



Белусова А.П.

Доктор географических наук, профессор,
главный научный сотрудник Института
водных проблем Российской академии наук
ФГБУН Институт водных проблем РАН
anabel@iwp.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАТУРНОГО ПОДОБИЯ В ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗАХ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ ОБЪЕКТАХ

В статье рассмотрены теоретические основы метода натурального подобия и возможности его использования при гидромелиоративных исследованиях и прогнозах. Задачами гидромелиоративного прогноза на водно-балансовых участках являлись: предварительная оценка подъёма уровня грунтовых вод под влиянием проектируемого орошения; оценка изменения засоления пород зоны аэрации в процессе орошения; оценка изменения химического состава и минерализации грунтовых вод. Прогнозы были выполнены на Право-Егорлыкской оросительной системе (ПЕООС) – объекте с использованием данных детальных исследований на территории Большого Ставропольского канала (БСК-4) – натурной модели. Рассмотрен подход к выбору участков –аналогов на слабо изученной ПЕООС – объекте для переноса на них результатов научных исследований с хорошо изученных водно-балансовых участков – моделей (Елизаветинского и Совруновского) на территории БСК-4. Для выбора участка-аналога Елизаветинскому водно-балансовому участку-объекту на территории ПЕООС было проанализировано 9 участков, отобран только один, для выбора аналога Совруновскому рассматривалось четыре участка, аналог не найден.

Ключевые слова: натурное подобие и размерности, натурная модель, объект, аналог, критерии подобия, грунтовые воды, засоление, зона аэрации, гидромелиоративный прогноз.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН

Современные и прогнозируемые метеорологические условия, характеризующиеся потеплением климата, что ведёт к иссушению значительных территорий на юге нашей страны, будут способствовать более широкому развитию на этих территориях мелиоративных мероприятий. Гидрогеолого-мелиоративные процессы имеют сложный характер и при прогнозировании их возникают трудности, преодолеть которые можно с использованием метода натурального подобия (метода природных аналогов).

Теоретические основы метода

Основные понятия

Явления будут абсолютно подобны друг другу, если существует полное соответствие всех геометрических размеров рассматриваемых систем и всех изменяющихся во времени и пространстве величин (Веников, 1966). Абсолютное подобие в природе практически не встречается. С другой стороны явления можно назвать подобными, если характеристики одного из них могут быть получены пересчётом характеристик другого явления с помощью отношений, аналогично переходу от одной системы единиц измерения к другой (Гиляров, 1983; Гухман, 1979).

Выделяются следующие виды подобия по степени приближения к абсолютному:

полное подобие – подобие процессов, протекающих во времени и пространстве;

неполное подобие – подобие протекания процессов только во времени или только в пространстве;

приближённое подобие связано с упрощающими допущениями, которые могут быть оценены заранее на основе аналитических или экспериментальных исследований.

По степени приближения к физической природе подобных явлений выделяются:

физические подобия – при одинаковой физической природе подобных явлений;

математические подобия – разнородные физические явления описываются одинаковыми уравнениями.

На гидрогеолого-мелиоративных системах практически невозможно добиться геометрического подобия (подобие линейных размеров – частный случай физического подобия). Подобие гидрогеолого-мелиоративных процессов представляет собой частный случай приближённого подобия (Ходжибаев, 1976).

Но специальное положение теории подобия позволяет определить подобие гидрогеолого-мелиоративных процессов на геометрически неподобных объектах: «процессы, протекающие в системах геометрически неподобных, но подобных аффинно (неявно геометрически), или име-

ющих любое нелинейное подобие, могут быть физически подобны, имея в сходственных точках пространства подобные изменения параметров процесса» (Веников, 1966).

Прежде чем устанавливать подобие явлений, необходимо дать понятия модели и аналога.

Понятие модель в мелиоративной гидрогеологии употребляется реже, чем понятие аналог. Аналогом, по Л. Б. Розовскому (Розовский, 1969), будем называть базу для аналогии, материальную или мысленную категорию, между свойствами которой и свойствами объекта существует сходство или подобие некоторой части свойств; модель – это лишь усовершенствованный аналог, у которого сходство свойств дополняется их пропорциональными изменениями. Все свойства и функции аналогов одновременно являются и функциями моделей. Аналог связан со своим объектом только качественным сходством некоторых существенных характеристик. В модели это сходство дополняется приближенно пропорциональным изменением существенных характеристик и свойств. Следовательно, модель – усовершенствованный аналог.

