что оценка ресурсов на основе построения приходной части баланса, не контролируемая какими-либо иными показателями, сопряжена с возможностью существенных ошибок. В итоге ресурсы оказываются, как правило, заниженными, поскольку в проект, для которого выполняется оценка ресурсов, гидрогеологу необходимо дать гарантированное их значение.

В ситуации с развитым водоотбором есть возможность использовать расходную часть баланса для контроля приходной. Эксплуатационный водоотбор, а также родниковая разгрузка в отличие от приходных статей баланса доступны для непосредственного измерения, и достоверность их значений (даже при приближенном определении) существенно выше. Водоотбор и родниковый сток (а также скрытая разгрузка подземных вод в русла, которая вместе с родниковым стоком определяется как подземная составляющая поверхностного стока путем расчленения гидрографов рек, т.е. тоже относительно достоверным способом) иногда составляют в сумме расходную часть баланса подземных вод почти целиком. В таких балансовых районах эти величины следует использовать как опорные и суммарно приходную часть баланса устанавливать на основе расходной. Выбор определяющего основные приходные статьи показателя (процента) инфильтрации в пределах возможного диапазона значений — с учетом всех других данных и факторов — в этом случае ограничен и тем более надежен, чем большую долю расходной (и если не происходит сработки естественных запасов, равной ей приходной) части баланса составляет сумма подземной составляющей поверхностного стока и эксплуатационного водоотбора.

Использование данного приема имеет еще то преимущество, что, как и при прямом применении гидравлического метода, данные опыта эксплуатации дают наряду с величиной водоотбора соответствующее этой величине реальное положение уровней, и можно непосредственно оценить допустимость снижения уровней ниже наблюдаемых (при увеличении водоотбора), установить необходимость сохранения или повышения уровней (снизив в последнем случае водоотбор), т.е. прямо получить основной критерий оценки эксплуатационных ресурсов.

Насколько значительными в сложных случаях могут быть расхождения в оценке ресурсов подземных вод, связанные с учетом расходной части их баланса, показывает следующий пример.

Ресурсы неоген-четвертичного водоносного комплекса Дамассой предгорной впадины оценивались на протяжении 20 лет (в 1959, 1963, 1967) и Грузгипроводхозом (в 1979 г.). С этой целью составлялся баланс подземных вод. При этом в каждом новом варианте включалось все большее число приходных и расходных статей и изменялись их величины. Эти изменения для ряда статей были невелики. В приходной части баланса примерно одинаково определялись подземный приток в район — 17–23 млн. м³ в год (все значения статей приведены далее в той же размерности) и инфильтрация атмосферных осадков — 35–42. Близкими значениями характеризовался ряд расходных статей: родниковый сток — 31–38, испарение с уровня грунтовых вод — 5–20; пренебрежимо малым обычно принимался подземный отток. Кроме перечисленных, баланс составляли следующие статьи: в приходной части — потери руслового стока р. Барада (в первом из составленных балансов эти потери, идущие на питание грунтовых вод, вместе с потерями из ка-

налов-ответвлений реки оценивались в 53 млн. м³ в год) и площадная инфильтрация оросительных вод (в первых балансах не участвовала, в 1979 г. определена величиной 90); в расходной части — эксплуатационный отбор подземных вод.

Значение этого последнего показателя определялось в оценках 1959 и 1963 гг. в 70, затем (1967 г.) в 268 и, наконец, (1979 г.) в 347. В каждой оценке полученное значение отбора признавалось предельным и в сумме с родниковым стоком давало величину восполняемых эксплуатационных ресурсов: от 100 в 1959 г. до 380 в 1979 г. Вывод о том, что отбор близок к максимально возможному (при данном расположении и характеристиках водозаборов), каждый раз был достаточно обоснованным, так как в маловодные (по количеству осадков и соответственно стоку р. Барада) годы (1960–1961 и др.) уровни подземных вод в районе существенно снижались, вплоть до осушения колодцев и мелких скважин. Вызвала, однако, сомнения точность определения водоотбора, поскольку такой его рост не соответствовал динамике подробностей района в воде, и прежде всего росту орошаемых площадей как основного водопотребителя.

Необходимый анализ выполнен при изысканиях 1974–1978 гг. Было выяснено, что определения эксплуатационного отбора подземных вод фактически основывались в 1959–1967 гг. на разноречивых данных о величине орошаемых площадей и условной оценке применяемых в районе оросительных норм, резко различной (5–15 тыс. м³ на га) у разных авторов. Ввиду отсутствия в стране системы регистрации фактического отбора воды скважинами и колодцами, число которых составляет в районе несколько тысяч, и невозможности собственными силами организовать такой контроль, при нашей оценке водоотбора были применены те же приближенные приемы, но с более тщательным обоснованием исходных показателей. Для определения орошаемых площадей использованы данные экспликации земельного фонда, уточненные у землепользователей. Фактические оросительные нормы (точнее, поскольку оценивался водоотбор за год — годовая подача воды брутто независимо от количества вегетаций орошаемых культур) в связи с тем, что их значения, основанные на натурных измерениях, отсутствовали, были выборочно определены на характерных по мелиоративным условиям, водообеспеченности и др. опытных участках (17 в районе). Полученные среднее значение оросительной нормы (11 тыс. м³/га), общая площадь орошаемых подземными водами земель в районе (31 тыс. га), а также данные об использовании подземных вод на другие хозяйственные нужды и питьевое водоснабжение дали в результате расчета приведенное выше значение эксплуатационного отбора 347 млн. м³ в год.

Полученную величину эксплуатационных ресурсов подземных вод Дамасской предгорной впадины (380 млн. м³ в год) нельзя назвать окончательной, так как учтена не вся необходимая информация. Годовой водоотбор определен не для ряда конкретных лет, а как величина,

соответствующая «среднему» году из периода изысканий. Данные о многолетнем режиме уровней не полны, хотя для района уверенно фиксируется устойчивое положение сезонных уровней при данном водоотборе и достаточно широких колебаниях водности последних лет. Оценка ресурсов подземных вод района, безусловно, должна уточняться, но делать это следует на основе более точного определения расходной части баланса, под контролем которой только и стала практически возможной, в частности, количественная характеристика потерь руслового стока р. Барада, преобладающих (250 млн. м³ в год) в приходной части баланса.

Рассмотренный пример показывает, как значительно может отличаться величина ресурсов подземных вод, оцененная балансовым методом, если не изучать расходной части их баланса.

Очевидно, что учет расходной части баланса может в аналогичных случаях существенно повысить точность определения характеристик питания подземных вод.

Литература

1. *Мирошников Ю. П.* Опыт региональной оценки ресурсов пресных подземных вод для площадного водозабора на морском побережье. Тр. ВСЕГИНГЕО. Вып. 126. М., 1979.
2. *Todd D. K.* Ground Water hydrology. N.-Y., London, John Wiley and Sons, Inc., 1959.

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЗДЕЛЯЮЩИХ ТОЛЩАХ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПОРНО-БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В. К. Мамонтов

Существующие методики прогнозных расчетов в условиях напорно-безнапорной нестационарной фильтрации [1, 2] исходят из предположения о том, что кровля и подошва осушаемого пласта являются абсолютными водоупорами и не учитывают содержащихся в них естественных запасов подземных вод. Однако на участках размещения насосных станций в кровле и подошве осушаемого пласта залегают достаточно мощные, сравнительно слабо консолидированные озерно-аллювиальные отложения, представленные обводненными алевроитовыми глинами с тонкими, плохо выдержанными по простиранию прослоями песка. В этих условиях под воздействием дренажных мероприятий снижение напоров подземных вод может привести к возрастанию эффективных напряжений в породах кровли и подошвы водоносного пласта, сопровождающемуся отжатием части содержащейся в них воды в осушаемый пласт. Требования к повышению достоверности гидрогеологических прогнозов обуславливают необходимость анализа практического значения этого фактора.

С этой целью рассмотрим формирование радиального напорно-безнапорного нестационарного потока при «мгновенном» изменении уровня подземных вод на контуре осушения (рис. 1). Будем считать, что в начальный момент времени пьезометрические уровни осушаемого водоносного горизонта и подземных вод в его кровле и подошве совпадают. Фильтрация подземных вод в слабо проницаемых породах кровли и подошвы происходит только в вертикальном направлении, а влияние водоотбора не распространяется на их полную мощность. Фильтрационные и компрессионные характеристики кровли и подошвы водоносного горизонта идентичны. Основным водоносный горизонт является однородным и неограниченным в плане, при его осушении в безнапорной части выполняется предпосылка Дюпюи о постоянстве напора по вертикали. Кроме того, ввиду незначительной проницаемости отложений кровли и сравнительно небольшой площади безнапорной зоны будем пренебрегать поступлением на свободную поверхность гравитационной воды.

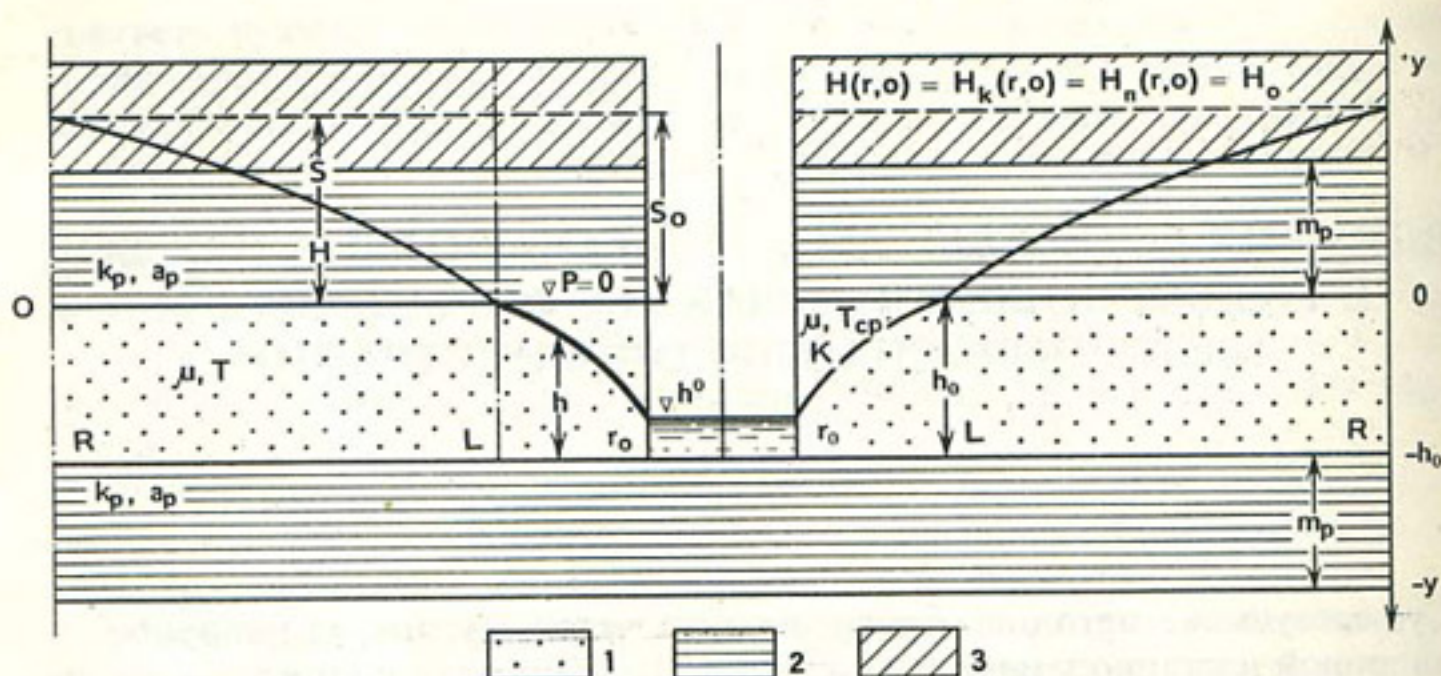


Рис. 1. Схема формирования радиального напорно-безднапорного нестационарного потока с учетом естественных запасов подземных вод в разделяющих толщах: 1 – водоносный горизонт; 2 – разделяющие толщи; 3 – покровные отложения.

В пределах сделанных допущений закономерности формирования геофильтрационного потока описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

в безнапорной части водоносного горизонта ($r_0 \leq r \leq L$)

$$\mu \frac{\partial \Delta h}{\partial t} = T_{cp} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Delta h}{\partial r} \right) + k_p \frac{S_p}{\partial y} \Big|_{y=-h_0}, \quad \Delta h = h_0 - h; \quad (1)$$

в напорной части водоносного горизонта ($L \leq r \leq R$)

$$\mu^* \frac{\partial S}{\partial t} = T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{dS}{dr} \right) + 2k_p \frac{\partial S_p}{\partial y} \Big|_{y=0; -h_0}; \quad (2)$$

в слабо проницаемых породах кровли и подошвы пласта

$$\frac{1}{a_p} \frac{\partial S_p}{\partial t} = \frac{\partial^2 S_p}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где μ , μ^* – коэффициенты гравитационной и упругой емкости осушаемого пласта; T , T_{cp} – полная и осредненная в пространстве и времени проводимость его безнапорной части; k_p , a_p – коэффициенты фильтрации и пьезопроводности отложений кровли и подошвы пласта; S_p – понижение пьезометрической поверхности подземных вод, содержащихся в кровле и подошве водоносного горизонта; r , y – радиальная и вертикальная координаты. Остальные обозначения ясны из рисунка 1.

