

**Оснoвы
прогнозов
естественного
режима
подземных вод**

Институт водных проблем Академии наук СССР

В. С. Ковалевский

**ОСНОВЫ
ПРОГНОЗОВ
ЕСТЕСТВЕННОГО
РЕЖИМА
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**



МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1974

Гос. публичная
научно-техническая
библиотека СССР
ЭКСПЕМПЛЯР
ЧИТАЛЬНОГО ЗАЛА

Д4

19260

74-5846

Ковалевский В. С. Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М., Стройиздат, 1974, 204 с. (Ин-т водных проблем Акад. наук СССР).

В монографии обобщены результаты работ автора и других исследователей по вопросу прогнозов режима подземных вод, рассмотрены назначение и типы прогнозов режима подземных вод, существующие методы прогнозов, физические основы формирования режима подземных вод, а также методы прогнозов минимальных, максимальных и среднегодовых уровней подземных вод как для текущего года, так и на ряд лет вперед. Основное внимание уделено вероятностно-статистическим методам прогнозов, основанным на корреляционных связях режима подземных вод с определяющими его метеорологическими и геллюгеофизическими факторами. Рассматриваются также методы картирования прогнозов режима подземных вод, оценки достоверности прогнозов и некоторые рекомендации по составлению прогнозов режима подземных вод и их практическому применению.

Монография рассчитана на широкий круг гидрогеологов (и в первую очередь работников гидрогеологических станций и партий), мелнораторов, строителей и инженеров-геологов.

Табл. 19, рис. 65, список лит.: 122 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прогнозы режима подземных вод и, в частности, естественного режима имеют большое практическое значение при решении следующих вопросов: планирование, проектирование и эксплуатация различных инженерных сооружений и мелиоративных систем; планирование севооборотов сельскохозяйственных культур; разработка мероприятий по охране подземных вод от истощения и загрязнения; планирование рационального использования пресных подземных вод (наиболее ценной части всех водных ресурсов); составление гидрогеологических прогнозов для оценок возможных водопритоков в горные выработки и защитные дренажные сооружения и др.

Использование прогнозов режима подземных вод, так же как и прогнозов в гидрологии и метеорологии, будет значительно возрастать по мере повышения точности прогнозов (особенно многолетних) и усовершенствования методов экстраполяции результатов прогнозов по площади. Первоочередной научной задачей в данной области наряду с развитием теоретических основ и методов прогнозов режима подземных вод является разработка путей практического использования результатов прогнозов режима подземных вод.

Наибольшее практическое значение имеет составление прогнозов естественного режима уровней грунтовых вод, так как последние вследствие их неглубокого залегания и тесной связи с гидрометеорологическими факторами являются наиболее изменчивыми во времени. Недоучет возможных внутригодовых и многолетних колебаний мощностей потока подземных вод, измеряемых иногда многими метрами, может привести к существенным ошибкам при расчетах естественных и эксплуатационных ресурсов подземных вод, при оценках величин подземного стока и его роли в общем водном балансе территорий, при проектировании дренажных сооружений и т. п.

В других случаях практически важно установить возможные глубины залегания грунтовых вод. При этом существенными становятся даже небольшие (от нескольких сантиметров до 1—2 м) колебания уровней грунтовых вод, так как они могут привести к подтоплению сельскохозяйственных и городских территорий, вызвать резкое снижение урожайности сельскохозяйственных культур, затопление подвалов, засоление или заболачивание земель.

В настоящей работе показаны возможности составления прогнозов режима подземных вод в различных гидрогеологических и климатических условиях территории СССР, рассмотрены гидрогеологические предпосылки, позволяющие реально прогнозировать режим подземных вод, определена роль различных факторов в формировании режима подземных вод и необходимость их учета при прогнозах, а также рассмотрены некоторые

аспекты практического применения прогнозов режима подземных вод.

Несмотря на то, что в работе основное внимание уделяется методам составления прогнозов неглубоко залегающих грунтовых вод как наиболее сложным, требующим учета большого числа факторов, следует отметить, что аналогичные методы могут быть применены и для прогнозов режима межпластовых безнапорных и напорных вод, где как сезонные, так и многолетние колебания выражаются значительно меньшими амплитудами, и в сглаженном виде со сдвигом во времени повторяют колебания уровней грунтовых вод.

Освоенность рассмотренных в книге различных категорий прогнозов далеко не одинакова. Наряду с достаточно апробированными для различных природных условий методами сезонных прогнозов, обеспечивающими, как правило, необходимую для практических целей точность прогнозов, рассмотрены также некоторые принципиально возможные методы составления многолетних долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов режима подземных вод, требующие еще дальнейшего совершенствования.

При выполнении работы использовались материалы гидрогеологических режимных партий (ранее гидрогеологических станций) Министерства геологии СССР, Шемиловского стационара ВСЕГИНГЕО и Центральной партии прогнозов Гидрорежимной экспедиции Министерства геологии РСФСР. За предоставление этих материалов автор приносит глубокую благодарность работникам этих организаций. Автор также выражает свою признательность А. А. Коноплянцеву, Д. М. Кацу, Б. И. Куделину, М. Р. Никитину и другим товарищам, принимавшим участие в обсуждении работы, за высказанные ценные замечания и пожелания, а также Л. А. Донец, Н. Г. Максимовой, Т. В. Свириной, Т. В. Пудовой и Г. А. Шелониной, помогавшим автору в сборе и анализе фактических материалов.

ТИПЫ И ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГНОЗОВ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Под прогнозами режима подземных вод понимается научно обоснованное предсказание возможных количественных и качественных изменений во времени и пространстве различных элементов режима подземных вод или их характерных параметров. При этом под элементами режима подземных вод понимаются основные фиксируемые регулярными наблюдениями изменяющиеся во времени характеристики подземных вод: их уровни (напоры), общая минерализация и химический состав, температура и другие физические свойства, дебиты источников или скважин, расходы подземного стока.

Под параметрами режима подземных вод понимаются характерные конкретные значения (экстремальные или средние) элементов режима подземных вод, например, минимальные предвесенние и максимальные весенние уровни, содержание отдельных компонентов химического состава (сухой остаток, жесткость, агрессивность и т. п.).

Возможные категории или типы прогнозов целесообразно определять в зависимости от их заблаговременности и практического назначения, учитывая при этом не только характер предсказываемых изменений (уровней, дебитов, химического состава, температуры подземных вод и др.), но и степень достоверности прогнозов, их масштабность, сферу применения и т. п.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗОВ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Разделение прогнозов режима подземных вод может быть произведено по различным признакам, каждый из которых может рассматриваться самостоятельно и в совокупности с другими критериями, дополняющими друг друга.

В частности, в основу типизации гидрогеологических прогнозов могут быть положены следующие показатели: 1) характер и происхождение (генезис) прогнозируемых изменений; 2) заблаговременность прогнозов; 3) назначение прогнозов; 4) степень достоверности прогнозов; 5) масштабы прогнозируемых явлений; 6) состав прогнозируемых элементов и параметров режима подземных вод.

Рассмотрим кратко перечисленные выше показатели.

По характеру и генезису изменений, происходящих в подземных водах, можно выделить вслед за А. А. Коноплянцевым [56] три группы прогнозов режима подземных вод, требующих различных методов их составления:

1) прогнозы естественного, не нарушенного хозяйственной деятельностью человека режима подземных вод, когда искусственные изменения либо вообще отсутствуют, либо несоизмеримо малы по абсолютным величинам или по продолжительности их проявления во времени по сравнению с естественными изменениями (например, кратковременный водоотбор из одиночных скважин);

2) прогнозы слабонарушенного режима подземных вод, формирующегося под влиянием одновременного воздействия соизмеримых по эффекту изменений, вызванных как хозяйственной или инженерной деятельностью человека, так и естественными природными факторами;

3) прогнозы сильно нарушенного режима подземных вод в условиях, когда искусственные воздействия несоизмеримо больше естественных изменений и подавляют последние.

В отличие от первой и третьей групп, где для прогнозов могут быть учтены соответственно только естественные и искусственные факторы, во второй группе прогнозы режима подземных вод должны составляться отдельно для двух составляющих, обусловленных естественными и искусственными изменениями. Результирующий прогноз при этом является суммарной характеристикой прогнозов обеих составляющих, полученной методом сложения течений. Некоторые примеры возможного практического применения перечисленных групп прогнозов, основных прогнозируемых элементов режима подземных вод и методов, применяемых для составления таких прогнозов, приведены в табл. 1.