Природные аналоги (натурные модели) – природные комплексы, особенности которых должны быть хорошо изучены и для того, чтобы можно было установить их подобие с другими природными объектами. В качестве природных аналогов в мелиоративной гидрогеологии могут быть взяты оросительные системы, массивы для прогноза изменения гидрогеолого-мелиоративных условий. Главным признаком природных аналогов является то, что они связаны с соответствующими объектами коэффициентами пропорциональности, близкими к единице.

Ввиду того, что гидрогеолого-мелиоративное подобие является приблизительным, то полная адекватность каждого из множества протекающих в системе процессов необязательна. Таким образом, для доказательства подобия гидрогеолого-мелиоративных процессов нет необходимости поиска в натуре аналогов с подобным изменением каждой переменной. Достаточно, чтобы обеспечивалось подобие комплексов через масштабные коэффициенты.

Помимо количественных признаков установления подобия объектов, существует и качественное. Такой вид моделирования Л. Б. Розовский (Розовский, 1969) называет атрибутивным, так как в этом случае сравниваются атрибуты (свойства) двух явлений, выраженные словами, а не мерой и числом.

Способы распознавания подобия натурной модели и объекта прогноза

Для доказательства подобия сравниваемых объектов служат три универсальных теоремы

физического подобия. Первая и вторая основывается на предложении о явлениях, подобие которых заранее известны и устанавливают соотношение между параметрами заведомо подобных явлений. Третья теорема устанавливает способ определения наличия подобия.

Первая теорема подобия.

У явлений, подобных в том или ином смысле (физически, математически, кибернетически и т.д.), можно найти определённые сочетания параметров, называемые критериями подобия, имеющие одинаковые значения (Веников, 1966; Седов, 1951).

Критерий подобия – это важный элемент в теории подобия – это показатель взаимодействия существенных сторон явлений, которое сохраняется неизменным у подобных явлений (Розовский, 1969).

Выход первой теоремы подобия к гидрогеолого-мелиоративному подобию заключается в сходстве критериев подобия.

Вторая теорема подобия имеет название л-теоремы, гласит: «всякое полное уравнение физического процесса, записанное в определённой системе единиц, может быть представлено в виде зависимости между критериями подобия (П), т.е. безразмерных соотношений, составленных из входящих в уравнение параметров» (Веников, 1966; Седов, 1951).

$$A=F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n)$$

– критериальное уравнение (1)

Применительно к геологическим процессам вторая теорема формулируется: подобные геологические явления, процессы, образования характеризуются качественными оценками или уравнениями, в которые входят критерии геологического подобия (Розовский, 1969).

Третья теорема подобия: необходимыми и достаточными условиями для создания подобия являются пропорциональность сходственных параметров и равенство критериев подобия изучаемого явления (Веников, 1966; Седов, 1951).

Третья теорема позволяет распознать подобие явлений и процессов. Подобные процессы (геологические) должны происходить в геометрически подобных системах, описываться одними и теми уравнениями связи, в которых условия однозначности находятся в численно постоянном отношении, а критерии подобия равны.

Под условиями однозначности понимают комплекс условий, удовлетворение которого делает возможным выделение из целого класса явлений какого-либо единичного явления (Гавич, 1980; Розовский, 1969).

Для подобия геологических процессов по Л.Б. Розовскому (Розовский, 1969) необходимо и достаточно, чтобы они были «качественно одинаковы», характеризовались одними и теми же критериями подобия и имели бы общие условия однозначности.

Примеры обоснования критериев подобия

Для гидрогеолого-мелиоративного подобия наиболее существенно сравнивать не конкретные характеристики свойств, выраженные в именованных числах, а их отношения – безразмерные критерии подобия (Белоусова, Гавич, 1985; Белоусова, 2001).

В теории подобия разработан математический аппарат, позволяющий выявить критерии подобия:

1. Представленные явления в форме дифференциального или интегрально-дифференциального уравнения.