Решение уравнения (3) для потока подземных вод в слабо проницаемых породах кровли и подошвы, полученное в работе [3] методом интегрального баланса, имеет форму

$$S_p = S \left(1 - \frac{y}{l} \right)^2, \quad l = 2\sqrt{a_p t}. \quad (4)$$

Для осушаемого горизонта решение также будем искать с помощью метода интегрального баланса, представив положение депрессионной поверхности в напорной и безнапорной частях пласта в виде

$$S(r, t) = \alpha_1 \ln \frac{R}{r} + \alpha_2 \left(1 - \frac{r}{R} \right), \quad L \leq r \leq R, \quad (5)$$

$$\Delta h(r, t) = \beta_1 \ln \frac{L}{r} + \beta_2 \left(1 - \frac{r}{L} \right), \quad r_0 \leq r \leq L. \quad (6)$$

Совместное решение зависимостей (5), (6) с системой граничных условий

$$S(L, t) = S_0; \quad \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \quad S(R, t) = 0;$$

$$\Delta h(r_0 t) = h_0 - h^0 = \Delta h^0; \quad \Delta h(L, t) = 0; \quad \frac{\partial \Delta h}{\partial r} \Big|_{r=L} = \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=L} \quad (7)$$

позволяет получить уравнения депрессионной поверхности дренируемого пласта

$$S(r, t) = \alpha \left(\ln \frac{R}{r} - 1 + \frac{r}{R} \right), \quad \alpha = \frac{S_0}{\bar{R} - \ln \bar{R} - 1}, \quad \bar{R} = \frac{L}{R}, \quad L \leq r \leq R, \quad (8)$$

$$\Delta h(r, t) = \beta \left(\ln \frac{L}{r} - 1 + \frac{r}{L} \right) + \alpha \left(1 - \frac{r}{L} \right), \quad \beta = \frac{\Delta h^0 + \alpha(1 - \bar{r}_0)}{\bar{r}_0 - \ln \bar{r}_0 - 1}$$

$$\bar{r}_0 = \frac{r_0}{L}, \quad r_0 \leq r \leq L \quad (9)$$

и определить величину водопритока к контуру осушения

$$Q_0 = -2\pi T_{cp} r_0 \frac{\partial \Delta h}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 2\pi T_{cp} (\beta - \beta \bar{r}_0 + \alpha \bar{r}_0). \quad (10)$$

Радиус влияния системы водоотбора R определяется из балансового соотношения

$$Q_n = Q_y + Q_n' + Q_k, \quad (11)$$

где Q_n — расход потока в напорной части пласта; Q_y — расход потока, формирующегося за счет сработки упругой составляющей его естественных запасов; Q'_n , Q_k — расход потока, поступающего в напорную часть пласта из его подошвы и кровли, соответственно. Величины балансовых составляющих соотношения (11) определяются следующими интегрально-дифференциальными уравнениями

$$Q_n = 2\pi T \int_L^R \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S}{\partial r} \right) dr = 2\pi T \alpha (1 - \bar{R}); \quad (12)$$

$$Q_y = \frac{2\pi\mu^*}{t} \int_L^R r S dr = \frac{2\pi\mu^* \alpha R^2}{t} f(\bar{R}); \quad (13)$$

$$Q'_n = Q_k = 2\pi k_p \int_L^R r \frac{\partial S_p}{\partial y} \Big|_{y=-h_0;0} dr = \frac{2\pi k_p \alpha R^2}{\sqrt{a_p t}} f(\bar{R}), \quad (14)$$

где

$$f(\bar{R}) = \frac{\bar{R}^2}{2} \ln \bar{R} + \frac{1 + 3\bar{R}^2}{12} - \frac{\bar{R}^3}{3}. \quad (15)$$

После подстановки уравнений (12)–(15) в балансовое соотношение (11) получим формулу для определения радиуса влияния системы водоотбора

$$R^2 = \frac{T(1 - \bar{R})}{f(\bar{R}) \left(\frac{\mu^*}{t} + \frac{2k_p}{\sqrt{a_p t}} \right)}. \quad (16)$$

Радиус безнапорной зоны потока L определяется из условия баланса в пределах свободной поверхности потока

$$Q_0 = Q_6 + Q''_n + Q_n, \quad (17)$$

где Q_0 — суммарный водоприток к контуру осушения, определяемый формулой (10); Q_n — расход потока, сформированного в напорной части пласта, величина которого дается уравнением (12); Q_6 — расход потока, формирующийся за счет сработки гравитационной составляющей естественных запасов водоносного горизонта; Q''_n — расход потока, поступающего из подошвы пласта в пределах его безнапорной части. Величины Q_6 и Q''_n определяются следующим образом

$$Q_6 = \frac{2\pi\mu}{t} \int_{r_0}^L r \Delta h dr = \frac{2\pi\mu}{t} f(\bar{r}_0), \quad (18)$$

где

$$f(\bar{r}_0) = \beta \bar{R}^2 R^2 \left(\frac{\bar{r}_0^2}{2} \ln \bar{r}_0 + \frac{1 + 3\bar{r}_0^2}{12} - \frac{\bar{r}_0^3}{3} \right) + \alpha \bar{R}^2 R^2 \left(\frac{1 - 3\bar{r}_0^2}{6} + \frac{\bar{r}_0^3}{3} \right); \quad (19)$$

$$Q_{II}'' = 2\pi k_p \int_{r_0}^L r \frac{\partial S_p}{\partial y} \Big|_{y=-h_0} dr = \frac{2\pi k_p}{\sqrt{a_p t}} \left[\frac{S_0 \bar{R}^2 R^2}{2} (1 - \bar{r}_0^2) + f(\bar{r}_0) \right]. \quad (20)$$

Подстановка зависимостей (10), (12), (18)–(20) в балансовое соотношение (17) приводит к трансцендентному уравнению, позволяющему определить радиус безнапорной зоны пласта L

$$T_{cp}(\beta - \beta \bar{r}_0 + \alpha \bar{r}_0) = T\alpha(1 - \bar{R}) + \frac{\mu}{t} f(r_0) + \frac{k_p}{\sqrt{a_p t}} \left[\frac{S_0 \bar{R}^2 R^2}{2} (1 - r_0^2) + f(\bar{r}_0) \right]. \quad (21)$$

Уравнения (8)–(10), (15), (16), (19) и (21) полностью формируют модель напорно-безнапорной нестационарной фильтрации с учетом естественных запасов подземных вод, содержащихся в кровле и подошве осушаемого горизонта, и являются расчетными.

Для практического проведения прогнозов требуется обосновать выбор величины средней проводимости пласта T_{cp} в пределах его безнапорной части. Если рассматривать ее значение как среднеинтегральное, то

$$T_{cp} = T - k \frac{2f(\bar{r}_0)}{\bar{R}^2 R^2 (1 - \bar{r}_0^2)}. \quad (22)$$

В качестве примера рассмотрим расчет водопритока к системе осушения гидротехнического котлована для следующих конкретных условий. Осушаемый водоносный горизонт мощностью 15 м залегает на глубине 25 м. Водовмещающие пески имеют коэффициент фильтрации 4 м/сут, коэффициенты упругой и гравитационной емкости равны, соответственно, $2 \cdot 10^{-4}$ и 0,08. Пьезометрический напор над кровлей пласта составляет 20 м. Кровлей и подошвой водоносному горизонту служат озерно-аллювиальные глины мощностью 20 м. Коэффициент их фильтрации равен 10^{-4} м/сут и при коэффициенте упругоёмкости глин $0,005 \text{ м}^{-1}$ коэффициент пьезопроводности разделяющих толщ составляет $0,02 \text{ м}^2/\text{сут}$. Котлован вскрывает водоносный горизонт на полную мощность, поэтому на контуре водообора задается отметка уровня, соответствующая положению подошвы пласта, таким образом, $\Delta h^0 = 15 \text{ м}$. Дренажная система радиусом 100 м проектируется на период эксплуатации 365 сут.

Поскольку мощность кровли и подошвы пласта превышает зону влияния в них системы осушения ($l = 2\sqrt{a_p t} = 5,4 \text{ м}$), смежные водоносные горизонты не окажут влияния на величину водопритока к контуру дренажа.

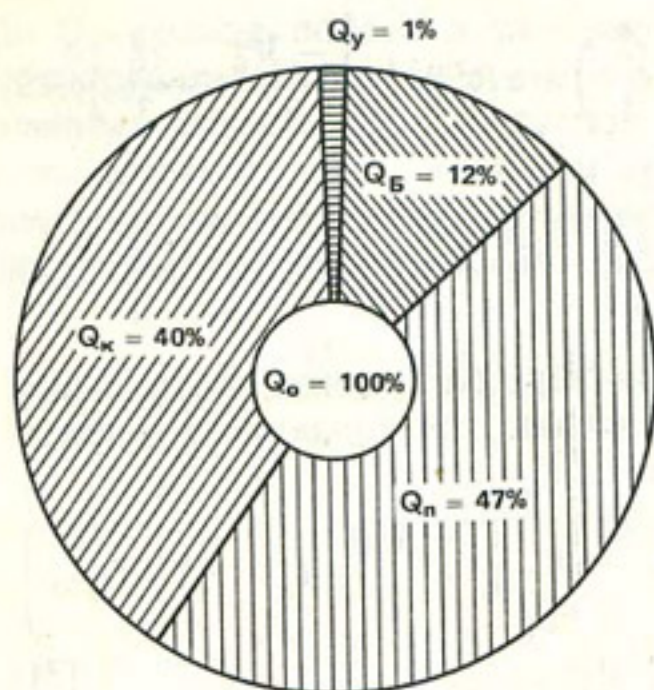


Рис. 2. Балансовая структура водопритока к контуру осушения, $Q_o = 6280 \text{ м}^3/\text{сут}$ – общий расход потока, расход потока, сформированный за счет сработки: упругих запасов пласта $Q_y = 40 \text{ м}^3/\text{сут}$, гравитационных запасов пласта $Q_b = 730 \text{ м}^3/\text{сут}$, упругих запасов подошвы пласта $Q_n = 2950 \text{ м}^3/\text{сут}$, упругих запасов кровли пласта $Q_k = 2560 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Можно предложить следующую схему прогнозных расчетов. При заданных значениях величины $\bar{R}$, которые лежат в пределах от 0 до 1, по формуле (15) рассчитывается величина $f(\bar{R})$. Далее по зависимости (16) определяется радиус влияния системы осушения R , а также величины $L^2 = \bar{R}^2$, R^2 и $\bar{r}_0$. С использованием зависимостей (8) и (9) вычисляются параметры α и β , а по формулам (19) и (23) – величины $f(\bar{r}_0)$ и $T_{ср}$. На основании этих предварительных расчетов строятся графики функций $Q_o = 2\pi T_{ср}(\beta - \beta\bar{r}_0 + \alpha\bar{r}_0)$ и $Q_o = Q_n + Q_b + Q_y$. Координаты точки пересечения этих графиков определяют величину $\bar{R}$ и расход потока на контуре осушения.

Расчеты, проведенные по такой схеме, для рассматриваемого примера дали следующие результаты (рис. 2). Суммарный водоприток к системе осушения котлована будет равен $6280 \text{ м}^3/\text{сут}$. Причем большая часть водопритока (87%) будет сформирована за счет естественных запасов подземных вод, содержащихся в кровле и подошве водоносного горизонта. Гравитационные запасы водоносного горизонта обеспечат 12% общего расхода потока, а сработка упругих запасов приведет к формированию всего 1% водопритока к дренажной системе.

Приведенные результаты расчетов наглядно показывают определяющее влияние естественных запасов подземных вод, содержащихся в слабо проницаемых отложениях, на величины водопритоков. Эту особенность необходимо учитывать при проектировании и организации дренажных мероприятий на котлованах крупных насосных станций.

Литература

1. Мамонтов В. К. Расчет напорно-безнапорной нестационарной радиальной фильтрации. В сб.: Гидрогеология рудных месторождений. М., Изд. МГУ, 1981, с. 88–100.
2. Мамонтов В. К., Плотников Н. И. Прогнозная оценка изменения гидрогеологических условий при осушении месторождений твердых полезных ископаемых. В кн.: Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. Авт. Н. И. Плотников, С. Краевский. М., Недра, 1983, с. 126–151.
3. Мироненко В. А., Сердюков Л. И., Котов И. Г. О влиянии сжимаемости «водоупорных» пород на процесс фильтрации в водоносных пластах. В сб.: Записки Ленинградского горного института. Гидрогеология и инженерная геология. Т. LXII, вып. 2. Л., 1971, с. 39–46.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В. Ю. Колочинский

Настоящая работа посвящена определению питания подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков. В качестве исходных данных используются ряды наблюдений за осадками и уровнем подземных вод в одиночной скважине. Допускается, что исходные данные могут содержать погрешности, вызванные как неточностью замеров наблюдаемых величин, так и влиянием неучитываемых режимобразующих факторов.