Наиболее интенсивными во времени являются, безусловно, изменения, связанные с хозяйственной деятельностью человека. Так, например, интенсивный водоотбор подземных вод приводит к резкому снижению их уровней, изменению качества воды вследствие подтягивания соленых или загрязненных вод из водоемов или других водоносных горизонтов, к истощению запасов подземных вод в районе их эксплуатации и другим нежелательным последствиям. Поэтому очень важно своевременно предвидеть момент истощения запасов подземных вод, определить время подтягивания соленых вод к водозабору и время осушения фильтров эксплуатационных скважин, охарактеризовать темпы подъема уровней грунтовых вод и засоления пород зоны аэрации на орошаемых массивах, приводящие к резкому снижению урожайности сельскохозяйственных культур, а также определить скорости развития подпора грунтовых вод в результате создания водохранилищ, приводящего к подтоплению и заболачиванию сельскохозяйственных угодий, лесных массивов и населенных пунктов.

Методы составления прогнозов нарушенного режима подземных вод сравнительно хорошо разработаны и могут обеспечивать высокую степень точности выдаваемых прогнозов. Это объ-

Группы прогнозов режима	Целевое назначение прогнозов	Основные прогнозируемые элементы	Основные методы прогноза
1. Естественного	1) составление прогнозов речного стока; 2) планирование эксплуатации подземных вод; 3) планирование севооборота сельскохозяйственных культур; 4) планирование противопожарных мероприятий; 5) планирование проведения строительных и опытных гидрогеологических работ	1) минимальные и максимальные годовые уровни текущего и последующих лет; 2) среднегодовые уровни текущего и последующих лет; 3) уровни на определенные даты или периоды; 4) минимальные и максимальные величины подземного стока; 5) минимальные и максимальные годовые температуры и химический состав подземных вод	1) вероятностно-статистические; 2) гидродинамические: а) аналитические; б) конечно-разностные; 3) балансовые 4) гидрогеологической аналогии
2. Слабонарушенного	1) прогнозы уровней грунтовых вод при их эксплуатации инфильтрационными водозаборами (в условиях обеспеченного восполнения запасов грунтовых вод из реки); 2) составление прогнозов подтопления городских территорий; 3) разработка мелиоративных мероприятий (осушительных и обводнительных);	1) максимальные и минимальные уровни в пределах года и в последующие годы; 2) среднегодовые уровни текущего и последующих лет; 3) качество воды;	1) вероятностно-статистические; 2) гидродинамические: а) аналитические, б) конечно-разностные; 3) моделирование;

Группы прогнозов режима	Целевое назначение прогнозов	Основные прогнозируемые элементы	Основные методы прогноза
	4) оценка подтопления территорий в результате подпора подземных вод водохранилищами (на удаленных от их берегов территориях); 5) составление прогнозов водоприготов в горные выработки	4) амплитуды колебаний уровней (размеры питания грунтовых вод); 5) баланс солей в зоне аэрации	4) балансовые
3. Сильно нарушенного	1) прогнозы режима подземных вод под влиянием их интенсивной эксплуатации, закачек газа, производственных стоков и т. п.; 2) прогнозы развития подпора подземных вод под влиянием водохранилищ; 3) оценка фильтрационных потерь из каналов; 4) прогнозы режима грунтовых вод в районах мелнорации земель	1) минимальные уровни по годам (на конец каждого года) при их снижении; 2) максимальные уровни по годам при их повышении; 3) время подтягивания соленых вод к водозаборам и их концентрации; 4) время достижения критических уровней и концентрации солей в зоне аэрации при орошении; 5) время подтопления или заболачивания хозяйственно важных территорий; 6) объем фильтрационных потерь из водохранилищ и каналов в берега долин, в соседние долины или в обход плотин	1) гидродинамические; 2) гидравлические; 3) балансовые; 4) моделирование

ясняется тем, что доминирующим фактором, определяющим прогнозируемые изменения, является хозяйственная деятельность человека (водоотбор, водоподача, или нормы полива, подпор подземных вод водохранилищами, закачка производственных стоков, газа и т. д.). Прогноз в этих случаях строится на функциональных связях и осуществляется аналитическим путем (по существу, при одном неизвестном), если имеется возможность с достаточной для практики точностью аппроксимировать природные условия определенной расчетной схемой. В сложных гидрогеологических условиях такой прогноз осуществляется моделированием. При этом естественное восполнение запасов подземных вод, неравномерность его в многолетнем разрезе и его изменения во времени (как в естественных, так и в нарушенных условиях) не учитываются и идут в «запас прочности» расчетов. Подобная практика приводит к значительному занижению эксплуатационных запасов подземных вод и напрасному расходованию средств на изыскания дополнительных источников водоснабжения, когда можно было бы удовлетвориться уже существующими.

В большинстве случаев прогнозы нарушенного режима подземных вод должны отражать суммарный прогноз как нарушенного, так и естественного режима.

Отмечая важность и необходимость составления прогнозов сильно нарушенного режима подземных вод, нельзя не отметить, что распространение такого режима (в процентах к площади СССР) еще весьма ограничено и что подавляющая часть территории СССР характеризуется либо естественным режимом подземных вод, либо естественным и слабонарушенным в соизмеримых пропорциях. Кроме того, характер нарушенного режима подземных вод во многом зависит от фильтрационных свойств водовмещающих пород участка и особенностей хозяйственной деятельности в данном районе, поэтому такие прогнозы имеют в известном смысле локальный характер.

Прогнозы естественного режима подземных вод не только являются составной частью прогнозов нарушенного режима, но и имеют большое самостоятельное значение, о чем более подробно будет сказано далее. Это обязывает обратить особое внимание на разработку методов составления прогнозов естественного режима.

По заблаговременности составления можно выделить следующие типы прогнозов: экстренные, краткосрочные, долгосрочные сезонные, долгосрочные многолетние, сверхдолгосрочные перспективные. Помимо перечисленных типов прогнозов режима подземных вод, которые могут быть отнесены к разряду временных или календарных прогнозов, следует выделить еще невременные (бессрочные) вероятностные прогнозы, оценивающие с заданной степенью обеспеченности возможные изменения в режиме подземных вод без указания конкретного срока их наступления.

Само понятие заблаговременности гидрогеологических прогнозов является еще не установившимся. Так, А. А. Коноплянец [56, 58] считает, что по сравнению с гидрологическими прогнозами все гидрогеологические прогнозы могут рассматриваться как долгосрочные и сверхдолгосрочные. В. А. Коробейников [66] выделяет краткосрочные, долгосрочные и сверхдолгосрочные прогнозы.

Нет сопоставимости в представлениях о заблаговременности прогнозов основных режимообразующих факторов, используемых для составления прогнозов режима подземных вод. Так, метеорологи выделяют краткосрочные (суточные и трехдневные), долгосрочные (декадные, месячные и сезонные) и сверхдолгосрочные (свыше одного года) прогнозы. Гидрологи СССР [86] выделяют краткосрочные — до 15 дней и долгосрочные — свыше 15 дней прогнозы, а Польши — краткосрочные — до месяца и долгосрочные — до года. Гелиофизики [14] разделяют прогнозы на краткосрочные (до нескольких дней), долгосрочные (в пределах солнечного цикла) и сверхдолгосрочные (на несколько солнечных циклов).

С учетом специфики подземных вод и прежде всего повышенной их инерционности по сравнению с атмосферой и поверхност-

Таблица 2

Типы прогнозов	Заблаговременность	Оправданность прогнозов в %	Цель прогнозов
Экстренные	1—15 суток	≥ 95	Предупреждение об опасных явлениях (возможности оползней, затопления подвалов, катастрофических водопритоках в горные выработки и т. п.) для принятия срочных контрмер
Краткосрочные	0,5—1,5 месяца	$\geq 85—95$	Уточнение долгосрочных сезонных прогнозов и их использование при планировании
Сезонные (внутригодовые)	1,5—12 месяцев	$\geq 70—85$	Планирование севооборотов, эксплуатации подземных вод, водопритоков в горные выработки и т. д.
Долгосрочные (трехлетние)	1—3 года	$\geq 60—70$	Учет прогнозов при проектировании
Сверх- или ультрадолгосрочные (многолетние)	Многолетние (свыше 3 лет)	≥ 55	Перспективное прогнозирование наступления лет с высокими (максимальными) и низкими (минимальными) уровнями для перспективного планирования водохозяйственных мероприятий при составлении генеральных схем комплексного использования водных ресурсов и т. п.