2. Анализ размерностей величин и учёт условий однозначности.

В первом случае вывод критериев подобия выполняется путём анализа дифференциальных уравнений, преобразованных в безразмерный вид.

Хотя первый способ является и более надёжным для вывода критериев подобия, но в нашем случае определение всех параметров, входящих в уравнение для модели невозможно, т.к. в качестве модели выбран объект (оросительная система), на котором не проводились специальные работы по определению гидрохимических параметров (эффективной пористости и коэффициента микродисперсии и др.).

Поэтому для выявления критериев подобия наиболее удобен для нас второй способ – анализ размерностей.

Сочетание физического анализа с теорией размерности всегда приводит к успешным результатам, и получило широкое развитие в различных отраслях техники (Леви, 1960 и др.).

Из теории размерностей вытекает, что процесс количественно изучен, если определяющие его факторы представлены числами. Каждый фактор имеет своё численное измерение. Единицы измерения подразделяются на основные (первичные) и производные (вторичные).

Выражение производной единицы измерения через основные единицы измерения называются размерностью (Седов, 1951). В практике гидрогеологических работ основными являются: длина – L, масса – M, время – T. Производные величины записываются в виде комбинации основных величин, например, размерность концентрации будет

$$\frac{M}{L^3} = ML^{-3}$$

Применение метода натурального подобия и размерностей для прогноза гидромелиоративных процессов

Последовательность прогнозных расчётов

Рассмотрим на конкретном примере использование названного метода для решения прогнозных задач на водно-балансовых участках.

Основным содержанием метода натурального подобия в гидролого-мелиоративном прогнозировании является перенос результатов исследования процесса с натурального модельного аналога (хорошо изученного водно-балансового участка) на объект прогноза.

Ход прогнозных построений, основные принципы которого разработаны в работах (Белюсова, Гавич, 1985; Белоусова, 2001; Гавич, 1980; Ходжибаева и др., 1976), состоит в следующем:

1. Формулировка задач прогноза применительно к изучаемому объекту.

2. Анализ имеющихся по району материалов и выбор возможной натурной модели для изучаемого объекта.

3. Выявление главных факторов, формирующих исследуемые процессы на объекте.

4. Выбор и обоснование общей математической модели изучаемых процессов в виде критериальных уравнений и критериев подобия.

5. Предварительная схематизация гидрогеологических условий на основе критериев подобия, установление меры подобия.

6. Выбор участков-аналогов (натурной модели) и участков-объектов для прогнозных расчётов.

7. Проведение прогноза на участке-объекте:

а) прогноз изменения глубины залегания грунтовых вод;

б) гидрохимический прогноз изменения засоления пород зоны аэрации;

в) гидрохимический прогноз в грунтовых водах.

8. Обсуждение результатов прогноза и рекомендации по его проведению. Рассмотрим ход прогноза на территории Восточного Предкавказья. Анализ материалов по району исследований выполнялся в две стадии:

а) предварительный выбор возможной модели,

б) обоснование подобия выбранной модели объекту исследований по критериям подобия.

Предварительный выбор моделей проводился для территории четвёртой очереди Большого Ставропольского канала (СБСК-4). В качестве натуральных моделей были выбраны два водно-балансовых участка (аналога), один из которых – Совруновский расположен на засоленных землях, другой – Елизаветинский расположен на незасоленных и слабозасоленных землях. Используя предварительные сведения о сходстве геолого-гидрогеологических условий

в качестве возможной модели (объекта) была предложена территория первой и шестой очереди Право-Егорлыкской оросительно-обводнительной системы (ПЕООС).

Обоснование подобия выбранной натурной модели и объекта очень сложная задача, требующая полноты информации о геолого-гидрогеологических условиях на модели до орошения и о протекании изучаемых процессов в период орошения.

Для доказательства подобия необходимо располагать следующими сведениями: а) геологическое строение модели и объекта; б) условиями геолого-гидрогеологического формирования территорий; в) климатическими особенностями (характеристика осадков, температур, дефицита влажности, испарения, эффективных осадков, формирующие инфильтрационное питание грунтовых вод); г) гидрогеологическими условиями (глубина залегания, мощность и распространение водоносных горизонтов, условия питания и разгрузки, фильтрационные свойства, наличие водупоров и т.д.); д) гидрохимические условия (степень и тип засоления пород зоны аэрации, минерализация и химический состав грунтовых вод). Приведённый перечень не является полным, т.к. в каждом пункте объём информации может быть расширен в зависимости от решаемых задач.