Предлагаемый подход основан на выделении вклада инфильтрации в процесс формирования уровня подземных вод. Эта задача решается методами регрессионного анализа, причем ряд наблюдений за скоростью изменения уровня подземных вод рассматривается как зависящая переменная уравнения регрессии, а данные об осадках, уровне подземных вод и т.д.—как независимые переменные этого уравнения.

Такое решение позволяет существенно повысить точность и достоверность получаемых результатов, значительно уменьшив влияние ошибок, имеющих в исходных данных.

Предлагаемый метод может быть использован для решения некоторых других задач гидрогеологии.

Обоснование метода. В начале работы введем следующие допущения:

1. Инфильтрационная влага достигает поверхности грунтовых вод мгновенно, т.е. время фильтрации через зону аэрации τ равно нулю или очень мало [3] по сравнению с рассматриваемыми интервалами между замерами уровня подземных вод Δt .

2. Величина инфильтрационного питания подземных вод прямо пропорциональна величине осадков, т.е. $W = K_w \cdot P$, (1)
где W —инфильтрационное питание подземных вод (инфильтрация) за время Δt ; P —количество осадков, выпавших за то же время; K_w —коэффициент инфильтрации атмосферных осадков.

Это допущение сделано только для упрощения последующих выкладок. Может быть использована любая зависимость вида $W = f(P)$.

3. При рассмотрении процесса изменения уровня подземных вод будем исходить из принципа суперпозиции, т.е. суммарное (наблюдаемое) изменение уровня под влиянием нескольких факторов будем считать равным сумме изменений от каждого фактора в отдельности.

4. Количество исходных данных достаточно для их статистической обработки.

5. Каждое из этих допущений имеет свои границы применимости, которые будут учтены при определении области применения метода.

Рассмотрим безнапорный однослойный водоносный горизонт, изменение уровня воды в котором происходит под влиянием двух факторов: инфильтрации и оттока воды к границе, на которой происходит разгрузка потока подземных вод.

Тогда

$$\Delta H = \Delta H_W + \Delta H_0, \quad (2)$$

где ΔH — наблюдаемое изменение уровня подземных вод за время Δt ; ΔH_W и ΔH_0 — изменения уровня за счет инфильтрации и оттока за то же время Δt ; при этом $\Delta H_W = W/\mu$ [1].

Здесь μ — величина водоотдачи.

С учетом (1) получим

$$\Delta H = \frac{K_W}{\mu} \cdot P + \Delta H_0. \quad (3)$$

Разделим обе части на Δt

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{K_W}{\mu} \cdot \frac{P}{\Delta t} + \frac{\Delta H_0}{\Delta t}. \quad (4)$$

Чтобы выразить через исходные данные переменную $\Delta H_0/\Delta t$, воспользуемся известным решением Буссинеска [4], согласно которому уравнение кривой депрессии при отсутствии инфильтрации имеет вид

$$z = c \cdot \sin \frac{\pi x}{2L} \cdot e^{-\alpha t}, \quad (5)$$

где z — высота уровня грунтовых вод над горизонтом воды на границе потока подземных вод; x — расстояние от точки наблюдения до границы; c — постоянная; t — время, отсчитываемое от начала сухого периода; L — расстояние от водораздела до границы; α — коэффициент истощения, равный

$$\alpha = \frac{\pi^2 \cdot A_y}{4L^2}, \quad (6)$$

где A_y — коэффициент уровнепроводности.

Скорость изменения уровня подземных вод будет равна

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\alpha \cdot c \cdot \sin \frac{\pi x}{2L} \cdot e^{-\alpha t} = -\alpha z.$$

Переходя к конечным разностям, получим

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = -\alpha \bar{z},$$

где $\bar{z}$ — среднее значение величины z за период времени Δt . Если измерение уровня ведется не от горизонта воды на границе, а от произвольной отметки, зависимость (8) принимает вид

$$\frac{\Delta H_0}{\Delta t} = -\alpha(\bar{H} - H_l), \quad (9)$$

где $\bar{H}$ — среднее за время Δt значение уровня подземных вод в выбранной системе отсчета; H_l — отметка горизонта воды на границе в той же системе отсчета.

Подставив выражение (9) в (4), получим

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{K_w}{\mu} \cdot \frac{P}{\Delta t} - \alpha \bar{H} + b_0, \quad (10)$$

где $b_0 = \alpha \cdot H_l = \text{const}$.

Отметим, что все переменные, входящие в уравнение (10), определяются непосредственными наблюдениями.

Уравнение, аналогичное (10), может быть получено другим способом. Рассмотрим одномерное линеаризованное дифференциальное уравнение фильтрации для линии тока, проходящей через выбранную точку [1]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = A_y \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{W}{\mu}. \quad (11)$$

Дифференциальное уравнение вида (11) допускает частные решения, согласно которым [4]

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = c'_0 + c'_1 H, \quad (12)$$

где c'_0 и c'_1 — постоянные, зависящие от расположения точки наблюдения и системы отсчета H .

С учетом (1) и (12) уравнение (11) принимает вид

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K_w}{\mu} \cdot p + c_1 H + c_0, \quad (13)$$

где $p = p(t)$ — интенсивность осадков; c_1 и c_0 — коэффициенты уравнения.

Переходя к конечным разностям, получим

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{K_w}{\mu} \cdot \frac{P}{\Delta t} + c_1 \bar{H} + c_0. \quad (14)$$

Полученное уравнение аналогично выражению (10). Значения c_1 и c_0 зависят от граничных условий решения уравнения (11) и, в частности, могут быть равны соответствующим коэффициентам уравнения (10).

Для определения величины инфильтрации достаточно найти значение K_w/μ и затем, зная величину осадков и водоотдачу, рассчитать W . Таким образом, задача сводится к нахождению коэффициентов уравнения (14), для чего достаточно иметь по три значения ΔH , P , $\bar{H}$ и Δt . Однако в этом случае ошибки, содержащиеся в значениях величины H , резко возрастут при переходе от их абсолютных значений к разностям ΔH . При этом погрешность определения коэффициентов уравнения (14) может достигать 100% и более, а в ряде случаев полученные результаты вообще не имеют физического смысла [7].

Точность и достоверность получаемых результатов можно повысить, используя для решения поставленной задачи регрессионный анализ.

Рассматривая выражение (14) как уравнение регрессии, можно записать

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + u, \quad (15)$$

где y — зависимая переменная, $y = \Delta H / \Delta t$; x_1 и x_2 — независимые переменные, $x_1 = P / \Delta t$, $x_2 = \bar{H}$; b_0 , b_1 и b_2 — параметры уравнения регрессии, при этом

$$b_1 = K_w / \mu; \quad (16)$$

u — случайная переменная, включающая в себя влияние неучтенных факторов, случайных помех и ошибок наблюдения.

Решив уравнение (15), по значению параметра b_1 можно определить величину K_w/μ . На практике решение уравнений регрессии выполняется при помощи стандартных программ на ЭВМ и не вызывает затруднений. При этом определяются не только параметры регрессии, но и оценивается их точность [5].

Влияние ошибок в исходных данных на получаемый результат, как следует из теории регрессионного анализа, будет устранено, если эти ошибки не имеют корреляционной связи с независимой переменной искомого параметра [5]. Это обстоятельство позволяет исключить из рассмотрения режимобразующие факторы, корреляционно не связанные с осадками. При этом параметры b_0 и b_2 уравнения (16) могут утратить физический смысл, так как они одновременно будут учитывать влияние нескольких разнородных факторов.

Область применения. Определим область применения предлагаемого метода.

Первое допущение о мгновенном проникновении влаги через зону аэрации позволило принимать для определения суммы осадков P те же промежутки времени Δt , что и между замерами уровня подземных вод. Относительная ошибка δ определения величины P может быть оценена как

$$\delta < 0,5 \frac{\tau}{\Delta t}, \quad (17)$$

где τ — фактическое время фильтрации влаги через зону аэрации.

Третье допущение, так же как и решение (5), справедливо при выполнении неравенства [1]

$$\Delta H \ll m, \quad (18)$$

где m — мощность водоносного пласта.

На практике часто применяют ограничение

$$\Delta H < 0,2m.$$

Уравнения (10) и (14) не учитывают возмущений, действующих на контуре площади инфильтрации и на границе потока подземных вод. Это приводит к следующим ограничениям [2]

$$\Delta t \leq \frac{l^2}{4A_y}, \quad (19)$$

где l — расстояние от точки наблюдения до контура площади инфильтрации

$$R > 1,5 \sqrt{A_y T}, \quad (20)$$

где R — расстояние от точки наблюдения до границы (радиус влияния возмущений на границе); T — время действия возмущения.

Если данные об изменении горизонта воды на границе имеются, их можно учесть, дополнив уравнения (10) или (14) членом $b_3 \cdot \Delta H_l$, где ΔH_l — величина возмущения. Порядок определения ΔH_l и выражение для b_3 находят из аналитических решений, связывающих изменения уровня подземных вод с возмущениями на границе. При этом ограничение (20) снимается.

В формировании потока подземных вод могут принимать участие и другие режимообразующие факторы: водозабор, орошение, перетекание из нижележащих водоносных горизонтов и т.д. В этом случае возможны два подхода к решению поставленной задачи:

- учет влияния этих факторов путем дополнения уравнения регрессии соответствующими членами;
- исключение из рассмотрения некоторых факторов после доказательства отсутствия корреляционной связи этих факторов с другими независимыми переменными уравнения регрессии, в первую очередь с осадками.

При втором подходе требуется, как правило, намного меньше исходной информации, чем при первом.

Например, водозабор с постоянным дебитом вызывает изменения уровня подземных вод, не коррелированные с осадками. Аналогичное утверждение справедливо и для водозаборов с циклическим режимом

работы при условии, что продолжительность цикла существенно отличается от длительности сухого и влажного сезона.

Таким образом, в ряде случаев становится возможным определение величины K_w/μ по данным наблюдений за нарушенным режимом уровня подземных вод.

Особенности применения. При использовании предлагаемого метода следует придерживаться определенной последовательности, основными этапами которой являются:

1. Составление исходного уравнения. Этот этап начинается с анализа условий формирования уровня режима подземных вод в точке наблюдения. Рассматриваются действующие режимообразующие факторы, характерные особенности их изменений, степень корреляционной связи между ними. Полученные результаты используются для обоснования исходного уравнения регрессии.

2. Проверка области применения. Для каждой точки наблюдения определяются допустимые значения временных интервалов между замерами, амплитуд колебания уровня подземных вод, проверяется выполнение других ограничений, определяющих область применения метода, и делается заключение о возможности его использования.

3. Подготовка исходных данных. На этом этапе анализу подвергаются ряды наблюдений за уровнем подземных вод, осадками и другими факторами, вошедшими в качестве независимых переменных в уравнение регрессии. Из исходных рядов исключаются данные, для которых амплитуда колебаний уровня ΔH или временные интервалы Δt выходят за допустимые границы. Кроме того, рекомендуется исключить из рассмотрения члены с экстремальными значениями скорости изменения уровня подземных вод. Особое внимание следует уделить изучению вопросов о физической однородности рядов и о возможности совместного использования результатов наблюдений за осадками и уровнем подземных вод. Первый вопрос сводится к оценке изменчивости факторов, влияющих на инфильтрационную способность почвогрунтов зоны аэрации. Чем стабильнее эти факторы, тем выше точность полученных результатов.

Второй вопрос связан с тем, что режимная скважина и плювиометрический пункт расположены, как правило, в разных местах, т.е. для решения уравнения регрессии используются данные, полученные в разных точках. Совмещение этих данных вносит дополнительную ошибку в определение величины K_w/μ [6], во многом определяющую точность метода в целом. Эту ошибку целесообразно оценить заранее.

4. Анализ полученных результатов. После решения уравнения регрессии точность и достоверность полученных параметров регрессии должны быть оценены методами математической статистики. При анализе результатов оценки следует учитывать их формальный характер. В дополнение к ним рекомендуется применять другие способы контроля, из которых наиболее эффективен следующий.

Рассмотрим исходное уравнение (14) при условии отсутствия осадков. В этом случае оно принимает вид

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = c_1 \bar{H} + c_0. \quad (21)$$

Из выражения (9) следует, что $\Delta H/\Delta t = 0$ при $\bar{H} = H_l$. Подставив эти значения в (21), получим

$$c_1 H_l + c_0 = 0. \quad (22)$$

Так как значения c_1 и c_0 известны, то из (22) можно найти H_l . В случае равенства рассчитанного и фактического значений H_l есть основание считать результаты регрессионного анализа физически достоверными. Такое утверждение основано на том, что исходные данные, использованные для нахождения параметров регрессии, не содержат никакой информации о положении горизонта воды на границе, следовательно правильное определение значения H_l по уравнению регрессии возможно только в том случае, когда это уравнение адекватно отображает реальный процесс формирования уровня режима подземных вод. Несовпадение расчетного и фактического значений H_l само по себе не означает, что получены ошибочные результаты. В большинстве случаев оно обусловлено воздействием какого-либо режимобразующего фактора, оказывающего существенное влияние на режим подземных вод, но не учтенного в уравнении регрессии. При этом, как отмечалось выше, величины c_1 и c_0 могут не иметь физического смысла.