ной гидросферой для определения заблаговременности выделенных типов прогнозов режима подземных вод в соответствии с их достоверностью и назначением нами составлена табл. 2.

Выделение типов прогнозов по заблаговременности во многом определяется возможностями их составления с достаточной достоверностью. Так, экстренные прогнозы необходимы прежде всего в областях питания или разгрузки водоносных горизонтов, где воздействие основных режимобразующих факторов проявляется очень быстро и достигает максимального эффекта. Кроме того, составление таких прогнозов возможно лишь тогда, когда эти факторы уже проявились (например, прошли редкие по интенсивности ливни или паводки в реках). Заблаговременность прогнозов режима подземных вод в таких случаях зависит в основном от степени инерционности водоносного горизонта, которая, как показывает практика, изменяется (относительно воздействия атмосферных осадков за счет их инфильтрации через зону аэрации) чаще всего от суток (и даже нескольких часов) до 10—15 дней. Возможность полного учета масштаба воздействий режимобразующих факторов позволяет добиться высокой достоверности прогнозов.

Для составления краткосрочных прогнозов также имеется возможность довольно полного учета основных режимобразующих факторов. Это прежде всего относится к участкам с зарегулированным режимом подземных вод, где сдвиг во времени воздействий режимобразующих факторов составляет более двух недель. Кроме того, для таких прогнозов, помимо реально наблюдавшихся факторов, могут быть учтены прогнозные значения многих гелиогеофизических и гидрометеорологических факторов, прогнозы которых обычно составляются с заблаговременностью до одного месяца. Учитывая месячную заблаговременность последних прогнозов, а также усредненную 15-дневную инерционность водоносных горизонтов, можно определить максимальную заблаговременность краткосрочных прогнозов в 1,5 месяца.

Заблаговременность внутригодовых или сезонных прогнозов определяется наличием довольно высоких корреляционных зависимостей последующих уровней подземных вод от предыдущих, отдаленных иногда до нескольких месяцев, и возможностью частичного учета метеорологической обстановки текущего года в формировании прежде всего максимальных весенних, минимальных осенних и среднегодовых уровней. Достоверные прогнозы на этой основе, как будет показано ниже, могут быть составлены с заблаговременностью от 1,5 до 12 месяцев.

При составлении многолетних прогнозов метеорологическая обстановка текущего года может уже во внимание не приниматься, так как практически на режим подземных вод последующих лет она активного воздействия не имеет. Основные методы прогнозов режима подземных вод с заблаговременностью

свыше года базируются либо на связях режима подземных вод с гелиогеофизическими факторами, либо на закономерностях многолетних колебаний, вскрытых за предыдущий период, и их экстраполяции в будущее. Точность всех этих методов все еще невысока и обычно снижается с увеличением заблаговременности прогнозов (о чем будет более подробно сказано далее).

Сравнительно достоверными могут быть прогнозы с заблаговременностью до двух-трех лет, которые мы и относим к долгосрочным трехлетним. При большей заблаговременности прогнозы режима могут достоверно характеризовать лишь общую направленность возможных изменений в режиме подземных вод и их знак [подъем или спад уровней, примерное положение максимальных и минимальных за многолетие уровней, предположительное время (год) возможных максимальных и минимальных уровней]. Такие сверх- или ультрадолгосрочные прогнозы также имеют практическое значение при составлении перспективных планов и генеральных схем освоения территорий, использования их водных ресурсов или борьбы с подземными водами. Заблаговременность сверхдолгосрочных (перспективных) прогнозов может достигать двух-трех десятилетий.

Таким образом, под каждым из выделенных типов прогнозов режима подземных вод подразумевается не только заблаговременность его составления, но и объем возможной информации, которая может быть учтена при прогнозе, а следовательно, и возможная точность выдаваемых прогнозов и возможная область их практического применения. Прогнозы разных типов не могут иметь одинаковую достоверность, и поэтому по степени достоверности их можно разделить на пять категорий или видов (табл. 3).

Таблица 3

Вид прогноза	Оправдываемость прогнозов в %
Высокодостоверные	> 95
Достоверные	85—95
Удовлетворительной достоверности	70—85
Приближенные (предварительные)	60—70
Весьма приближенные (вероятные)	> 55

Характеристика видов прогнозов может быть детализирована не только по их достоверности, но и по другим критериям точности прогнозов (S/σ ; μ и др.), о которых будет сказано далее в главе VIII.

Выделенные нами градации по заблаговременности прогнозов и тем более по их достоверности являются, несомненно, условными, так как во многом зависят от наших знаний и существ-

вующих на сегодня методов прогнозов как режима подземных вод, так и режимообразующих факторов.

Дальнейшее развитие и усовершенствование методов прогнозов, повышение их достоверности может привести к коренному видоизменению предложенной схемы.

Достоверность вероятностных невременных прогнозов зависит от длины ряда наблюдений и многолетней изменчивости прогнозируемого параметра режима подземных вод (см. далее главу VIII).

По масштабам прогнозируемых явлений прогнозы могут быть подразделены на две группы точечные и площадные. При этом последние в свою очередь подразделяются на локальные, региональные и глобальные.

Точечные прогнозы обеспечивают предсказание изменений уровней, температур, химического состава или расхода (дебита) подземных вод по одной скважине, источнику или водомерному посту. Они могут выражаться как в абсолютных величинах прогнозируемых элементов или параметров режима подземных вод, так и в относительных коэффициентах, процентах отклонений от среднеголетних норм и т. п.

Локальные прогнозы составляются для ограниченных территорий с достаточно хорошо изученным режимом подземных вод по разветвленной наблюдательной сети, характеризующей все основные виды и разновидности режима подземных вод или подземного стока, наблюдающиеся на данной территории.

Площадная характеристика прогнозов при этом может быть получена либо путем экстраполяции точечных прогнозов по территории, характеризваемой определенным видом и разновидностью режима, либо путем расчетов обобщенных площадных прогнозных характеристик режима подземных вод или подземного стока, относимого к определенной площади водосборного бассейна, т. е. модуля стока. Выражаются такие прогнозы в абсолютных значениях прогнозируемых элементов или параметров режима подземных вод, так как относительные изменения в режиме подземных вод конкретного года по сравнению со среднеголевыми значениями этих элементов или параметров в пределах локальных площадей изменяются, как правило, несущественно.

Региональные прогнозы составляются для больших территорий (областей, республик или страны в целом) и выражаются лишь в относительных величинах и обобщенных градациях изменений прогнозируемых элементов или параметров режима подземных вод, полученных усреднением наиболее репрезентативных точечных прогнозов.

Глобальные прогнозы составляются для отражения изменений в режиме подземных вод крупных природных регионов, континентов и всего земного шара в целом.

Таким образом, площадные прогнозы отражают прогнозы и во времени, и в пространстве. Точечные и локальные прогнозы могут использоваться для конкретного планирования и проектирования хозяйственных мероприятий, а региональные и глобальные вследствие их обобщенности могут служить лишь предупреждением о необходимости более детального учета тех или иных предполагаемых изменений в режиме подземных вод. В связи с этим точечные и локальные прогнозы целесообразно давать с различной заблаговременностью (от экстренных до сверхдолгосрочных перспективных), а региональные и глобальные — лишь с наиболее высокой заблаговременностью (не ниже внутригодовых сезонных прогнозов).

По составу прогнозов можно выделить две основные их разновидности: однопараметрические прогнозы и комплексные, или полипараметрические, прогнозы. Наиболее распространены пока однопараметрические прогнозы. Так, в зависимости от целевого назначения могут составляться прогнозы следующих параметров режима подземных вод, представляющих наибольший практический интерес.

1. Минимальных предвесенних уровней подземных вод или дебитов источников (для провинции с устойчивым зимним промерзанием зоны аэрации).

2. Максимальных весенних уровней или дебитов подземных вод (для той же провинции).

3. Максимальных осенних уровней или дебитов подземных вод [для северных районов европейской территории СССР (ЕТС), Восточной Сибири и Дальнего Востока].