Детальные исследования изучаемых районов приведены в (Белоусова, 2001) и зафиксировали, что, схематическая сопоставительная характеристика показала, что региональные объекты и общие модели по критериям атрибутного характера имеют сходственное строение, а значения критериев-симплексов, близкие к единице, подтвердили приближённое подобие объектов и их натуральных моделей.

Выявление главных факторов, формирующих исследуемые процессы на объекте

В процессе орошения в зависимости от проектируемых севооборотов на объекте исследований будут подаваться оросительные воды, норма которых (W_n) устанавливается также в зависимости от метеорологических условий, т.е. с учётом величин среднегодовых атмосферных осадков (O) и испарения. Тогда интенсивность водоподачи при орошении будет определяться следующим образом (Белоусова, 2001):

$$W = W_n + O \quad (2)$$

За счёт подачи оросительных вод в процессе орошения произойдёт подъём уровня грунтовых вод. Подъём уровня от начальной (hH) отметки (в ненарушенных условиях) завершится при достижении глубины стабилизации. Глубина стабилизации (h_{cm}) – это глубина, которая регулируется испарением с уровня грунтовых вод,

является почти постоянной (на ней будут скачиваться только сезонные колебания). Регулироваться этот процесс за счёт оттока и сработки инфильтрационного бугра будет степенью естественной дренированности территории (De).

Чем больше начальная глубина залегания грунтовых вод, тем больше потребуется времени (t) для достижения глубины стабилизации при заданной оросительной норме.

Интенсивность вторичного засоления пород зоны аэрации будет зависеть от начального их засоления (CH) и интенсивности солеобмена в системе порода-вода ($\bar{\alpha}$).

Изменение минерализации грунтовых вод будет зависеть от начальной их минерализации (M_n) и интенсивности солеобмена в системе порода-вода ($\bar{\alpha}$).

Итак, главными факторами, формирующими процессы в зоне аэрации и грунтовых водах под влиянием орошения, являются (Белоусова, 2001):

- а) интенсивность водоподдачи (W);
- б) начальная глубина залегания грунтовых вод (hH);
- в) глубина стабилизации грунтовых вод (или глубина, на которой произойдёт стабилизация водного режима в зоне аэрации) – h_{cm} ;
- г) степень естественной дренированности (De);
- д) время орошения (t);
- е) начальное засоление пород зоны аэрации (CH);
- ж) интенсивность солеобмена ($\bar{\alpha}$);
- з) начальная минерализация грунтовых вод (M_n).

Выбор и обоснование общей математической модели изучаемых процессов в виде критериальных уравнений и критериев подобия

Для решения первой задачи прогноза (*прогноз изменения уровня грунтовых вод*) определяющими факторами будут (Белоусова, 2001): начальная глубина УГВ – (hH), естественная дренированность (De) и интенсивность водоподдачи (W).

При решении этой задачи будем рассуждать следующим образом: на модели (участке) мы не знаем начального (фиксированного) уровня грунтовых вод, но располагаем сведениями об интенсивности его подъёма в единицу времени и знаем глубину стабилизации водного режима, выше которой на модели не происходит подъём уровня. Тогда решение первой задачи сведётся к определению времени, за которое произойдёт поднятие уровня грунтовых вод от исходного (начального) до глубины стабилизации.

Примем, что подъём уровня грунтовых вод – это заполнение свободной ёмкости породы (H_0) в объёме призмы с размерами: площадь поперечного сечения $F=1m^2$, длина ребра $hH=$ грунтовых вод. Этот подъём будет обеспечиваться за счёт

питания грунтовых вод (W) в процессе орошения (питание пропорционально водоподдаче на орошение). Регулироваться этот процесс будет степенью естественной дренированности территории (De).