По результатам комплексного, формального и неформального контроля точности и достоверности полученных результатов делается вывод об их пригодности для последующих расчетов.

Следует подчеркнуть, что в любом случае нежелательно формальное применение аппарата регрессионного анализа. Только подробный анализ исходной информации, физических особенностей формирования режима подземных вод, полученных результатов может гарантировать правильность определения искомых величин.

В заключение перечислим некоторые другие задачи, которые могут быть решены по предлагаемой методике:

1. Определение интенсивности испарения с поверхности подземных вод. Интенсивность испарения будем считать линейно связанной с глубиной залегания уровня подземных вод [3]

$$\varepsilon = E_0 (\bar{H} - H_{кр}) \quad (23)$$

при

$$\bar{H} > H_{кр} \text{ и } \varepsilon = 0 \text{ при } \bar{H} \leq H_{кр}. \quad (24)$$

Здесь ε — средняя за время Δt интенсивность испарения с поверхности подземных вод; E_0 — постоянная; $H_{кр}$ — критическая глубина залегания уровня подземных вод.

Влияние испарения на скорость изменения уровня грунтовых вод можно учесть, добавив в правую часть уравнения (2) член

$$\frac{\Delta H_{\varepsilon}}{\Delta t} = E(\bar{H} - H_{\text{кр}}), \quad (25)$$

где ΔH_{ε} — изменение уровня грунтовых вод только под влиянием испарения; $E = E_0/\mu$.

С учетом (25) уравнение (14) примет вид

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{K_w}{\mu} \cdot \frac{P}{\Delta t} + c'_1 \cdot \bar{H} + c'_0, \quad (26)$$

где

$$c'_1 = c_1 + E; \quad (27)$$

$$c'_0 = c_0 - EH_{\text{кр}}. \quad (28)$$

Из (27) и (28) следует, что

$$H_{\text{кр}} = \frac{c_0 - c'_0}{c'_1 - c_1}. \quad (29)$$

Решая (27) и (28) совместно с (22), получим

$$E = \frac{c'_0 + c'_1 H_l}{H_l - H_{\text{кр}}}, \quad (30)$$

где H_l — фактическая отметка горизонта воды на границе.

Выражение (30) справедливо для невозмущенного потока подземных вод

Для определения значений $H_{\text{кр}}$ и E нужно найти параметры уравнений (14) и (26). Уравнение (14) описывает процесс формирования режима уровня подземных вод без учета влияния испарения. Для его решения из исходного ряда наблюдений выберем те данные, для которых выполняется условие $\bar{H}_i < H'_{\text{кр}}$, где $H'_{\text{кр}}$ — нижняя граница возможных значений $H_{\text{кр}}$. При выполнении этого условия из (24) следует, что $\varepsilon = E = 0$, т. е. испарение отсутствует.

Для решения уравнения (26), учитывающего влияние испарения, используем те члены исходного ряда, для которых $\bar{H}_i > H''_{\text{кр}}$, где $H''_{\text{кр}}$ — верхняя граница возможных значений $H_{\text{кр}}$. Зная параметры c_0 , c_1 , c'_0 и c'_1 , по формулам (29) и (30) находим значения $H_{\text{кр}}$ и E .

Если зависимость интенсивности испарения от глубины подземных вод существенно нелинейна и имеет вид $\varepsilon = E_0 \cdot f(H)$, то задача по определению E_0 решается путем добавления в уравнение (14) члена $\Delta H_{\varepsilon}/\Delta t = E \cdot x_{\varepsilon}$, где $x_{\varepsilon} = f(H)$, и сводится к нахождению соответствующего параметра уравнения регрессии.

Значение $H_{кр}$ при этом уточняется подбором, используя в качестве критерия выбора парный коэффициент корреляции между $E \cdot x_e$ и $\Delta H/\Delta t$ и величину ошибки определения E .

2. Определение коэффициента истощения.

Как видно из уравнения (10), этот коэффициент равен второму параметру регрессии и входит в значение b_0 . Зная эти параметры, по значению второго находим коэффициент истощения. Для проверки полученный результат подставляем в выражение для b_0 и вычисляем H_1 . Сравнивая рассчитанное значение H_1 с фактической отметкой горизонта воды на границе, можно оценить точность определения коэффициента истощения.

3. Уточнение вида зависимости инфильтрации от осадков. Если инфильтрация и осадки связаны зависимостью, существенно отличающейся от (1), то вид этой зависимости можно уточнить. Для этого задаются несколькими выражениями $W = W(p)$ и, решая уравнение регрессии, по максимальному значению коэффициента корреляции и минимальному значению ошибки выбирают выражение, наиболее соответствующее данным условиям.

4. Прогноз режима подземных вод. Как известно, уравнение регрессии можно использовать для прогноза изменения зависимости переменных при ожидаемых изменениях независимых переменных.

При проведении гидрогеологических и гидрологических исследований могут возникнуть и другие задачи, при решении которых может быть полезен предлагаемый метод.

Литература

1. Бочеввер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. М., 1969.
2. Кац Д. М., Шестаков В. М. Мелиоративная гидрогеология. М., 1981.
3. Шестаков В. М., Пашковский И. С., Сойфер А. М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М., 1982.
4. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. ЮНЕСКО, 1968.
5. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Берлин, 1979.
6. Фернандес Н., Уерта Х. Национальная сеть плювиометров. Гавана, 1978.
7. Лапишова Л. П. Методы оценки инфильтрационного питания подземных вод. Обзор. М., 1982.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРОЗИОННО-ДОПУСТИМЫХ ПОЛИВНЫХ НОРМ С УЧЕТОМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

А. М. Абрамов, И. А. Соломин

Получение высоких и устойчивых урожаев на орошаемых землях дождеванием зависит не только от состояния оросительной системы, но также от правильности принятых технических решений при проектировании и эксплуатации.

В практике почвенно-мелиоративных исследований значительное место занимает определение параметров впитывания воды в почву при орошении дождеванием [2, 4, 5]. Исследование почвозащитной роли сельскохозяйственных культур при поливе дождеванием относится к одному из важных, но недостаточно изученных вопросов в мелиорации. Отсутствие количественных характеристик влияния различных культур на впитывание воды в почву затрудняет определение эрозионно-допустимых поливных норм в течение вегетационного периода при орошении дождеванием. На незащищенной растительным покровом почве допустимые поливные нормы в течение вегетационного периода могут быть рассчитаны по зависимостям, учитывающим удельную мощность дождя, а также изменение объемной массы и предполивной влажности почвы [3].

Общеизвестна многообразная почвозащитная роль растительности. Она проявляется в уменьшении ударной силы капель дождя, задерживании части осадков надземной частью растений, а также во влиянии их корневой системы. Механизм этого процесса зависит от вида растений и фазы их развития, где основную роль играют проективное покрытие и высота, с которой падают преобразованные капли.

Степень влияния растительного покрова на впитывание воды в почву при дождевании для определенной культуры может быть установлена делением допустимой поливной нормы с растительным покровом на допустимую поливную норму без растений для идентичных условий

$$K_p = \frac{m_{др}}{m_d}, \quad (1)$$

где K_p — коэффициент влияния растительного покрова; $m_{др}$ и m_d — эрозионно-допустимые поливные нормы соответственно на участке с растительным покровом и на открытой почве, мм ($m^3/га$).

Коэффициент влияния растительного покрова K_p учитывает не только влияние проективного покрытия (параметр A , по Г. И. Швебсу [7],

изменяется от нуля до 1,0 и отражает степень покрытия почвы растительностью; если почва полностью покрыта растительностью, $A = 0$, если почва оголена, $A = 1$), но также измененные энергетические показатели искусственного дождя после попадания его капель на листовой покров.

Для определения коэффициента влияния растительного покрова были проведены серии опытных поливов в ОПХ, «Орошаемое» ВНИИОЗа в Волгоградской области с яровой пшеницей, люцерной, кукурузой и соей под передвижной дождевальнoй установкой (ПДУ) и дождевальными машинами «Днепр», «Волжанка», ДДА-100М. Методика наших полевых опытов состояла в параллельном определении для одних и тех же условий соответственных поливных норм на двух опытных делянках с растениями и без растений в течение вегетационного периода. Определение эрозионно-допустимых поливных норм на площадках без растительного покрова для различного агротехнического состояния почв проведено по методике ВНИИГиМ—МИИЗ [3]. Растительность на опытных площадках размером 10–15 м² при необходимости срезали ножом или серпом (косой) без нарушения поверхности почвы внутри делянки. На площадках по сетке с шагом 0,8–1,0 м устанавливали дождемерные сосуды. Во время полива образование слоя воды на поверхности почвы, непосредственно предшествующее стоку, фиксировали визуально; время, прошедшее от начала полива, регистрировали секундомером, а дождемерный сосуд, в районе которого появился слой воды, снимался и замерялся находящийся в нем объем воды; по площади в разных участках через различные промежутки времени после начала дождевания образовался слой воды на почве, и дождемерные сосуды постепенно «выбывали». Полив заканчивался, когда вся площадь практически покрывалась слоем воды. Делянки с растительным покровом разбивались на учетные площадки размером (1,0 м × 1, или 0,8 м × 0,8 м), в центре которых устанавливали дождемерный сосуд на высоте растений. Между учетными площадками прокладывали проходы для наблюдателя. За расчетный момент (t_0) принималось начало общего стока воды за пределы учетной площадки, с наступлением которого дождемерный сосуд выносился из зоны дождя. Отбор фильтров с отпечатками диаметров капель проводился во время опыта над дождемером, который располагался на одном уровне с растительным покровом. В результате опытов для каждого фиксированного дождемера на каждой площадке получили: t_0 —продолжительность полива до начала водообразования; m_d —слой осадков, впитывающихся в почву за время t_0 ; ρ —среднюю интенсивность дождя, $\rho = m_d/t_0$; $d_{ср}$ —осредненную (на массе) крупность капель дождя.

Расположение опытных площадок под дождевальными машинами выбиралось в зависимости от их типа.

Результаты поливных экспериментов по изучению влияния растительного покрова на показатели впитывания воды в почву при поливе

ПДУ сведены в табл. 1. В табл. 1 также приведены эрозионно-допустимые поливные нормы, определенные графоаналитически из зависимости эрозионно-допустимой поливной нормы от удельной мощности дождя $m_d = f(N_v)$ для удельной мощности переходной зоны коротко-среднеструйных дождевальных аппаратов (6).

Как видно из табл. 1, с развитием растительного покрова коэффициент влияния растительного покрова K_p увеличивается. Максимальные значения K_p для наблюдаемых культур, кроме яровой пшеницы, приходятся на конец вегетационного периода. Преобразующая и почвозащитная роль пшеницы в течение вегетационного периода нарастала неравномерно. В начале вегетации из всех изучаемых культур пшеница обладает наибольшими почвозащитными характеристиками, что связано с высокими значениями ее проективного покрытия. Размер площади листьев и динамичность их формирования является одним из основных показателей преобразующего влияния растений. На площадь листовой поверхности пшеницы существенно влияет фаза ее развития. Для условий Волгоградской области период наибольшего развития листовой поверхности наблюдается в конце мая – начале июня. Проективное покрытие в этот период достигает 95–100%. Коэффициент влияния растительного покрова составляет 1,2. Максимальные значения K_p (до 2,4) у пшеницы наблюдались в фазе начала налива зерна восковой спелости при проективном покрытии 80–95%. При уменьшении проективного покрытия почвозащитное воздействие пшеницы снижается. При проведении поливов на участке 2–2а в фазе молочной и восковой спелости при снижении проективного покрытия на 10–20% K_p уменьшилось на 30%. Почвозащитная роль пшеницы сохраняется также после уборки урожая. Растительные остатки (мульча) защищают почву, снижают энергетические показатели капель дождя и увеличивают допустимые поливные нормы на 30–50%.

Точно, как и у пшеницы, почвозащитная роль других культур сильно реагирует на проективное покрытие. Люцерна оказывает свое почвозащитное воздействие сразу же после укоса на неделе ($K_p = 1,30–1,50$). В конце недели коэффициент влияния растительного покрова достигает более высоких значений ($K_p = 1,5–2,0$).

В начале вегетационного периода кукуруза и соя слабо защищают почву от ударов капель дождя. В этот период при поливе кукурузы дождем с высокими энергетическими показателями (ДДА-100М) с насадками, расположенными вниз) часть растений (по нашим наблюдениям, до 20–25%) прибивается к почве и покрывается мелкоземом. Поэтому в данный период вегетации кукурузы ее полив необходимо производить дождевальными установками с низкими энергетическими характеристиками. Полученные значения коэффициентов влияния растительного покрова (K_p) для кукурузы хорошо согласуются с опытными данными для Нечерноземной зоны РСФСР [1].