4. Максимальных зимне-весенних уровней или дебитов подземных вод (в основном для южных районов страны со спорадическим промерзанием или отсутствием промерзания зоны аэрации).

5. Минимальных летних или летне-осенних уровней (дебитов).

6. Среднегодовых уровней (дебитов) текущего года.

7. Среднегодовых уровней (дебитов) следующего года или на ряд лет вперед.

8. Периодов наступления многолетних максимальных и минимальных уровней (дебитов) в предстоящем десятилетии или в течение нескольких десятилетий вперед.

9. Уровней грунтовых вод на определенные (по согласованию с агрономами и агрометриаторами) периоды вегетации сельскохозяйственных культур.

10. Максимальной и минимальной температур подземных вод и времени (декады или месяца) их наступления.

11. Минерализации грунтовых вод в периоды максимального или минимального положения их уровня, а также на определенные периоды вегетации сельскохозяйственных культур.

12. Концентрации отдельных ионов или компонентов хими-

ческого состава подземных вод (хлора, сульфатов, агрессивности, фенолов, бактериологического загрязнения и др.).

13. Амплитуд колебаний уровней (дебитов) подземных вод за периоды их сезонного питания и за многолетие.

14. Минимальных и максимальных величин подземного стока как наиболее гарантированной части питания рек (в годовом и многолетнем разрезе).

15. Максимально возможных водопритоков в горные выработки или дренажные сооружения.

16. Сроков (конкретных дат) возможного наступления экстремальных значений различных параметров режима.

К числу комплексных прогнозов могут быть отнесены следующие.

1. Прогнозы водного и солевого баланса подземных вод с подразделением расходных и приходных статей.

2. Прогнозы химического состава подземных вод, включая как общую минерализацию вод, так и концентрацию отдельных наиболее важных компонентов.

3. Одновременные прогнозы уровней и химического состава подземных вод, а также прогнозы различных комбинаций из перечисленных выше однопараметрических прогнозов.

Большая часть из перечисленных выше прогнозируемых элементов режима подземных вод относится к прогнозам общего пользования. И лишь некоторые из них (например, прогнозы температур и минерализации подземных вод или прогнозы уровней грунтовых вод на конкретные даты или периоды вегетации сельскохозяйственных культур) могут рассматриваться как специализированные прогнозы, предназначенные для отдельных отраслей народного хозяйства. Возможности практического использования прогнозов режима подземных вод зависят от ряда факторов: заблаговременности прогнозов, их масштабности и точности, состава прогнозов и генезиса прогнозируемого процесса. Таким образом, выделенные и имеющие право на самостоятельное существование категории прогнозов иногда в какой-то мере, а иногда и прямо связаны между собой. При этом данная взаимосвязь не является однозначной, так как принятые критерии охватывают различные понятия.

В настоящей работе рассматриваются главным образом прогнозы естественного режима подземных вод и частично прогнозы слабо нарушенного режима, когда доля воздействия искусственных факторов еще не велика и может не учитываться.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГНОЗОВ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Как видно из предыдущего изложения, прогнозы режима подземных вод могут быть использованы в различных областях хозяйственной деятельности человека. В связи с этим целесообразно

но рассмотреть некоторые примеры возможного (наиболее широкого) использования прогнозов естественного режима подземных вод.

Использование прогнозов режима подземных вод для целей строительства. Изучение и анализ режима подземных вод являются одним из основных элементов общего комплекса гидрогеологических исследований, проводящихся для любого вида строительства: промышленного, гражданского, гидротехнического, дорожного и т. п. Основное внимание при этом уделяется оценке возможного подтопления и заболачивания территорий строительства, водопритоков в строительные котлованы или дренажные сооружения, химического воздействия подземных вод на сооружения и т. п. Такая оценка может выполняться либо в виде временного прогноза, например с указанием конкретных сроков высоких подъемов уровней грунтовых вод, которые приведут к подтоплению территорий, либо в виде вероятностного прогноза, показывающего возможные колебания уровней грунтовых вод без указания времени наступления таких периодов.

Как известно, ряд городов страны, построенных на заболоченных территориях (например, Ленинград, Тюмень и др.), периодически страдает в отдельных своих районах от затопления подвальных помещений грунтовыми водами. В связи с этим прогноз максимально возможных уровней грунтовых вод в весенний и осенний периоды года может позволить, с одной стороны, запланировать необходимые мероприятия по предотвращению затопления подвалов или по борьбе с затоплением и его последствиями, а с другой стороны, выявить, какую роль в затоплении подвалов играют грунтовые воды с естественным режимом, а какую искусственные факторы: утечки из водопроводов и канализации, производственные стоки, подпор грунтовых вод в результате строительства набережных, сооружений с глубоким заложением фундамента, препятствующих подземному стоку, и др.

Изучение режима грунтовых вод и его временные прогнозы могут потребоваться для планирования и выбора времени проведения строительных и осушительных работ, при разработке котлованов, при строительстве дорог, а также для выбора времени проведения опытных гидрогеологических работ, связанных с определением гидрогеологических параметров и возможных водопритоков в защитные дренажные сооружения.

Значительно большее применение в практике строительных работ должны найти невременные, вероятностные прогнозы и их экстраполяция по площади. Широкий фронт строительных работ и ограниченность сроков от их планирования до завершения строительства предопределяют невозможность изучения режима подземных вод на каждом объекте строительства или проведения длительных наблюдений за режимом подземных вод даже на наиболее ответственных объектах строительства.

В большинстве случаев при проведении строительных работ положение уровней грунтовых вод оценивается либо на основании разовых их замеров в процессе бурения скважин без учета не только многолетних, но и годовых их колебаний, либо на основании кратковременных (в течение нескольких месяцев) наблюдений. В результате нередко случался, когда подобный недоучет особенностей режима подземных вод приводил к периодическому затопливанию подвалов, котлованов и карьеров, заболачиванию территорий строительства, образованию оползней, заплыванию выемок, коррозии металлических конструкций, разрушению бетонных оснований и т. п.

Для правильного учета закономерностей режима подземных вод на территории строительства необходимо использовать прогнозы возможных колебаний уровней подземных вод, основанные на статистическом анализе наблюдений по скважинам-аналогам, расположенным в гидрогеологических условиях, аналогичных наблюдаемым на участке строительства. Основной задачей в таких случаях является получение многолетних характеристик колебаний уровней грунтовых вод с заданной обеспеченностью, приведение коротких рядов наблюдений к длинным, отыскание путей сравнения разнородных материалов наблюдений и оценки их репрезентативности в многолетнем разрезе. Указанные вопросы более подробно рассмотрены далее в главе VII.

Использование прогнозов режима подземных вод при составлении гидрологических и гидрогеологических прогнозов в приречных зонах может быть наиболее эффективным прежде всего при оценках меженных расходов рек.

Прогнозы меженного речного стока широко используются при решении вопросов судоходства и лесосплава, при планировании использования гидроэнергетических ресурсов, при водохозяйственных расчетах и оценке возможного количества речных вод, необходимых для технического и питьевого водоснабжения, мелиорации земель, а также для определения минимального «санитарного» стока рек, обеспечивающего разбавление неизбежного загрязнения речных вод, и т. п.

Меженный, или минимальный, сток рек как в предвесенний, так и в летне-осенний периоды обеспечивается в основном за счет разгрузки подземных вод [71]. В связи с этим между минимальными уровнями грунтовых вод и соответствующими уровнями или расходами воды в реке должна быть и очень часто устанавливается довольно тесная корреляционная связь [20, 47, 108, 109 и др.].

При этом прогноз минимального речного стока можно производить двумя путями.

1. Выявить связь между минимальными уровнями воды в скважинах и минимальными расходами воды в реке. Например, связь между февральскими или мартовскими среднемесячными уровнями воды в скважинах и среднемесячными расходами

рек за те же месяцы (для прогноза предвесенних минимальных расходов) или между сентябрьскими среднемесячными уровнями воды в скважинах и такими же расходами реки (для прогноза летне-осенних минимальных расходов). После этого, определив прогнозное положение минимальных уровней грунтовых вод в скважинах одним из методов, о которых будет сказано далее, можно, используя установленные связи, составить прогноз минимальных расходов рек.