Теперь составим определительное уравнение и каждому фактору присвоим свой индекс (степень):

$$t = f(H_0^x, W^y, De^z) \tag{3}$$

Запишем размерность каждого фактора (4)

$$H_0 = \mu h_H F = \mu \Delta V t F = |L|^3$$

где μ – недостаток насыщения, hH – начальная глубина залегания грунтовых вод, ΔV – интенсивность подъёма уровня в единицу времени, t – время подъёма (орошения); F – площадь ($1 m^2$),

$W = W_{eg} F = |L|^3 |T|^{-1}$ – интенсивность питания грунтовых вод;

$$De = I k m_{cp} = I k \frac{\Delta V t}{2} = |L|^2 |T|^{-1} \tag{5}$$

где $m_{cp} = m_H + \frac{h_H - h_K}{2}$ или m_{cp} берём вместо $\frac{\Delta V t}{2}$

(начальную глубину не знаем на модели, а знаем прирост уровня). I – уклон грунтового потока, K – коэффициент фильтрации, m_{cp} – определяется как сумма исходной мощности потока mH и средней величины итогового подъёма грунтовых вод.

Запишем уравнение размерности: (6)

$$T = L^{3x}, L^{3y}, T^{-y}, L^{2z}, T^{-z}$$

Решим это уравнение относительно каждой основной единицы (T и L) получим систему: (7)

$$\begin{cases} 1 = -y - z \\ 0 = 3x + 3y + 2z \end{cases}$$

Решим систему 7 и определим корни (значения):

$$\begin{aligned} y = -1 - z; & \quad 0 = 3x - 3 - 3z + 2z = 3x - z - 3 \\ 3x = z + 3; & \quad x = \frac{z + 3}{3} \end{aligned}$$

Найденные корни подставим к соответствующим определяющим факторам, т.е. если H_0 имеет степень x , то ставим значение x , найденное из решения (7), получим: (8)

$$t = f\left(H^{\frac{z+3}{3}}, W^{-1-z}, De^z\right)$$

Сгруппируем определяющие факторы по одинаковым степеням и запишем критериальное уравнение, определяющее время подъёма уровня грунтовых вод: (9)

$$t = f \left(\sqrt[3]{H_0} H_0 \frac{De^z}{W' W^z} \right) = f \left(\frac{H_0}{W} \left(\frac{De^z \sqrt[3]{H_0}}{W^z} \right) \right)$$

где $\frac{H_0}{W} = a$ – масштабный коэффициент, $\frac{De \sqrt[3]{H_0}}{W}$ – критерий подобия, суть которого в том, что время орошения подъёма уровня до стабилизированного пропорционально H_0 и De обратно пропорционально водоподаче (питания) тогда уравнение (9) запишем следующим образом: (10)

$$t = a f(\Pi)$$

Проведём согласно π–теоремы проверку решения: количество критериев подобия должно быть равно разнице между количеством определяющих факторов и числом основных единиц измерения, а, следовательно, $3-2=1$, это значит, что критериальное уравнение не противоречит второй теореме подобия.

Прогноз изменения засоления пород зоны аэрации(Белоусова, 2001)

Для решения этой задачи прогноза определяющими факторами будут:

1- \bar{v} – интенсивность промачивания, где $W = \frac{W\mu}{K} = |T|$ норма полива плюс атмосферные осадки – интенсивность водоподачи (в метрах слоя), K – коэффициент фильтрации (м/сут), μ – недостаток насыщения.

2- $\bar{\alpha}$ – интенсивность солепереноса, $\bar{\alpha} = \alpha \frac{C_H}{C_n} = |T|^{-1}$ где α – коэффициент массообмена

(сут⁻¹), в нашем случае взят коэффициент массообмена, определённый по экспериментальным данным, а когда таких характеристик нет, можно взять любую закономерность, описывающую

солеобмен в породах, обычно такие характеристики получают по результатам исследований почвоведов; C_H и C_n – начальная концентрация солей в породах зоны аэрации и концентрация (минерализация) поливной воды (г/л).