Результаты экспериментов, проведенных под дождевальными ма-

Коэффициенты влияния растительного покрова (K_p), определенные при поливе ПДУ

№ участка	№	Культура, фаза развития	Дата проведения опытов	Объемная масса почвы в слое 0-2 см, кг/дм ³	Предполивная влажность почвы в слое 0-20 см от НВ	Проективное покрытие %	Высота растений, м	Эрозионно-допустимые поливные нормы для открытой почвы, $K_p = m_{др}/m_d$ мм	Коэффициент влияния растительного покрова
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
4	Соя	начало цветения	10.07.79	1,28	0,72	25	0,35	28,0	1,02-1,08
		конец цветения	16.07.79	1,35	0,60	40	0,40	28,5	1,20-1,30
		молочная спелость	27.08.79	1,38	0,43	50	0,50	22,5	1,30-1,50
		созревание	30.08.79	1,39	0,38	50	0,50	24,5	1,30-1,50
36	Соя	всходы	9.06.79	1,25	0,67	2-5	0,10	34,5	1,00
		всходы	29.06.79	1,23	0,84	5-10	0,15	31,0	1,02-1,05
		цветение	9.07.79	1,34	0,58	50	0,400	25,5	1,50-1,60
		образование бобов	25.07.79	1,38	0,52	15	0,50	26,5	1,05-1,10
		созревание бобов	25.07.79	1,38	0,52	50-60	0,50	26,5	1,80-1,90
3а	Соя	цветение	9.07.79	1,35	0,41	45	0,35	35,0	1,40-1,50
		образование бобов	25.07.79	1,36	0,46	50	0,45	30,0	1,35-1,55
		молочная спелость	3.08.79	1,40	0,80	80-90	0,50	19,0	2,10-2,20
		созревание	23.08.79	1,41	0,44	40	0,50	23,0	1,35-1,50
		созревание	23.08.79	1,41	0,44	80-95	0,55	23,0	1,90-2,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-1a	Кукуруза							
	3-4 лист	28.05.79	1,30	0,80	5	0,15	28,5	1,00
	восьмой лист после культивации	4.07.79	1,27	0,40	40	1,1	45,0	1,10-1,15
	образование початков	24.07.79	1,43	0,50	80	1,6-1,8	24,5	1,55-1,75
2-1б	Кукуруза							
	3-4 лист	28.05.79	1,31	0,80	5	0,15	28,0	1,00
	восьмой лист после культивации	4.07.79	1,37	0,60	40	1,0	36,0	1,10-1,15
	образование початков	24.07.79	1,41	0,55	50-60	1,6-1,8	29,5	1,30-1,50
2-2a	Яровая пшеница							
	полные всходы	30.05.79	1,10	0,50	100	0,15	32,5	1,10-1,15
	начало налива зерна	3.07.79	1,26	0,45	90-95	0,45	22,5	2,10-2,40
	молочная спелость	11.07.79	1,33	0,60	60-70	0,50	21,0	1,50-1,70
	молочная спелость	11.07.79	1,33	0,60	50-60	0,50	21,0	1,30-1,50
	восковая спелость	27.07.79	1,35	0,50	80-90	0,50	14,5	2,00-2,50
	восковая спелость	27.07.79	1,35	0,50	70-80	0,50	14,5	1,80-2,00
	стерня	4.08.79	1,33	0,55	30	0,15	28,5	1,20-1,30
2-2б	Яровая пшеница							
	полные всходы	30.05.79	1,09	0,60	100	0,15	34,5	1,10-1,20
	начало налива зерна	3.07.79	1,25	0,40	80-90	0,45	29,5	1,70-2,10
	молочная спелость	11.0.79	1,34	0,45	85	0,50	17,5	1,80-2,00
	восковая спелость	27.07.79	1,34	0,40	40-60	0,50	15,5	1,20-1,50
	стерня	4.08.79	1,33	0,65	30-50	0,15	23,0	1,20-1,50
1a	Люцерна							
	1-я неделя после укоса	7.08.79	1,36	0,55	50	0,15-0,2	18,5	1,30-1,50
	3-я неделя после укоса	15.08.79	1,31	0,76	70	0,50	20,0	1,50-2,00

Таблица 2

Коэффициенты влияния растительного покрова
 K_p , определенные при поливе дождевальными машинами

№ участка	Тип дождевальной машины	Культура, фаза развития	Дата проведения опытов	Объемная масса почвы в слое 0-20 см, кг/дм ³	Предполивная влажность почвы в слое 0-20 см от НВ	Проектное покрытие, %	Высота растений, м	Эрозионно-допустимые поливные нормы для открытой почвы, $K_p = m_{др}/m_d$ мм	Коэффициент влияния растительного покрова, $K_p = m_{др}/m_d$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Днепр	Соя Конец цветения Созревание	18.07.79 21.08.79	1,35 1,38	0,60 0,43	40 50	0,40 0,45	20,7 17,5	1,02-1,05 1,10-1,15
4,3а	Волжанка	Соя созревание , созревание	25.08.79 30.08.79	1,41 1,39	0,44 0,38	50 50	0,50 0,50	21,0 25,0	1,40-1,45 1,50-1,60
2-1а	ДДА-100	Кукуруза восьмой лист после культивации восьмой лист после культивации образование початков	4.07.79 4.07.79 25.07.79	1,27 1,27 1,43	0,40 0,40 0,50	40 70 80	1,1 1,1 1,6-1,8	5,7 5,7 2,5	1,10-1,15 1,20-1,50 1,50-1,60

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2-16	ДДА-100М	Кукуруза восьмой лист после культивации	4.07.79	1,37	0,60	40	1,0	4,4	1,15-1,20
		образование початков	25.07.79	1,41	0,55	80	1,6-1,8	3,0	1,50-1,80
2-2а	ДДА-100М	Яровая пшеница полные всходы	31.05.79	1,10	0,50	100	0,15	4,5	1,10-1,15
		начало налива зерна	4.07.79	1,26	0,45	70-80	0,45	3,6	1,20-1,30
2-2б	ДДА-100М	Яровая пшеница полные всходы	31.05.79	1,09	0,60	95	0,15	4,3	1,02-1,05
		начало налива зерна	4.07.79	1,25	0,40	60-70	0,45	3,3	1,20-1,30
эрозивно-допустимые поливные нормы для АДА-100 определены для 1-го прохода									

шинами одновременно с опытами с ПДУ, приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, коэффициенты влияния растительного покрова при поливе дождевальными машинами также возрастают к концу вегетационного периода. Минимальные значения K_p наблюдаются у дождевальной машины «Днепр», что, по-видимому, связано с более высокими энергетическими показателями капель дождя машин.

Проведенные эксперименты исследования по определению эрозионно-допустимых поливных норм с учетом растительного покрова при искусственном дождевании позволят более обоснованно подойти как к проектированию, эксплуатации оросительных систем, так и к разработке мероприятий по борьбе с ирригационной эрозией почв.

Литература

1. *Абрамов А. М.* Об учете растительного покрова при определении эрозионно-допустимых поливных норм. В сб.: Предотвращение ирригационной эрозии почв Средней Сибири. Красноярск, 1982, с. 42–45.
2. *Ильин Н. И., Абрамов А. М., Морин А. Г.* О влиянии энергии дождевых осадков на впитывание их почвой. Водные ресурсы, 1981, № 6, с. 141–144.
3. *Ильин Н. И., Абрамов А. М., Бочков В. К.* Определение эрозионно-допустимых поливных норм при дождевании для почв центральных областей Нечерноземной зоны РСФСР. В сб.: Вопросы проектирования оросительных систем. В/О «Союзводпроект», М., 1983, с. 89–103.
4. *Колесник Ф. Н.* Методика оценки эффективности дождевальных машин. М., 1975, 157 с.
5. Методическое руководство по изучению воднофизических свойств почв для мелиоративного строительства. М., Союзводпроект–Гипроводхоз, 1974, 197 с.
6. *Поляков Ю. П.* Ирригационная эрозия почв при поливе дождеванием.— Доклады ВАСХНИЛ, 1981, № 7, с. 41–43.
7. *Швебс Г. И.* Энергетическая оценка естественных и искусственных дождей. Метеорология, климатология и гидрология. Межведомственный научный сборник. Вып. 2. Киев, Изд-во Киевского государственного университета, 1966, с. 191–198.

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭРОЗИОННО-ДОПУСТИМЫХ ПОЛИВНЫХ НОРМ СВЕТЛО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

А. М. Абрамов, И. А. Соломин

Для значительного повышения рационального использования орошаемых земель дождеванием необходим комплексный подход по обоснованию эрозионно-допустимых поливных норм с учетом всех факторов, их определяющих. Это позволяет более обоснованно проводить районирование и выбор дождевальной техники, а также построение эрозионно-безопасного режима орошения. Согласно схемам построения эрозионно-безопасного режима орошения [3, 6], по данным почвенно-мелиоративных изысканий определяются эрозионно-допустимые поливные нормы дождевальных машин для начала оросительного периода. Исследованиями [5] установлено, что зависимость эрозионно-допустимой поливной нормы от энергетических характеристик искусственного дождя хорошо аппроксимируется следующей формулой

$$m_d = j \ln \frac{N_* - N_0}{N_y - N_0}, \quad (1)$$

где m_d — эрозионно-допустимая поливная норма, мм; j — коэффициент, характеризующий изменение впитывающей способности под влиянием энергетического воздействия дождя; N_* — удельная мощность, при которой водообразование на поверхности почвы происходит в момент времени $t_0 = 0$, Вт/м²; N_0 — удельная мощность, при которой водообразование не наступает вообще, Вт/м²; N_y — текущая удельная мощность, Вт/м².

Исследования проводились в ОПХ «Орошаемое» ВНИИОЗа, расположенного в зоне Волго-Донского междуречья Волгоградской области. Преобладающие почвы — светло-каштановые, тяжелосуглинистые, характеризующиеся слабощелочной реакцией почвенного раствора, с содержанием гумуса в пахотном слое 1,4–2,1%, объемной массой 1,27–1,30 см³ и наименьшей влагоемкостью 20,4% от массы сухой почвы. Почвы ОПХ обладают неблагоприятной макроструктурой, количество водопрочных агрегатов > 0,25 мм составляет 20 ÷ 35%.

Для получения параметров зависимости (1) проведены серии опытных поливов с помощью передвижной дождевальной установки ПДУ на почве с различным агротехническим состоянием при расстановке дождемеров по сетке с шагом 0,8–1,0 м по методике ВНИИГиМа [2].

В результате проведения серии опытов, состоящих из 70–100 расчетных точек, получили для каждого фиксированного дождемера сле-

дующие величины: продолжительность t_0 (мин) полива до начала водообразования; слой осадков m_d (мм), впитывающихся в почву за время t_0 ; ρ – среднюю в точке интенсивность дождя, $\rho = m_d/t_0$ (мм/мин); спектр осадков (n_i) и осредненный (по массе) размер капель дождя d (мм).

Удельная мощность дождя рассчитывалась по формуле Г.И. Швевса [9]

$$N_y = 0,0083\rho \sum_{n=1}^n (n_i v_{ki}^2), \quad (2)$$

где v_{ki} – скорость падения капель, м/с.

В расчетах использованы данные о скоростях падения капель Ганна и Кинцера [8].

Параметры зависимости (1) определяли по способу наименьших квадратов с использованием итерационного метода. Результаты приведены в таблице 1. Вид аппроксимирующей зависимости (1) для изучаемых почв представлен на рис. 1. Как видно из рис. 1, при увеличении удельной мощности капель дождя возрастает их разрушительное воздействие на почву, что приводит к уменьшению эрозионно-допустимых поливных норм. На графике четко прослеживается изменение эрозионно-допустимых поливных норм в зависимости от разновидности почвы и агротехнического состояния.

Анализ полученных данных, приведенных в табл. 1, показывает, что противозерозионная устойчивость светло-каштановых почв энергетическому воздействию дождя ниже, чем почв с водопрочной структурой [5]. Более высокая впитывающая способность, полученная для серии 1, по-видимому, связана с наличием прослоев песка, которые при пахоте были вывернуты на поверхность почвы. При проведении полевых опытов на светло-каштановой тяжелосуглинистой почве в различном агротехническом состоянии впитывающая способность возрастает при разрыхлении плужной подошвы, т.е. плужная подошва оказывает «лимитирующее» влияние на инфильтрацию воды в почву. Необходимо также отметить, что в конце оросительного периода со снижением водопрочных агрегатов (распылением почвы) уменьшается их устойчивость энергетическому воздействию капель дождя (серия 8).