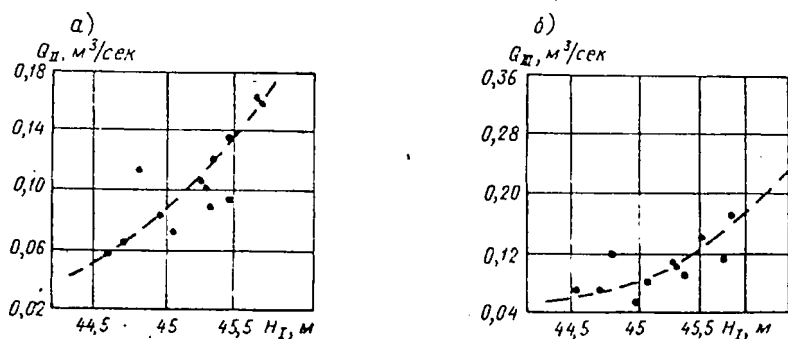


Рис. 1. Графики зависимости среднемесячных расходов Q_{II} и Q_{III} р. Купавенки за февраль (а) и март (б) от среднемесячного январского уровня грунтовых вод H_I в скважине 18 (Щемпилово)

2. Установить прямые связи между максимальными осенними или максимальными весенними уровнями воды в скважинах соответственно с минимальными предвесенними и минимальными летне-осенними расходами рек.

Некоторые примеры, подтверждающие существование указанных выше связей между режимом поверхностных и подземных вод, даны на рис. 1.

Наиболее тесными указанные связи получаются для бассейнов малых рек, где речной сток целиком формируется за счет подземных вод площади водосбора этих рек. Для больших транзитных рек такой прогноз также возможен, но он становится уже более сложным — интегрированным по участкам.

Связи между уровнями воды в скважинах и расходами или уровнями воды в реках могут устанавливаться в различных комбинациях, в зависимости от наличия фактического материала и практической необходимости прогноза. Например, зависимость предвесеннего абсолютного минимального расхода реки от уровня воды в опорной скважине на 1 января текущего года или какую-либо другую дату в период независимого спада уровня и т. д.

Таким образом, используя результаты наблюдений за режимом подземных вод и данные о его прогнозе, можно с заблаго-

временностью до трех-четырех месяцев прогнозировать минимальные расходы или уровни воды в реках.

Планирование эксплуатации и притоков подземных вод. Источниками водоснабжения многих крупных населенных пунктов и в том числе таких городов, как Баку, Симферополь, Ялта, Ереван и др., а также орошения значительных площадей в Армении, Киргизии и других республиках Средней Азии и Закавказья служат родники, дебиты которых подвержены существенным сезонным изменениям. Водозаборы некоторых крупных городов, расположенные в небольших по размеру долинах рек (например, северо-донецкие и уральские), а также некоторые водозаборы в Киргизии и Грузии имеют сезонное восполнение в течение двух-трех месяцев, после чего их запасы в остальное время года расходуются без какого-либо пополнения.

Дебиты многих разрозненных эксплуатационных скважин (например, самоизливающихся скважин Араратского, Алазанского и других артезианских бассейнов), а также отдельных водозаборов, работающих при установившемся режиме фильтрации, зависят в основном от естественных сезонных изменений в режиме подземных или поверхностных вод.

Некоторые водозаборы в Центральном Казахстане, расположенные в речных долинах, где отсутствует постоянный в течение года водоток, работают в условиях ежегодного частичного восполнения запасов подземных вод и полного восполнения запасов лишь раз в пять — девять лет, т. е. в годы повышенной водности.

Таким образом, при определении гидрогеологических параметров для проведения расчетов естественных и эксплуатационных ресурсов подземных вод необходимо установить, как могут изменяться во времени мощности водоносного горизонта, и определить в соответствии с конкретной практической задачей искомые минимальные, максимальные или заданные значения расчетных мощностей.

Возможные изменения уровней (мощностей) подземных вод водоносных горизонтов можно оценивать двумя путями:

1) определением прогнозных колебаний уровней в течение какого-то календарного периода с указанием конкретных изменений уровней по годам или минимально возможных уровней на расчетный период оценки эксплуатационных запасов;

2) определением максимально и минимально возможных уровней заданной обеспеченности без установления времени их наступления.

Первая задача может ставиться при оценках ресурсов подземных вод на ограниченный срок их эксплуатации, особенно когда этот срок соизмерим с продолжительностью периодов группировок маловодных и многоводных лет, т. е. когда можно учесть конкретные изменения водности года или восполнения запасов подземных вод во времени. Подобные прогнозы целесооб-

разно составлять также в районах с напряженным водным балансом, так как они могут служить для планирующих водохозяйственных организаций основой выработки мероприятий по рациональному использованию подземных вод (по обоснованию возможного увеличения или ограничения водоотбора на отдельных этапах срока эксплуатации подземных вод).

Вторая задача ставится при оценках ресурсов подземных вод на длительный или даже неограниченный срок их эксплуатации. В этом случае чаще всего необходимо определить уровни или дебиты подземных вод 95%-ной обеспеченности (без установления времени их наступления), позволяющие рассчитать минимальные величины ресурсов подземных вод за многолетие. Помимо расчета изменений эксплуатационных ресурсов подземных вод во времени и определения многолетних вариаций мощностей водоносных горизонтов, необходим расчет естественных ресурсов подземных вод или подземного стока, являющегося составной частью поверхностного стока, прогнозы изменений которого также учитываются в водохозяйственных балансах территорий.

Водопритоки в различного рода горные выработки (карьеры, шахты и т. п.), особенно расположенные в зоне активного водообмена, где подземные воды находятся в тесной связи с дневной поверхностью (Красная Шапочка, Миргалимсай и др.), также имеют резко выраженный сезонный характер и во многом зависят от естественного режима подземных вод [80]. Установив корреляционные связи между изменениями уровней подземных вод и величинами водопритоков в горные выработки, можно по прогнозам первых давать характеристики изменения вторых. Из сказанного выше видно, что работа многих водозаборов, а также водопритоки в горные выработки тесно связаны практически только с естественным режимом подземных вод и иногда даже им определяются. Знание изменений в режиме подземных вод, происходящих под влиянием естественных факторов, и своевременный прогноз этих изменений могут избавить от многих неприятных последствий.

Планирование севооборота сельскохозяйственных культур. Глубины залегания грунтовых вод являются в ряде случаев одним из основных факторов, определяющих урожайность сельскохозяйственных культур. Величины водопотребления, солеустойчивость и глубины развития корневой системы различных растений далеко не одинаковы, а следовательно, и оптимальные условия водно-солевого, теплового и воздушного режима почв, а также зоны аэрации для получения максимальных урожаев у разных культур также различны. Так, например, глубины развития корневой системы свеклы [52] достигают 2,85 м, подсолнечника — 2,45 м, ячменя ярового — 2,67 м, пшеницы и ржи озимой — 2,14 м, гороха — 1,65 м, картофеля — 1,55 м, льна — 1,07 м и фасоли — 1,02 м.

По данным Д. М. Каца [41], оптимальные глубины залегания грунтовых вод в районах с отсутствием угрозы засоления почв для хлопчатника составляют в среднем за вегетацию 1,2—1,5 м, для большинства овощных культур — от 0,7—0,8 до 1,2—1,5 м, для садов — 2—3 м. Высокий уровень грунтовых вод благоприятно сказывается на росте озимой пшеницы и ряда других культур лишь в начале вегетационного периода, а в дальнейшем оказывается для них губительным.

Особенно важно установление критических глубин залегания грунтовых вод в орошаемых районах с наличием угрозы засоления почв и зоны аэрации. Так, при минерализации грунтовых вод от 1,5 до 7 г/л на лёссовых грунтах критическая глубина залегания грунтовых вод изменяется от 1,5 до 3,5 м [41], а для лугово-черноземных и лугово-каштановых почв Южного Заволжья составляет 2,2—2,4 м, для глубокостолбчатых солонцов — 2,8—3,2 м, а для подсолонцового засоления — даже 4,5 м [7].

По материалам С. Г. Скоропанова, А. И. Ивицкого и др. [61], наибольшие урожаи картофеля и кукурузы (в Полесье) снимаются при глубинах залегания грунтовых вод 1,5—2 м, травы (в Полесье) — 0,7—0,8 м, капусты (в Мещере) — 1,6—1,8 м, ряда овощей (в Подмосковье) — 1,2—1,4 м. Повышение или понижение уровней грунтовых вод относительно указанных оптимальных глубин приводит к снижению урожайности в 2—3 раза и более, так как подъем уровня приводит к подтоплению корневой системы растений и ее частичному отмиранию из-за недостатка кислорода, а снижение — к иссушению почв.