3- C_H – начальная концентрация солей в породах зоны аэрации (г/л) – $|M| |L|^{-3}$;

4- h_H – глубина залегания грунтовых вод (м) – $|L|$

5- t – время орошения (сут) – $|T|$

Запишем определённое уравнение, присвоим каждому фактору свой индекс-степень:(11)

$$\Delta C = f(\bar{v}^x, \bar{\alpha}^y, C_H^z, h_H^\gamma, t^\beta)$$

где ΔC – изменение концентрации солей в породах зоны аэрации за время (t), $\Delta C = |M| |L|^{-3}$;

Теперь запишем уравнение размерности: (12)

$$ML^{-3} = T^x, T^y, M^z L^{-3z}, L^\beta, T^\alpha, M^\gamma L^{-3\gamma};$$

$$\begin{cases} 1 = z + \gamma; \\ -3 = -3z + \beta - 3\gamma; \\ 0 = x - y + \alpha \end{cases}$$

Корни системы будут равны: $z=1; y=0; \gamma=-\beta$; подставив корни в уравнение (11), получим критериальное уравнение, определяющее прирост засоления пород за время орошения:(13)

$$\begin{aligned} \Delta C &= f(\bar{v}^{y-\beta}, \bar{\alpha}^y, C_H', h_H^0, t^\beta) = \\ &= C_H (\bar{v} \bar{\alpha})^y \left(\frac{t}{\bar{v}} \right)^\beta = C_H f(\Pi_1; \Pi_2) \end{aligned}$$

$\Pi_1 = \bar{v} \bar{\alpha}$; $\Pi_2 = \frac{t}{\bar{v}}$ критерии подобия, где C_H – масштабный коэффициент (а).

Проверим уравнение на соответствие π–теореме. Количество критериев должно быть равно $5-3=2$, что получено при решении. Суть первого критерия подобия отражает интенсивность солепереноса, второго – кратность периодов промачивания.

Прогноз изменения минерализации грунтовых вод (Белоусова, 2001)

1- \bar{v} – интенсивность промачивания – (сут) – $|T|$;

2- $\bar{\alpha}$ – интенсивность солепереноса – (сут⁻¹) – $|T|^{-1}$;

3- M_H – начальная минерализация грунтовых вод – (г/л) – $|M| |L|^{-3}$;

4- h_H – глубина залегания грунтовых вод – (м) – $|L|$;

5- t – время орошения – (сут) – $|T|$;

6- ΔC – изменение минерализации грунтовых вод за счёт выноса или привноса солей из пород зоны аэрации (г/л) – $|M| |L|^{-3}$;

Запишем определительное уравнение:(14)

$$\Delta M = f(\bar{v}^x, \bar{\alpha}^y, M_H^z, h_H^\beta, t^\alpha, \Delta C^\gamma)$$

где ΔM – изменение минерализации грунтовых вод за время t (г/л) – $|M| |L|^{-3}$;

Запишем уравнение размерности: (15)

$$ML^{-3} = T^x, T^{-y}, M^z, L^{-3z}, L^\beta, T^\alpha$$

$$\begin{cases} 1 = z \\ -3 = -3z + \beta \\ 0 = x - y + \alpha \end{cases}$$

корни системы (15) будут равны: $z=1; \beta=0; x=y-\alpha$; подставив корни в уравнение (14), получим критериальное уравнение, описывающее изменение минерализации грунтовых вод при орошении:

$$\Delta M = \bar{v}^{y-\alpha} \bar{\alpha}^y M_H^{1-y} t^\alpha \Delta C^y = M_H (\bar{v} \bar{\alpha})^y \left(\frac{t}{\bar{v}}\right)^2 \left(\frac{\Delta C}{M_H}\right)^y$$

$$= M_H f(\Pi_1; \Pi_2; \Pi_3) \quad (16)$$

$$\Pi_1 = (\bar{v} \bar{\alpha}); \quad \Pi_2 = \frac{t}{\bar{v}}; \quad \Pi_3 = \frac{\Delta C}{M_H}$$

– критерии подобия

M_H – масштабный коэффициент (а)

Проверим уравнение (16) на соответствие π -теореме. Количество критериев подобия должно равняться $6-3=3$, что и получено. Первый критерий подобия отражает интенсивность солепереноса, второй – кратность периодов промачивания за время орошения, третий – интенсивность обмена солями между породами зоны аэрации и грунтовыми водами.