Одновременно с опытами с помощью ПДУ (серия 8) проводились исследования впитывания воды в почву при поливе средне- («Фрегат») и короткоструйными (КДУ) аппаратами, установленными в верхней части стояка ПДУ. При поливе среднеструйными аппаратами за расчетный принимался момент, когда водообразование, предшествующее непосредственно стоку, не исчезало к следующему проходу по данной точке, а короткоструйными (КДУ) – по принятой нами методике. На рис. 1 показана зависимость для светло-каштановой тяжелосуглинистой почвы, полученная с помощью ПДУ, причем на этом же графике нанесены экспериментальные точки, соответствующие поливу среднеструйными

Результаты экспериментов по искусственному дождеванию

№ серии	Почва	Агротехническое состояние	Предполивная влажность в слое 0-20 см, весовая	Значения параметров уравнения (-)			
				Объемная масса в слое 0-20 см	m_d , мм	N_y , Вт/м ²	N_o , Вт/м ²
1.	Светло-каштановая тя-желосуглинистая глук-бокосолончаковая в сочетании со светло-каштановой среднесуглинистой карбонатной 0,3-0,5 м прослой песка	Стандартная площадка на пашне	10,1	1,17	13,90	18,70	0,001
2.	Светло-каштановая тя-желосуглинистая	То же	12,3	1,21	10,45	1,430	0,035
3.	То же	Пашня боронованная мелкокомковатая	17,5	1,14	15,87	1,484	0,021
8.	То же	Пашня боронованная мелкокомковатая, почва распылена с разрушенной пахотной подошвой	11,7	1,11	19,64	1,364	0,031

ми аппаратами, КДУ и с рассчитанной удельной мощностью дождя по скорости Ганна и Кинцера. Сравнение экспериментальных точек среднеструйного с кривой ПДУ показывает, что при среднеструйном дождевании и поливе КДУ удельная мощность дождя оказывает на впитывание воды в почву такое же влияние, как и при поливе ПДУ. Как видно из рис. 1, опытные точки при поливе КДУ хорошо аппроксимируются параметрами j , N_* и N_0 для серии № 8. С другой стороны, данные среднеструйного дождевания находятся на графике в основном левее кривой серии № 8. При расчете параметров зависимости (1) по скоростям Г. М.-С. Гаджиева [1] получены следующие значения: $j = 19,82$ мм, $N_* = 1,396$ Вт/м² и $N_0 = 0,001$ Вт/м², которые незначительно отличаются от значений параметров серии № 8. Следовательно, зависимость $m_d = f(N_y)$ для среднеструйного дождевания может выражаться формулой (1) и при расчете ее параметров необходим дифференцированный подход к выбору падения капель искусственного дождя при определении удельной мощности дождя.

Для серии № 8 также приведен расчет параметров зависимости (1) по выборкам для серий крупности капель от 1,0 до 2,2 мм, по Н. С. Ерхову [2]. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, значения параметров j , N_* и N_0 не имеют существенных различий для разных крупностей капель.

Полученные для светло-каштановых почв эрозионно-допустимые поливные нормы по зависимости (1) для дождевальных машин при допу-

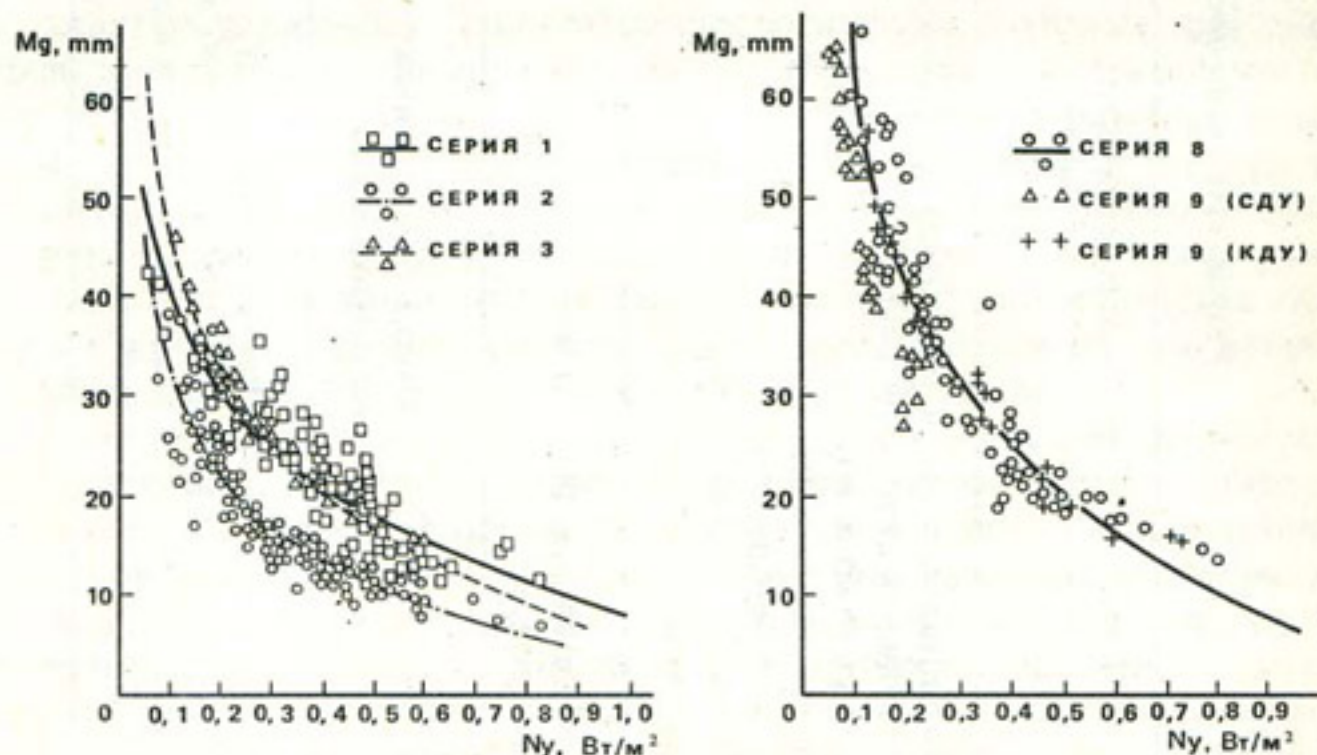


Рис. 1. Зависимость эрозионно-допустимой поливной нормы от удельной мощности дождя.

Результаты расчетов параметров уравнения (1)
для различных диаметров капель серии № 8

Средняя крупность капель дождя, мм	Количество наблюдений	Параметры уравнения (1)		
		j , мм	N_* , Вт/м ²	N_0 , Вт/м ²
1,0	14	13,99	2,981	0,101
1,1	12	15,86	2,126	0,095
1,2	14	13,99	2,981	0,101
1,3	16	14,12	2,937	0,100
1,4	18	14,10	2,897	0,101
1,5	18	14,10	2,897	0,101
1,6	12	15,86	2,126	0,095
1,7	12	15,86	2,126	0,095
1,8	11	18,18	1,589	0,086
1,9	15	14,05	2,969	0,100
2,0	17	14,38	2,719	0,100
2,1	12	15,86	2,126	0,095
2,2	9	28,65	0,820	0,045

стимом стоке 20–25% по площади полива в начале вегетационного периода («Волжанка» – 500–600 м³/га, «Днепр» – 400–500 и «Фрегат» – 300–400 м³/га) хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследований [6].

Для дальнейшего построения эрозионно-безопасного режима орошения дождеванием необходимы данные эрозионно-допустимых поливных норм в течение вегетационного периода с учетом изменений агротехнического состояния (объемной массы) и предполивной влажности почв. В расчетах используется модель с условной глубиной промачивания [5, 4], оценку которой проводят по результатам полевых экспериментов по изучению влияния объемной массы верхнего слоя пахотного горизонта (0–20 см) на впитывание воды в почву при поливе ПДУ – пять-шесть поливов в начале, середине и в конце вегетационного периода на почве в различном агротехническом состоянии. Результаты расчетов по модельным зависимостям и численные значения эрозионно-допустимых поливных норм, установленные графоаналитически по зависимости $m_d = f(N_y)$ для дождевальных машин «Днепр» и «Волжанка», приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, агротехническое состояние пахотного слоя и предполивная влажность почвы оказывают существенное влияние на

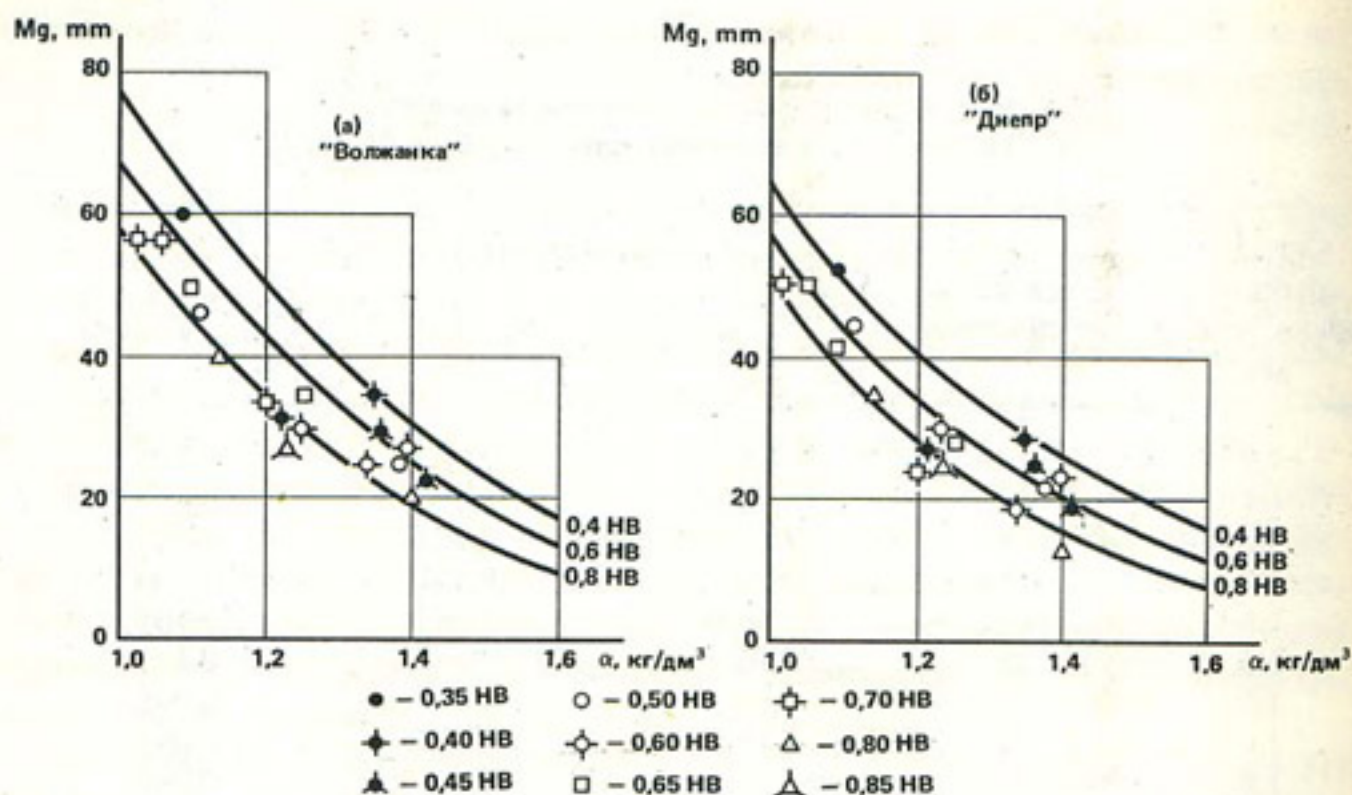


Рис. 2. Зависимость эрозионно-допустимой поливной нормы дождевальных машин «Волжанка» и «Днепр» от объемной массы почвы при различных значениях предполивной влажности, рассчитанных по моделям с условной глубиной промачивания, и результаты экспериментальных исследований для светло-каштановой тяжелосуглинистой почвы.

впитывающую способность светло-каштановых почв в течение вегетационного периода. Так, например, при работе дождевальной машины «Волжанка» при объемной массе пахотного слоя $\alpha = 1,0 \text{ кг/дм}^3$ и предполивной влажности $W_n = 0,6 \text{ HB}$ может быть выдана эрозионно-допустимая поливная норма в $650 \text{ м}^3/\text{га}$. После уплотнения почвы до $1,3 \text{ кг/дм}^3$ (середина вегетационного периода) эрозионно-допустимая поливная норма уменьшается до $320 \text{ м}^3/\text{га}$, т.е. в два раза, а в конце вегетационного периода ($\alpha \approx 1,45 \text{ кг/дм}^3$) эрозионно-допустимая поливная норма должна не превышать $220 \text{ м}^3/\text{га}$. Расчетные зависимости, приведенные на рис. 2, и опытные точки практически совпадают, что свидетельствует о справедливости модельных зависимостей для расчета допустимых поливных норм с учетом агротехнического состояния почвы и ее предполивной влажности.

Проведенные экспериментальные исследования по определению эрозионно-допустимых поливных норм светло-каштановых почв при дождевании позволяют более обоснованно подойти как к проектированию, эксплуатации оросительных систем, так и к разработке мероприятий по предупреждению ирригационной эрозии почв.