Оптимальные глубины залегания грунтовых вод, определяющие урожайность сельскохозяйственных культур, устанавливаются в соответствии с литологическим строением зоны аэрации, от которого зависит высота капиллярного поднятия воды. Принимая в среднем высоту капиллярного поднятия в песках 0,2—0,8 м, супесях 1—1,5 м, суглинках легких 1,5—2 м и суглинках тяжелых 3—4 м, можно считать, что непосредственное активное воздействие подземных вод на урожайность сельскохозяйственных культур проявляется при глубинах их залегания до 5—7 м (а именно в таких пределах подземные воды залегают на значительной части сельскохозяйственных районов страны).

При глубоком залегании грунтовых вод изменения их глубин по сезонам и от года к году уже не сказываются прямо на урожайности сельскохозяйственных культур. Однако косвенно относительные изменения глубин залегания грунтовых вод по сравнению со среднемноголетней их нормой свидетельствуют о водности года и степени увлажнения зоны аэрации, которые уже прямо влияют на урожайность. Таким образом, прогнозы максимальных весенних уровней грунтовых вод, а также их уровней на определенные отрезки времени в течение вегетационного периода (важные с точки зрения роста и созревания различных

видов сельскохозяйственных культур) могут найти широкое применение для оценки степени благоприятности условий произрастания этих культур. Поэтому при планировании севооборотов наряду с чисто агрономическими соображениями должна учитываться интенсивность колебаний уровней грунтовых вод в различные годы. Уже в январе — феврале нередко можно точно оценить величины уровней грунтовых вод в периоды пахоты, сева и созревания урожая, т. е. уже в это время, основываясь на гидрогеологических прогнозах, можно на участках, где в данном году ожидается неглубокое залегание грунтовых вод, запланировать посевы влаголюбивых культур (капусты, овса и т. п.), а для других культур выбрать поля с наиболее благоприятными для них водно-солевыми и тепловыми условиями в зоне аэрации. Такие прогнозы могут также явиться основой и для регулирования режима подземных вод на сельскохозяйственных угодьях, создавая благоприятные условия для произрастания и повышения урожайности культур.

К сожалению, такие прогнозы пока еще не делались из-за отсутствия разветвленной по стране сети наблюдений за режимом грунтовых вод и недостаточной разработанности этого вопроса. Создание в СССР опорной гидрогеологической наблюдательной сети, проведение на ней систематических наблюдений, а также разработка методов экстраполяции результатов наблюдений и прогнозов, полученных на опорной сети, по площади позволяют использовать результаты прогнозов режима грунтовых вод в сельском хозяйстве.

Планирование противооползневых мероприятий. Как известно, под оползнями понимается движение масс пород вниз по склону под действием силы тяжести в результате несоответствия крутизны склона профилю его равновесия.

Роль подземных вод в формировании оползней весьма существенна. Подземные воды насыщают глинистые породы, ослабляя их сопротивляемость сдвигу и переводя их в пластичное и даже текучее состояние, а также насыщают породы на склоне, увеличивая силу, стремящуюся сместить их вниз, и ослабляя силы сцепления пород, растворяя и механически разрушая их.

Увлажнение склона подземными водами, их гидростатическое и гидродинамическое воздействие на породы, находящиеся на склоне, имеют четко выраженный сезонный характер. Наибольший суммарный эффект всех этих факторов проявляется в периоды максимального положения уровней подземных вод как в течение одного года (т. е. весной и осенью), так и в многолетнем разрезе (т. е. в периоды лет с повышенной водностью).

Особенно резко сезонность оползневых процессов проявляется в речных долинах, где сезонный характер имеют практически все основные оползне-формирующие факторы: подрезка склона паводковыми водами, увлажнение склона талыми водами, осенними дождями и повышенной разгрузкой подземных вод.

Прогноз активизации оползневых процессов в таких условиях с учетом его многофакторности может производиться методом множественной корреляции. Так, например, для прогноза возможности активизации оползней в речных долинах средней полосы европейской части СССР в качестве расчетных факторов для наиболее опасного весеннего периода могут быть выбраны следующие: 1) максимальный уровень воды в реке; 2) максимальный уровень подземных вод; 3) сумма зимних осадков или запас воды в снеге к началу снеготаяния; 4) влажность пород в зоне существующих плоскостей скольжения или возможного их образования (ослабленных зон на склоне); 5) суммарные жидкие осадки предшествовавшей осени, косвенно определяющие степень увлажненности и водонасыщенности пород к моменту снеготаяния.

Многолетние наблюдения за этими факторами, как правило, имеются. Поэтому, составив и решив на ЭЦВМ соответствующее уравнение регрессии, можно на основе прогнозов возможных максимальных уровней подземных и поверхностных вод, составляемых гидрогеологическими станциями и учреждениями гидрометеослужбы, выдавать прогнозы вероятности активизации оползневых процессов.

Подземные воды в данном геодинамическом процессе являются одним из факторов, который при планировании противооползневых мероприятий наиболее легко может быть зарегулирован, например, путем искусственного снижения уровня подземных вод откачкой. По уравнению регрессии или по построенным по нему многофакторным графикам, о которых будет сказано далее (см. главу IV), можно оценить, насколько нужно снизить уровень воды, чтобы предотвратить оползнеобразование, или установить, что даже полным устранением подземных вод не удастся предотвратить подвижки старых оползней или появления новых.

Таким образом, прогнозы режима подземных вод могут стать реальной основой для прогнозов оползневых явлений и планирования противооползневых мероприятий.

Приведенные примеры практического использования прогнозов режима показывают большое значение изучения и составления прогнозов естественного режима грунтовых вод. Наблюдающаяся синхронность режима грунтовых вод на довольно широких площадях, а также проведенное всеми гидрогеологическими станциями страны гидрогеологическое районирование своих территорий по условиям формирования режима грунтовых вод и создание на этой основе сети опорных наблюдательных скважин по территории СССР, позволяющей экстраполировать результаты наблюдений по опорным скважинам на обширные пространства, — все это даст возможность широко использовать данные о естественном режиме подземных вод и его прогнозы для практических целей.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗОВ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Существующие в настоящее время методы прогнозов режима подземных вод подразделяются по-разному [50, 84, 100, 107]. Нам представляется возможным сгруппировать методы прогнозов в четыре основные группы с рядом подгрупп: 1) гидродинамические; 2) вероятностно-статистические; 3) балансовые; 4) гидрогеологической аналогии и экстраполяции.

Гидродинамические методы прогнозов режима подземных вод основаны:

- а) на аналитическом решении дифференциальных уравнений, описывающих неустановившееся движение подземных вод;
- б) на решении уравнений неустановившегося движения подземных вод в конечно-разностной форме;
- в) на моделировании гидрогеологических процессов.

Вероятностно-статистические методы прогнозов режима подземных вод содержат:

- а) корреляционный факторный анализ режима подземных вод, включая учет асинхронности режима;
- б) автокорреляционный анализ и прогнозы режима подземных вод как марковского процесса;
- в) гармонический анализ длинных рядов наблюдений и экстраполяцию цикличности в режиме подземных вод;
- г) экстраполяцию колебаний как случайного стационарного процесса или линейную экстраполяцию;
- д) вероятностные оценки уровней или расходов подземных вод заданных обеспеченностей.

Балансовые методы прогнозов режима делятся в свою очередь на два метода:

- а) решение балансового уравнения, основанного на экспериментальном определении отдельных элементов, составляющих баланс грунтовых вод и влаги в зоне аэрации;
- б) составление баланса грунтовых вод на основе гидродинамического анализа их режима.

Методы гидрогеологической аналогии и экстраполяции могут быть разделены на следующие:

- а) аналогия и экстраполяция во времени;
- б) аналогия и экстраполяция в пространстве;
- в) комбинированная аналогия — во времени и в пространстве.