Предварительная схематизация гидрогеологических условий на основе критериев подобия, установление меры подобия и выбор участков-аналогов и участков-объектов

Получив критерии подобия прогнозируемых процессов, нужно на общих моделях и региональных объектах подобрать такие участки, на которых все параметры, входящие в критерии, были бы известны. Причём значения этих параметров должны быть близкими. Такой подбор и является предварительной схематизацией гидрогеологических условий объекта и модели.

Определив значения естественной дренированности (De), свободной ёмкости пород ($H_0 = F - h_n$), проектируемой интенсивности водоподдачи (W), проектируемой интенсивности промачивания (\bar{v}), интенсивности солепереноса ($\bar{\alpha}$), начального засоления пород зоны аэрации (C_n) и начальной минерализации грунтовых вод (M_n) на участках регионального объекта, подбираем значения указанных параметров на участках общей модели так, чтобы критерии подобия, составленные из этих параметров (9; 13; 16), удовлетворяли мере подобия (Ходжибаев и др., 1976).

Мерой подобия может служить разница численных значений критериев: (17)

$$\Delta \bar{\Pi}_1 = \frac{\bar{\Pi}_1^M - \bar{\Pi}_1^0}{\bar{\Pi}_1^0}; \quad \Delta \bar{\Pi}_2 = \frac{\bar{\Pi}_2^M - \bar{\Pi}_2^0}{\bar{\Pi}_2^0}; \dots \Delta \bar{\Pi}_n = \frac{\bar{\Pi}_n^M - \bar{\Pi}_n^0}{\bar{\Pi}_n^0}$$

где $M, 0$ – индексы модели и объекта, n – число критериев. Принимаем, что мерой ошибки подобия служит величина: (18)

$$\sigma = \frac{\sqrt{(\Delta \bar{\Pi}_1)^2 + (\Delta \bar{\Pi}_2)^2 + \dots + (\Delta \bar{\Pi}_n)^2}}{n}$$

Тогда при $\sigma \leq 0,1$ – подобие абсолютное,

при $\sigma \leq 0,1-0,25$ – приближённое,

при $\sigma > 0,25$ – модель не соответствует объекту исследований.

На оросительных системах (ПЕООС) – общих моделях – выбираем участки-аналоги водно-балансовым участкам-объектам (Елизаветинскому и Совруновскому, расположенным на территории БСК-4) по характеристикам, входящим в критерии подобия. Для выбора участка-аналога Елизаветинскому водно-балансовому участку-объекту на территории ПЕООС было проанализировано 9 участков, для выбора аналога Совруновскому рассматривалось четыре участка. Предварительный выбор именно этих участков проводили на основе установления сходственности геологических и гидрогеологических условий. Определив все параметры, входящие в уравнение, определяющее время орошения, рассчитаем критерий подобия для всех. Прежде оговорим условия определения естественной дренированности (De). Согласно уравнения Дарси, имеем: (19)

$$De = I k m_{cp} = I k \left(m_H + \frac{h_H - h_{CT}}{2} \right) =$$

$$= I k m_{cp} + I k \left(\frac{h_H - h_{CT}}{2} \right)$$

Первый член уравнения отвечает дренированности в естественных, ненарушенных условиях, второй член уравнения показывает изменение дренированности под воздействием орошения при подъёме уровня грунтовых вод. При прогнозе изменения глубины залегания грунтовых вод в процессе орошения интерес будет представлять второй член уравнения, показывающий изменение дренированности в зависимости от изменения прогнозируемого процесса. Следовательно, дренированность в прогнозных расчётах будем определять по формуле:

$$De = I k \left(\frac{h_H - h_{CT}}{2} \right) \quad (20)$$

Рассчитав значения критерия подобия для всех участков общих моделей и участков-объектов, устанавливаем меру подобия по уравнению (18) и выбираем участок-аналог объекту исследований, мера подобия которых $\sigma < 0,25$.

В результате установлено, участком – аналогом для Елизаветинского участка-объекта (модели) является один участок, расположенный на территории ПЕООС. Мера ошибки подобия этих участков = 0,1 соответствует приближённому подобию, описывающему процесс подъёма уровня грунтовых вод под влиянием орошения. Для Совруновского водно-балансового участка участок-аналог не найден.