Литература

1. Гаджиев Г. М. Скорость падения капель дождя, создаваемого дождевальной машиной «Фрегат». — Тракторы-сельхозмашины, 1977, № 7, с. 26–27.
2. Ерхов Н. С. Методика определения безнапорной водопроницаемости почв при дождевании. Почвоведение, 1975, № 9, с. 94–100.
3. Ерхов Н. С. Влияние эрозионно-допустимых поливных норм на режимы орошения сельскохозяйственных культур при дождевании. В кн.: Основные вопросы совершенствования техники и технологии полива. М., 1981, с. 135–141.
4. Ильин Н. И., Абрамов А. М., Бочков В. К. Определение эрозионно-допустимых поливных норм при дождевании для почв центральных областей Нечерноземной зоны РСФСР. В сб.: Вопросы проектирования оросительных систем. В/О «Союзводпроект». М., 1983, с. 83–103.
5. Ильин Н. И., Соломин И. А. О назначении режима орошения с учетом впитывающей способности почвы. Вестник сельскохозяйственной науки, 1983, № 11, с. 117–122.
6. Кружилин И. П., Кузнецов П. И. Согласование элементов техники с условиями проведения полива. Степные просторы, 1981, № 12, с. 45–47.
7. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л., Гидрометеиздат, 1961, с. 541.
8. Швобс Г. И. Теоретические основы эрозиоведения. Киев–Одесса. Вища школа, Головное издательство, 1981, с. 224.

АНТРОПОГЕННЫЕ МОДИФИКАЦИИ ЛАНДШАФТОВ БЕНГАЛЬСКОЙ ДЕЛЬТЫ

А. О. Попырина

В статье рассматривается дельта наиболее крупных рек Южной и Юго-Восточной Азии — Бенгальская.

Дельта Ганга — Брахмапутры принадлежит к числу наиболее сложных для исследования географических объектов. Располагаясь на стыке суши и акватории Бенгальского залива, она отличается тесной взаимосвязью всех элементов природного комплекса, высокой внутригодовой и многолетней изменчивостью различных природных параметров. Вместе с тем для дельт муссонной Азии характерна высокая степень освоенности территорий и густая заселенность, а антропогенным ландшафтам, формирующимся в этих областях, свойственна повышенная экологическая устойчивость, что позволяет им выдерживать «давление» постоянно растущего населения.

«Нагрузка» сельскохозяйственного населения на земельные ресурсы в дельте Ганга — Брахмапутры и в некоторых других дельтах муссонной Азии (Иравадийской, Меконгской) сказывается, пожалуй, с наибольшей силой в масштабе всего тропического пояса (исключением в данном случае является остров Ява). Поэтому задачи, решение которых сегодня требуется в этих областях, — это фактически задачи завтрашнего дня для многих других развивающихся стран. В качестве ведущих земледельческих районов, ориентированных полностью или в значительной степени на производство продовольственных культур, дельтовые территории Южной и Юго-Восточной Азии (в частности, рассматриваемая нами Бенгальская дельта) занимают исключительно важное место в экономике тех стран, в пределах которых они расположены. В то же время высокий уровень антропогенного воздействия на природные ландшафты вызвал необратимые последствия. Естественная растительность практически повсеместно полностью сведена, в значительной степени изменен почвенный покров. Это дает основания говорить о замене природных ландшафтов в дельте Ганга — Брахмапутры их антропогенными модификациями.

Особенности физико-географических условий территорий

1. Рельеф. В целом рельеф дельт муссонной Азии характеризуется почти идеально плоской поверхностью.

По сравнению с дельтами других регионов Бенгальская дельта имеет значительно меньшие углы наклона поверхности, меньшую высоту над уровнем моря. Действительно, в среднем для дельты они колеблются от $0,1-0,005^\circ$.

Более одной трети площади Бенгальской дельты в пределах Бангладеш по абсолютным отметкам не превышает 3 м над уровнем моря, а вся остальная территория — 9,1 м (за исключением возвышенностей Мархупур — 15,2–30,5 м и Баринд — до 12 м над уровнем моря).

Вследствие плоского низменного характера рельефа дельты, а также большой величины твердого стока, у рек часто меняются направления русел, дренаж междуречий, как правило, затруднен, а понижения рельефа заболочены.

Все это сказывается на особенностях сельского хозяйства, ведение которого здесь очень специфично. На фоне высокой выравненности дельтовых территорий для них характерен ярко выраженный микро-рельеф: прирусловые валы, сухие русла и старицы, западины, блюдцевидные понижения. Естественные формы рельефа повсеместно дополнены искусственно созданными земляными валами и дамбами, «танками», оросительными и дренажными каналами.

В геоморфологическом отношении дельту можно разделить на 3 группы:

- 1) молодые аллювиальные равнины;
- 2) древние аллювиальные равнины;
- 3) собственно, дельтовые равнины.

В основу такого деления территории Бенгалии была положена разница в абсолютной высоте поверхностей, времени образования, литологии и в характере расчленения рельефа.

Средняя абсолютная высота молодых аллювиальных равнин достигает 5,5 м над уровнем моря. В целом рельеф имеет плоский характер, осложненный различными выпуклыми или вогнутыми аккумулятивными формами. Это — различные прирусловые валы, гряды, островки, западины, ложбины. Территории сложены в основном речным аллювием различного возраста. Галерейная растительность берегов сдерживает эрозионные процессы, хотя в настоящее время растительность берегов практически вся сведена под сельскохозяйственные территории или крестьянские поселения. Большое значение в борьбе с эрозией оказывают различные искусственно созданные формы рельефа (земляные валы и дамбы и т.п.), которые препятствуют проникновению речных вод. Правда, например, в долине реки Тисты искусственные противозерозионные сооружения не помогают решить проблему наводнений. Ее долина ежегодно подвергается опустошительным наводнениям, что ярко отражается в ее микрорельефе: различные промоины, борозды, каналы.

Древние аллювиальные равнины имеют среднюю абсолютную высоту в 13,5–14 м над уровнем моря. Сложены они аллювием древнего воз-

раста, частично латеризованным. Эрозия достигла здесь значительных размеров. Рельеф осложнен волнообразными поверхностями. Эрозия также привела и к выполаживанию поверхности, местами к распространению вогнутообразных поверхностей. Такой рельеф характерен для аллювиальной равнины Читтагонг.

Однако в целом расчленение поверхностей значительное. Древние русла рек, блюдцеобразные понижения, древние береговые валы — характерные элементы рельефа этих территорий.

Собственно, дельтовые равнины лежат в промежутке между древними и молодыми аккумулятивными равнинами, достигая 9,5 м над уровнем моря. Близлежащие от Бенгальского залива территории характеризуются несформированностью рельефа, большой зависимостью от характера и длительности затопления морскими водами. Сложены они современным аллювием различного механического состава. В местах распространения глинистого горизонта широкое развитие получили болота. Район, ограниченный реками Бхагиратхи, Падмой и Мадхумати, — наиболее древняя часть дельты. Здесь верховья старых рукавов были занесены илом, а сами текут по прежним наносным береговым валам. Ближе к побережью Бенгальского залива реки становятся более активными, и вдоль наиболее крупных из них наблюдается отложение ила. Они несут значительное количество воды после летних дождей, но в общем деградируют и в сухой сезон все более и более засоляются.

Существуют разногласия по вопросу о том, наступает ли дельта по-прежнему на море или абразия берет верх над аккумуляцией. В местном масштабе абразия, несомненно, существует, но в целом накопление осадков преобладает.

II. Климат. Дельта Ганга — Брахмапутры располагается в субэкваториальных широтах, в поясе сезонной смены экваториальных и тропических воздушных масс, определяющей характерные особенности климата Южной и Юго-Восточной Азии. Закономерная смена преобладающих направлений воздушных потоков в течение года приводит к чередованию сухих и влажных сезонов. Для муссонного климата Южной и Юго-Восточной Азии в целом характерна сухая, солнечная, умеренно теплая зима, жаркая, засушливая весна, влажное, дождливое лето и относительно сухая, теплая осень.

Дельтовая область несмотря на невыраженность рельефа характеризуется высокими годовыми нормами осадков (1200–3800 мм), что можно объяснить расположением дельты на морском побережье на пути влажных в летнее время воздушных потоков. Однако атмосферные осадки неравномерно распределены по ее территории, и годовые суммы осадков различны для каждой части дельтовой области. Это обусловлено местными особенностями атмосферной циркуляции, характером дельтовой территории и очертаний берегов.

Богатство дельтовых областей термическими ресурсами обеспечивает возможность круглогодичной вегетации любых тропических куль-

тур, а следовательно, снятия нескольких урожаев в год. Однако эта возможность лимитируется крайне неравномерным внутригодовым распределением осадков, обуславливающим резко выраженную сезонность годового увлажнения. Летний период характеризуется огромным переувлажнением, что создает условия, пригодные для возделывания в основном лишь гигрофитных культур. Засушливость зимне-весеннего сезона практически не позволяет заниматься земледелием без искусственного орошения. Высокая вариабельность осадков, длительность влажного периода, временное наступление и прекращение муссонных дождей, а также частая повторяемость катастрофических явлений природы отрицательно сказываются на стабильности с/х производства. Таким образом, вопрос о благоприятных агроклиматических условиях дельтовых областей муссонной Азии не может быть решен однородно. В целом эти условия можно считать только относительно благоприятными и то лишь для определенного набора с/х культур.

Особенности водного режима и других гидрологических параметров дельтовой области являются наряду с климатом важнейшим фактором, обуславливающим как природные условия, так и характер и возможности хозяйственного использования земель в дельте.

Гидрологические условия дельтовой территории очень разнообразны.

На всей территории дельты гидрологический фактор оказывается наиболее важным. Ежегодные паводки приходятся на вторую половину лета — начало осени, что в целом соответствует периоду муссонных дождей. При интенсивных осадках уровень воды в реках резко повышается. В результате этого реки выходят из берегов и затопляют ближайшие территории.

Широкие разливы рек в дельтовых областях имеют, с одной стороны, большое положительное значение. Реки приносят на поля большое количество ила, способствующего поддержанию определенного уровня плодородия почв. Благодаря огромному количеству воды и теплоту тропическому климату становится возможным возделывание риса — главной продовольственной культуры в муссонной Азии. С другой стороны, условия затопления крайне ограничивают набор с/х культур, пригодных для возделывания в муссонный период, а большая изменчивость величины паводков от года к году препятствует стабильности с/х производства.

Защита от наводнений и мероприятия по ее осуществлению с каждым годом принимают все более актуальный характер.

Воздействие моря на территорию дельты Ганга — Брахмапутры проявляется в затоплении площадей в нижних частях дельты морскими приливными водами, а также штормовыми, в усилении паводочного разлива рек и засоления почв, в увеличении солености речных и грунтовых вод, вплоть до невозможности использования для хозяйственных нужд без проведения специальных мероприятий.

Морские приливы в устьях Ганга, Брахмапутры достигают 4–7 м высоты. В результате речные воды как бы подпираются или подпруживаются приливными водами моря, уровень воды в реках значительно повышается, а следовательно, затопляются (особенно во время паводков) значительно большие пространства, чем это было при отсутствии приливного влияния моря. Такие мощные приливы не только усиливают наводнения на реках, но и представляют серьезную опасность для судоходства.

Наиболее неблагоприятен также тот факт, что максимальная высота приливов совпадает в основном с меженным периодом речного стока (Гуру, 1956). Это повышает степень солености вод на значительных территориях и увеличивает площади, покрываемые морскими приливами. Примерно около 1/3 земель дельты затопляется весной приливами или едва возвышается над уровнем затопления. Высокая соленость вод ограничивает хозяйственное использование земель.

III. Растительный покров и основные возделываемые культуры. Бенгальская дельта принадлежит к районам древнего освоения, и в настоящее время большая часть ее распахана. Естественный растительный покров практически полностью сведен или замещен вторичными растительными формациями.

В доисторический период на наиболее возвышенных участках Бенгалии произрастали субэкваториальные приокеанские переменнo-влажные леса.

Однако и до начала хозяйственного освоения дельт их растительный покров отличается пестротой и мозаичностью. Современный облик растительного покрова Бенгалии, созданный под влиянием хозяйственной деятельности человека, сильно изменен.

В настоящее время естественная растительность дельт представлена, главным образом, мангровыми лесами вдоль морского края дельт, болотной растительностью в понижениях рельефа, вторичными муссонными лесами и саванными на наиболее возвышенных участках и галерейными бамбуковыми зарослями с примесью древесных пород вдоль рукавов рек и протоков. Всю остальную площадь дельты занимают преимущественно рисовые поля.

Основными возделываемыми культурами, кроме риса, являются: джут, различные зерновые и технические культуры, бобовые и масличные. Общая посевная площадь 13290 тыс. га, из нее под

рис занято	– 10314 тыс. га
прочие зерновые	– 225 тыс. га
бобовые	– 369 тыс. га
масличные	– 344 тыс. га
сахарный тростник	– 171 тыс. га
джут	– 998 тыс. га
фруктовые	– 89 тыс. га
прочие	– 589 тыс. га

По этой таблице можно судить о соотношении засеваемых сельскохозяйственными культурами площадей. Основной возделываемой культурой является рис. Незначительное распространение посевов зерновых культур на дельтовых территориях объясняется не только природными и историческими причинами, но и экономическими. Дело в том, что эти культуры возделываются в основном в зимний период либо на пойменных землях и островах русел рек (каинговые земли), которые длительное время сохраняют высокую влажность почв после окончания паводков и сезона дождей, либо на более высоких землях, требующих в сухой сезон искусственного орошения.