Условия и возможность применения всех перечисленных выше методов прогноза режима подземных вод различны. В табл. 4 нами приведены некоторые рекомендации по применению различных методов прогноза естественного режима грунтовых вод

Методы прогнозов	Типы прогнозов по заблаговременности				
	экстренные	краткосрочные	сезонные	долго-срочные	сверх-долгосрочные
Гидродинамические:					
аналитические	+	+	+		
конечно-разностные	+	+	+		
моделирование	+	+	+		
Балансовые		+	+		
Вероятностно-статистические:					
корреляционные гидрометеорофакторные	+	+	+		
корреляционные геолого-физические		+	+	+	+
автокорреляционные и марковские		+		+	
гармонический анализ		+		+	
линейная экстраполяция		+		+	
Гидрогеологической аналогии и экстраполяции		+		+	+

Примечание: Знаком «+» отмечены наиболее предпочтительные типы прогнозов, составляемых различными методами.

в зависимости от необходимой степени их заблаговременности.

Приведенное разделение методов прогнозов хотя и носит несколько условный характер, однако характеризует область наиболее эффективного использования существующих методов.

Не ставя целью исчерпывающее изложение всех перечисленных выше методов (так как по этому вопросу имеется обширная литература), рассмотрим кратко лишь их основную сущность, условия применения и историю развития.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Гидродинамические, и в том числе аналитические методы прогнозов естественного режима грунтовых вод, применимы в тех случаях, когда изменения в режиме подземных вод происходят под влиянием в основном лишь одного режимобразующего фактора¹ и при условии, когда известны или сравнительно легко могут быть определены расчетные гидрогеологические параметры водоносного горизонта. Наибольшее распространение эти методы могут получить при прогнозах режима подземных

¹ Под режимобразующими факторами понимаются активно изменяющиеся во времени (сутки, сезон, многолетие) природные процессы или хозяйственная деятельность человека, которые, изменяясь сами, приводят к изменениям режима подземных вод.

вод приречного вида, определяемого главным образом режимом поверхностных вод, создающих подпор подземных вод, а также при прогнозах спада уровней или дебитов подземных вод в периоды «независимого» их режима (т. е. в периоды свободного стока подземных вод, не осложненного наличием какого-либо питания или интенсивного испарения, когда такой сток зависит от фильтрационных свойств водоносного горизонта и его емкости).

Аналитические методы прогнозов режима подземных вод по сравнению со всеми остальными методами имеют наибольшую историю.

Первые расчетные формулы для прогноза минимальных расходов источников были предложены Майэ, Губером и Буссинеском для независимого режима подземных вод еще в 1904 г. для двух случаев: 1) когда мощность водоносного горизонта достаточно велика и изменением ее можно пренебречь; 2) когда мощность его соизмерима с амплитудами колебаний уровня.

Изменение дебита источника описано уравнениями:
в первом случае

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}; \quad (1)$$

во втором случае

$$Q = \frac{Q_0}{(1 - \alpha t)^2}, \quad (2)$$

где Q — дебит источника на любой момент независимого режима;

Q_0 — дебит источника в начальный момент его спада;

α — коэффициент истощения водоносного горизонта;

t — продолжительность спада дебита.

Коэффициент истощения определяется по формулам:
в первом случае

$$\alpha = \frac{\pi^2 k h_{\text{ср}}}{4\mu L^2}; \quad (3)$$

во втором случае

$$\alpha = 5,772 \frac{kf}{4\mu L^3}, \quad (4)$$

где k — коэффициент фильтрации;

$h_{\text{ср}}$ — средняя мощность водоносного горизонта;

μ — водоотдача пород;

f — площадь вертикального сечения потока грунтовых вод от места выхода источника до водораздела;

L — расстояние от источника до водораздела.

В СССР эти уравнения получили распространение после выхода в свет работы Г. Н. Каменского и др. [35]. Однако конкретное приложение уравнений «независимого», или «упорядоченно-

го», спада дебита источников для прогнозов естественного их режима нашло отражение лишь в очень немногих работах [8, 19].

Для большинства случаев, когда уровни грунтовых вод характеризуются четкими сезонными подъемами и спадами, закономерность их спада также может быть охарактеризована уравнением Майэ — Буссинеска, которое по аналогии с уравнением (1) можно записать в следующем виде:

$$H = H_0 e^{-\alpha \Delta t}, \quad (5)$$

где H — искомое превышение уровня, т. е. дренируемой мощности, грунтовых вод над базисом их разгрузки;

H_0 — наблюдавшееся превышение уровня грунтовых вод относительно того же уровня базиса разгрузки;

Δt — промежуток времени между наблюдавшимся и прогнозируемым уровнем грунтовых вод.

Данное уравнение может быть использовано для прогнозов предвесеннего и осеннего минимума уровня грунтовых вод, о чем будет сказано далее. При этом за H_0 можно принять дренируемую мощность водоносного горизонта в момент устойчивого перехода температур воздуха через 0° , т. е. в момент, когда питание подземных вод уже практически исключено. За H принимается искомая дренируемая мощность водоносного горизонта в период минимума (превышение уровня над базисом дренирования).

Коэффициент истощения определяется по наблюдавшемуся периоду независимого спада уровня по уравнению

$$\alpha = \frac{\ln H_1 - \ln H_2}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

где H_1 и H_2 — дренируемые мощности водоносного горизонта в любые наблюдавшиеся промежутки времени t_1 и t_2 .

При сравнительно однородном строении зоны, осушаемой при спаде уровня грунтовых вод, однажды определенный коэффициент истощения водоносного горизонта принимается постоянным для всего периода прогноза (как в течение одного сезона, так и в ряде случаев в другие годы примерно равной водности). В тех же случаях, когда осушаемая зона существенно разнородна, коэффициенты истощения должны быть определены отдельно для каждой осушаемой литологической разновидности пород.

Особенно значительные изменения коэффициентов истощения наблюдаются в карстовых и неравномерно трещиноватых породах, в связи с чем графики снижения уровней или дебитов на первом этапе характеризуют истощение крупных каверн, каналов и трещин, на втором — более мелких пустот и трещин, а на третьем — осушение пор и мельчайших трещин.

В зависимости от этого могут быть различны не только коэффициенты истощения на каждом из трех периодов спада деби-

тов или уровней, но даже и законы спада. Так, на первом этапе, когда дренируются крупные карстовые каналы, прогноз спада дебитов источников может осуществляться не по формулам (1) или (2), а по формуле (7) для турбулентного движения подземных вод [121]:

$$Q = Q_0 \frac{1}{(1 - \alpha t)^3}, \quad (7)$$

где

$$\alpha = b \frac{\frac{1}{3} kv^2}{\mu^2 L^2}; \quad (8)$$

v — объем водоносного горизонта от выхода источника до водораздела грунтовых вод;

b — коэффициент, зависящий от ширины потока.

Остальные обозначения прежние.

При сравнительно малой зоне дренирования родника s_p по отношению к площади распространения водоносного горизонта s_r коэффициент b прямо пропорционален s_p/s_r [121].

Уравнение (7) может быть записано и для уровня грунтовых вод.

При сравнительно равномерной закарстованности, трещиноватости и пористости пород коэффициент истощения равен обычно $n \cdot 10^{-3}$, а при неравномерной закарстованности и трещиноватости пород, приводящей к движению подземных вод по отдельным изолированным каналам или зонам, коэффициент истощения составляет $n \cdot 10^{-1}$, где $0 < n < 10$. Разгрузка подземных вод осуществляется тем быстрее, чем больше коэффициент α , и наоборот.

Кривые спада, построенные в полулогарифмическом масштабе, в условиях равномерной трещиноватости или пористости пород, т. е. при постоянном во времени α , образуют прямую линию [50]. Коэффициент α может в этом случае быть определен как $\operatorname{tg} \varphi$, т. е. угла наклона прямой линии.

Экстраполяция этой прямой линии позволяет определить прогнозные значения уровней прямо по графикам.

При неравномерной трещиноватости или закарстованности подобный график будет иметь один-два перегиба (рис. 2). При этом первый прямолинейный участок соответствует кривой истощения крупных дренирующих каналов, а последний — кривой истощения мелких трещин и пор.

Наиболее простыми, естественно, являются прогнозы уровней или дебитов подземных вод при однородном строении водоносных горизонтов, которые могут осуществляться как аналитически, так и графически (по полулогарифмическому графику). При неоднородном строении водоносных горизонтов достовер-

ный прогноз уровней или дебитов более сложен, и его можно выполнить лишь поинтервально, определив характерные коэффициенты истощения для каждого прямолинейного отрезка полулогарифмического графика отдельно.