Выводы

При гидромелиоративных исследованиях в аридных районах перспективным является прогнозирование процессов орошения с использованием метода натурального подобия и размерностей. Это обусловлено тем, что на многих территориях (оросительных системах) проведены специальные гидрогеохимические исследования (достаточно затратные, объёмные) с определением параметров солепереноса и сделаны гидромелиоративные прогнозы (Белоусова, 2001, 2019, 2020 и др.) и результаты этих исследований могут быть перенесены на новые оросительные системы, путём поисков объектов – аналогов. Этот подход продемонстрирован в статье, как это было сде-

лано путём поисков на слабо изученной ПЕОСС объектов, участков – аналогов для переноса на них результатов научных исследований с хорошо изученных водно-балансовых участков – моделей (Елизаветинского и Совруновского) на территории БСК-4. Для выбора участка-аналога Елизаветинскому водно-балансовому участку-объекту на территории ПЕОСС было проанализировано 9 участков, отобран только один, для выбора аналога Совруновскому рассматривалось четыре участка, аналог не найден. Как видно из результатов решения прогнозных задач, метод натурального подобия достаточно точный, математически выверенный, что обусловлено локальностью возможного его применения. ❶

Литература

1. Белоусова А.П. Использование параметров солепереноса в прогнозных решениях// Аридные экосистемы. 2020, Т 26, № 4 (85), С. 102 – 107. DOI:10.24411/1993-3916-2020-10124
2. Белоусова А.П. 2019. Экспериментальные исследования на оросительных системах//Аридные экосистемы. Т. 25, № 1 (78), С. 33-44. DOI:10.24411/199 –3916 – 2019 – 00042.
3. Белоусова А. П. 2001. Качество подземных вод. Современные подходы к оценке. М.: Наука, 339 с.
4. Белоусова А. П., Гавич И. К. 1985. Примеры гидрогеохимических прогнозов методом натурального подобия в области мелиорации // Моделирование гидрогеохимических процессов и научные основы гидрогеохимических прогнозов. М.: Наука.С. 131 - 142.
5. Веников В. А. 1966. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. М.: Высшая школа, 487 с.
6. Гавич И. К. 1980. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 354 с.
7. Гиляров Н. П.1973. Моделирование речных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 198 с.
8. Гухман А. А. 1979. Применение теории подобия к исследованию процессов теплообмена. М.: Высшая школа, 213 с.
9. Леви И. И. 1960. Моделирование гидравлических явлений. М., Госэнергоиздат, 210 с.
10. Розовский Л. Б. 1969. Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М.: Недра, 125 с.
11. Седов Л. И. 1951. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 193 с.
12. Ходжибаев Н. Н., Самойленко В. Г.1976. Гидромелиоративные прогнозы. Ташкент: ФАН, 358 с.

UDC 504.43

A.P. Belousova, Doctor of Sciences, Professor, Chief Researcher of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences
FGBUN Institute of Water Problems RAS, anabel@iwp.ru

USE OF THE NATURAL SIMILARITY METHOD IN HYDROGEOLOGICAL FORECASTS ON RECLAIM OBJECTS

Abstract: The article deals with the theoretical foundations of the method of natural similarity and the possibility of its use in hydro-reclamation studies and forecasts. The objectives of the irrigation and reclamation forecast for water-balance areas were: a preliminary assessment of the rise in the level of groundwater under the influence of planned irrigation, an assessment of changes in the salinity of rocks in the aeration zone during irrigation, an assessment of changes in the chemical composition and salinity of groundwater. The forecasts were implemented for the Pravo-Egorlyk Irrigation System (PEIS) – an object using data from detailed studies on the territory of the Great Stavropol Canal (GSC-4) – a full-scale model. An approach to the selection of sites – analogues on a poorly studied PEIS – an object for transferring the results of scientific research to them from well-studied water-balance areas – models (Elizavetinskoye and Sovrunovskoye) on the territory of GSC-4is considered. To select a site-analogue for the Elizaveta water-balance site-object on the territory of the NEEP, 9 sites were analyzed, only one was selected, four sites were considered for the selection of an analogue to Sovrunovskoye and no analogue was found.

Keywords: natural similarity and dimensions, natural model, object, analogue, similarity criteria, groundwater, salinization, aeration zone, hydro-reclamation forecast.