Из технических культур большое значение имеет джут. Широкое возделывание джута началось сравнительно недавно. На территории современной Бангладеш джут выращивался еще в XVII–XVIII вв., для нужд местного кустарного производства он стал главной товарной культурой лишь в XIX в. с возникновением в Великобритании джутовых фабрик, в связи с чем он широко экспортировался уже в колониальный период. Однако, начиная с шестидесятых годов (в связи с бурным развитием в мире производства синтетических волокон), спрос на джут резко упал, и площади под этой культурой стали сокращаться. Если в 1961–1965 гг. посевы джута в Бангладеш занимали 756 тыс. га, то в 1965 г. — лишь 526 тыс. га [1].

Методика выделения антропогенных модификаций ландшафтов Бенгальской дельты

В соответствии с различиями геоморфологического строения территории и литологического состава слагающих ее пород, особенностей микрорельефа, характера затопления, растительного и почвенного покрова, а также сельскохозяйственного использования нами были выделены модификации ландшафтов Бенгалии.

Бенгальская дельта относится, по классификации В. Н. Николаева, к классу равнинных ландшафтов и к зональному типу ландшафтов субэкваториальных сезонно-влажных лесов. В пределах этого типа различают роды и виды ландшафтов Бенгалии.

Основным критерием выделения родов является генетический тип рельефа, по которому роды ландшафтов делятся на молодые аллювиальные равнины, древние иллювиальные равнины, дельтовые равнины. Критерием выделения видов являлась литология поверхностных отложений. Каждому виду соответствуют также определенная структура растительного и почвенного покрова, характер затопления, особенности водного режима. Всего было выделено 12 видов ландшафтов. В пределах каждого вида ландшафтов на основе структуры землепользования выделяются антропогенные модификации ландшафтов. В итоге

Класс	Тип	Род	Вид	Местоположение	Сельскохозяйственный и лесохозяйственный тип использования земель
1	2	3	4	5	6
I		Древние Аллювиальные равнины	1. Низкая, холмисто-западинная равнина, сложенная аллювием с постоянным затоплением, с многочисленными болотами, с болотной растительностью на древних аллювиальных заболоченных почвах	Силхет	Б плантации плавающего риса
			2. Низкая, холмистая равнина, сложенная аллювием среднечетвертичного возраста, незатопляемая, с деградированной бамбуковой растительностью на молодых аллювиальных почвах	Читтагонг	А плантации риса
			3. Низкая, холмисто-волнистая равнина, сложенная аллювиально-пролювиальными отложениями нижнечетвертичного возраста, незатопляемая, с развитым эрозийным рельефом, с остатками саловых лесов на древних аллювиальных почвах	Баринд	Е посевы зерновых Ж плантации сахарного тростника З посевы бобовых И посевы масличных
			4. Низкая, холмистая равнина, сложенная аллювием среднечетвертичного возраста, затопляемая лишь в высокие паводки, с эрозийными формами рельефа, с листопадными лесами и редколесьями на темно-красных ферралитных почвах	Мадхупур	Л лесозаготовки

1	2	3	4	5	6
			5. Низкая, холмисто-балочная равнина, сложенная аллювием плиоцен-нижнечетвертичного возраста, редко затопляемая с балочным рельефом, с редколесьями на древних аллювиальных почвах	Аджай Дамодар Рупнараян	В плантации риса под орошением
Собственно, дельтовые равнины			1. Низкая, холмисто-долинная, плоская равнина, сложенная современным аллювием, редко затопляемая, со старичным рельефом, с остатками бамбуковых рощ на молодых аллювиальных почвах		А плантации риса Г плантации джута Д посевы овощей З посевы бобовых
II			2. Низкая, западная, плоская равнина, сложенная озерно-аллювиальными современными отложениями, затопляемая водами морских приливов, с развитой сетью мелких рек и озер, с пальмовой растительностью на глинистых молодых аллювиальных почвах		Г плантации джута И посевы масличных
			5. Низкая, западная, плоская равнина, сложенная современными аллювиальными отложениями, постоянно затопляемая водами морских приливов, с мангровыми лесами на засоленных молодых аллювиальных почвах	Сундарбан	Л лесозаготовки
Молодые аллювиальные равнины			1. Низкая, гравистая, плоская равнина, сложенная аллювиально-пролювиальными отложениями современного возраста, затопляемые, с развитыми каинговыми землями, с галерейными лесами на молодых аллювиальных почвах	Долина р. Тиста	А плантации риса Г плантации джута

РАВНИННЫЕ ЛАНДШАФТЫ

СВЯЗКАТОРНЫЕ СЕЗОННО-ВЛАЖНЫЕ ЛЕСА

1	2	3	4	5	6
		III	2. Низкая, бугристая, плоская равнина, сложенная аллювием среднечетвертичного, верхнечетвертичного возраста, незатопляемая, с землями прирусловых валов и русловых островов, с деградированной растительностью редколесий на древних аллювиальных почвах	Долина р. Джануна	Г плантации джута К пастбища
			3. Низкая, плоско-волнистая, сложенная аллювием верхнечетвертичного возраста, затопляемая, с развитием болотных земель, с фрагментарной болотной растительностью на засоленных болотных аллювиальных почвах	Долина р. Мегхна-Сурма	Б плантации плавающего риса
			4. Низкая, бугристая, плоская равнина, сложенная аллювием верхнечетвертичного возраста, частично затопляемая, с землями прирусловых валов, с галерейными лесами вдоль рек на молодых аллювиальных почвах	Долина р. Ганг	Г плантации джута Д посевы овощей Е посевы зерновых
			5. Низкая, западинная, плоская равнина, сложенная аллювиальными и аллювиально-морскими отложениями верхнечетвертичного возраста, с галерейными лесами на молодых аллювиальных засоленных почвах	Долина р. Хугли	Е посевы зерновых

было выделено 11 типов сельскохозяйственного и лесохозяйственного использования земель (см. таблицу).

Анализируя составленную таблицу, можно сделать следующие выводы:

территория Бенгальской дельты используется крайне неравномерно. В пределах таких видов, как Баринд (I(3)), долина реки Ганг (III(41)) и др. встречается несколько видов использования земель (см. таблицу). Другие виды характеризуются монокультурным ведением сельского хозяйства. Это характерно для равнин Силхет, Читтагонг и других видов ландшафтов. Это обусловлено спецификой как естественных природных, так и исторических причин.

В настоящее время существует мнение о том, что выращивание монокультуры (в нашем случае риса) ведет к отрицательным последствиям, в частности к снижению водопроницаемости пород. Для риса, который является гигрофитом, это явление не считается катастрофическим. Однако для других культур, набор которых здесь не так уж богат (см. таблицу), эта тенденция крайне неблагоприятна.

Кроме того, для территории Бенгальской дельты характерно в целом медленное заболачивание. Этому также способствуют распространение мощного глинистого горизонта и особенности твердого стока.

Заполнение русел рек и протоков в дельтах осадками речного стока приводит к выполаживанию продольного профиля рек, подъему ложа русел рек на большую абсолютную высоту, так что уровень поймы оказывается ниже уровня воды в протоках. Все это увеличивает длительность периода затопления. В силу присутствия здесь глинистого горизонта дренаж практически отсутствует.

Литература

1. Глазовская М. А. Почвы зарубежных стран. М.: Мысль, 1975.
2. Куракова Л. И. Антропогенные ландшафты. М.: МГУ, 1976.
3. Пуляркин В. А. Водохозяйственные проблемы земледелия Восточного Пакистана. В кн.: Водохозяйственные проблемы стран Азии. М.: Наука, 1969.

Распространитель изданий редакции в 126 странах мира — внешнеторговое объединение «Международная книга» — СССР, 113095, Москва.

Оформление подписки и заказов на издания редакции осуществляют зарубежные фирмы, имеющие деловые отношения с В/О «Международная книга». В СССР — подписка на журналы принимается в отделениях связи и агентствах «Союзпечать». Заказы на сборники — в магазинах «Союзкнига» и «Академкнига» по ежеквартальным темпланам издательства «Наука».

Наш адрес: 33/12, Арбат, 121818, ГСП, Москва, Г-2, СССР.

ПОЛНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАБОТАХ СОВЕТСКИХ УЧЕНЫХ В ИЗДАНИЯХ РЕДАКЦИИ «ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И СОВРЕМЕН- НОСТЬ» АКАДЕМИИ НАУК СССР.

Редакция издает:

– Ежеквартальный журнал (выходит также на английском, испанском, немецком, португальском и французском языках). Основное внимание в номерах 1986–1987 гг. будет уделено: теме ускорения социально-экономического развития СССР; всестороннему развитию человека нового общества; глобальным проблемам современности, прежде всего предотвращению ядерной катастрофы, в свете решений XXVII съезда КПСС. Среди рубрик журнала – «Развивающиеся страны: новые исследования», «Дискуссии и обсуждения», «Критика и комментарий», «Диалоги», «Человек и природа», «Научная жизнь», «Обзоры и рецензии» и другие;

– Журнал «Общественные науки и современность» (выходит 6 раз в год на русском языке). Стержневые темы номеров 1986–1987 гг. будут посвящены вопросам теории и практики социалистического и коммунистического строительства в свете решений XXVII съезда КПСС. Будет продолжено освещение проблем методологии общественнознания, интегративных процессов в современной науке;

– Научные тематические сборники. Ежегодно выходит до 75 наименований на английском, арабском, испанском, немецком, португальском и французском языках в 12 сериях: «Проблемы современного мира», «Советская экономическая наука», «Всемирная история: советские исследования», «История СССР: новые исследования», «Развивающиеся страны: проблемы и перспективы», «Советское востоковедение», «Африка: исследования советских ученых», «Латинская Америка: исследования советских ученых», «Философские и социальные проблемы науки и техники», «Право: исследования советских ученых», «Советские этнографические исследования», «Советское религиоведение».

“LA PAZ INTERNACIONAL Y EL DESARME”

es una serie de publicaciones que edita la Redacción General de Publicaciones para el Extranjero (“Naúka”) con el auspicio del Consejo Científico para el Estudio de los Problemas de la Paz y el Desarme. Los autores de la serie son célebres científicos soviéticos y especialistas en diversos ámbitos.

Los folletos de la serie se editan en español, alemán, inglés, francés y ruso. Familiarizan al lector con los puntos de vista de los científicos soviéticos respecto a los problemas más actuales de la vida internacional. Los temas de la serie: la prohibición de la militarización del Espacio cósmico; el futuro de la civilización humana en caso de estallar una guerra nuclear; la preservación del medio ambiente y la incidencia perniciosa que ejerce la carrera armamentista en el entorno; la importancia creciente del movimiento antibélico en el ámbito político y otros problemas. En sus trabajos los autores de la serie mencionada prestan gran atención al examen de las iniciativas pacíficas de la URSS en tica exterior. Las obras son de gran interés para especialistas. Y, al mismo tiempo, son asequibles para un gran sector de lectores.

En 1986–1987 en la serie “La Paz internacional y el Desarme” aparecerán:

1. A. Alexéiev. *Conferencia en Estocolmo.*
2. Colectivo de autores (el artículo de introducción del acad. D. Gvishiani). *El medio ambiente y la paz.*
3. O. Jarjardin. *opinión pública soviética en el movimiento antibélico mundial.*
4. Colectivo de autores. *Sindicatos y la paz.*
5. N. Berezhnaia y E. Blinova. *Mujeres en la lucha por la paz.*
6. Colectivo de autores (bajo la redacción del académico Я. Fedoséev). *Movimiento antibélico contemporáneo.*
7. A. Guínsburg, G. Golitsin (el artículo de introducción del acad. E. Vélijov)). *El planeta Tierra en “la época de posguerra nuclear”.*

8. Colectivo de autores. Revisado por el acad de la AC de la RSS de Armenia A. Petrosiants. *Las garantías del OIEA, importante eslabón en el régimen de la no proliferación del arma nuclear.*
9. Colectivo de autores. *Vías hacia la seguridad* (folleto). Fascículo 1.

Las publicaciones de la serie se puede pedir las:

en el extranjero: a través de las firmas, librerías, organizaciones que distribuyen publicaciones soviéticas y mantienen relaciones comerciales con la Entidad soviética "Mezhdunaródnaya Kniga".

en la Unión Soviética: a través del Departamento comercial de la "Akademkniga": 121002, Moscú, calle Arbat, 33/12. Tel.: 241-72-37

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Выпуск 8

Редактор *М. С. Брук*
Художественный редактор *С. Витте*
Технический редактор *Е. Розанова*
Корректор *Г. Барчукова*

Главная редакция
изданий для зарубежных стран
издательства «Наука»
Москва, Мароковский пер., 26

Сдано в набор 15.11.85. Подписано к печати 18.05.87. Формат 60 × 84¹/₁₆.
Бумага офсетная № 1. Гарнитура таймс. Печать офсетная. Объем 8 печ. л.
Уч.-изд. л. 7,46. А-01799. Тираж 2150 экз. Изд. № 1.485. Заказ 1977. Цена 55 к.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
г. Можайск, ул. Мира, 93

Отпечатано в Московской типографии № 9 Союзполиграфпрома при Государ-
ственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. Москва, Волочаевская, 40.