Величины коэффициентов истощения зависят не только от фильтрационных свойств водовмещающих пород и размеров

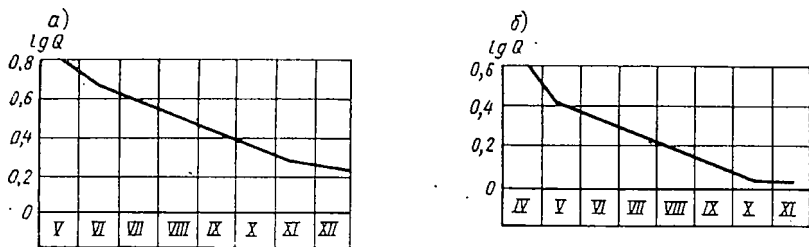


Рис. 2. Полулогарифмические графики летнего спада дебитов источников из лавовых отложений Армении (а) и закарстованных известняков Крыма (б)

водоносного горизонта, как это можно установить из уравнений (3) и (4). На значения коэффициентов истощения существенно влияет степень увлажненности пород в зоне аэрации. Так, можно заметить, что во время водообильных лет темп спада дебитов источников меньше, чем темп спада в году, следующем за одним или тем более за рядом засушливых лет, несмотря на то, что амплитуды весеннего подъема уровня или дебита были одинаковыми. Данное явление наблюдается даже в известняках с большой мощностью зоны аэрации (рис. 3). Так, годовая сумма осадков в районе источника Ай-Иори (Крым) в 1959 г. составляла 863,1 мм, в 1961 г. — 792,6 мм, а в 1963 г. — 522,5 мм. В соответствии с этим при сравнительно одинаковых амплитудах весеннего увеличения дебитов источников спад дебитов в 1959 г. осуществлялся медленнее, чем в 1961 и 1963 гг. Средние коэффициенты истощения для 1959 и 1963 гг. соответственно равны 0,0025 и 0,0041.

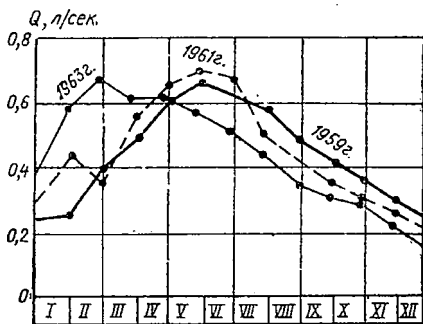


Рис. 3. Графики колебаний дебита источника Q_n Ай-Иори в годы различной увлажненности

Учитывая возможные вариации значений коэффициентов истощения от года к году и размеры осушаемой зоны при ее сравнительной однородности, можно определить среднемноголетнее

значение α или выбрать значение α , соответствующее водности года, и использовать его для предварительных прогнозов.

Значительное развитие получили методы оценки передачи напоров в глубь берега от реки или водохранилища. Форхгеймер в 1930 г. на основе анализа режима подземных вод со свободной поверхностью в прибрежной зоне вывел уравнение передачи колебаний в глубь берега для случая, когда эти колебания могут быть аппроксимированы как синусоидальные:

$$Z = He^{-x} \sqrt{\frac{\pi\mu}{2kht}} \sin\left(\frac{\pi t}{T} - x \sqrt{\frac{\pi\mu}{2kht}}\right), \quad (9)$$

где Z — подъем уровня подземных вод в наблюдательной скважине, отстоящей от берега реки на расстоянии x в момент времени t ;

H — максимальное повышение или спад уровня воды в реке или в граничном пьезометре, расположенном у ее берега;

μ — недостаток насыщения при подъеме уровня или водоотдача при его спаде;

k — коэффициент фильтрации;

h — мощность водоносного слоя;

t — время начала подъема воды в реке;

T — половина периода колебаний уровня воды в реке.

Прогноз наиболее важного максимального уровня грунтовых вод, имеющего место при

$$\sin\left(\frac{\pi t}{T} - x \sqrt{\frac{\pi\mu}{2kht}}\right) = 1,$$

можно производить по более простой формуле

$$Z_{\text{макс}} = He^{-x} \sqrt{\frac{\pi\mu}{2kht}}. \quad (10)$$

Уравнение Форхгеймера может быть применено при прогнозе передачи колебаний, вызываемых как рекой или водохранилищем, так и приливо-отливными явлениями на берегах открытых морей и океанов при условии, что мощность водоносного горизонта значительно больше амплитуды колебаний уровня подземных вод.

Основываясь на уравнениях теплопроводности, Н. Н. Веригин [16] предложил решения задач для расчета подъема уровня подземных вод вблизи реки в условиях неустановившегося режима для трех случаев:

- 1) поток подземных вод полуограничен;
- 2) поток подземных вод ограничен и имеет постоянный напор на верхней границе;
- 3) поток подземных вод ограничен и имеет постоянный расход на верхней границе.

В первом случае прогноз режима уровня грунтовых вод, определяемого режимом поверхностного водотока или водоема, осуществляется по формуле

$$y_x = \sqrt{h_x^2 + (y_1^2 - h_1^2) [1 - \Phi(\lambda)]}, \quad (11)$$

где y_x — прогнозируемый уровень грунтовых вод в наблюдательной скважине, отстоящей от берега на расстоянии x ;

$\Phi(\lambda)$ — интеграл вероятности Гаусса, равный

$$\Phi(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\lambda e^{-\lambda^2} d(\lambda),$$

определяемый по таблицам или графику [1] в зависимости от величины

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (12)$$

здесь a — коэффициент уровнепроводности водоносного пласта, равный $kh_{\text{ср}}/\mu$;
 t — время.

Средняя мощность при этом определяется по уравнению

$$h_{\text{ср}} = \frac{2y_1 + h_1}{3}; \quad (13)$$

Во втором случае, когда поток грунтовых вод ограничен на верхней границе постоянным напором (что может иметь место при наличии заболоченности боковых швов террас, старичных или других озер и т. п.) прогноз уровня дается по уравнению

$$y_x = \sqrt{h_x^2 + (y_1^2 - h_1^2) \left[\frac{L-x}{L} - S\left(\tau_1 \frac{x}{L}\right) \right]}, \quad (14)$$

где $S\left(\tau_1 \frac{x}{L}\right)$ — ряд Фурье, определяемый по таблицам или графику [1] в зависимости от

$$\frac{x}{L} \text{ и } \tau = \frac{kh_{\text{ср}}t}{\mu L^2} = \frac{at}{L^2}.$$

В третьем случае рассмотрен поток грунтовых вод в террасе, примыкающей к слабопроницаемым коренным породам, приток со стороны которых принимается постоянным ($q = \text{const}$).

Прогнозное уравнение для этого случая имеет вид, аналогичный описанным:

$$y_x = \sqrt{h_x^2 + (y_1^2 - h_1^2) \left[1 - T\left(\frac{x}{L}, \tau\right) \right]}, \quad (15)$$

где функция $T(x/L, \tau)$ также определяется в зависимости от x/L и $\tau = at/L^2$ по таблицам [1].

Все указанные решения могут успешно применяться для прогнозов весенних уровней грунтовых вод.

Развивая работы Н. Н. Веригина, В. М. Шестаков [112], пользуясь принципом сложения течений, получил для тех же трех расчетных схем уравнения для ступенчатого и ломаного (с разными скоростями) подъема уровня воды в реке (при $x = 0$). Общая форма этих зависимостей имеет следующий вид:

для прогноза ступенчатого (стадийного) подъема уровня грунтовых вод в наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии x от берега (для n -й ступеньки).

$$\Delta H = \sum_{\tau=0}^{n-1} \Delta H_i^0 F(x, t - t_i); \quad (16)$$

для прогноза ломаного подъема уровня (также для n -го участка)

$$\Delta H = \sum_{\tau=0}^{n-1} (v - v_i)(t - t_i) F_v(x, t - t_i). \quad (17)$$

Значения функций $F(x, t)$ и $F_v(x, t)$ для разных типовых условий даны В. М. Шестаковым в соответствующих таблицах и графиках [112].

В этой же работе В. М. Шестаковым рассмотрено влияние инфильтрации и испарения на развитие подпора, даны соответствующие уравнения для их учета, а также рассмотрены случаи возможного влияния плановой и вертикальной фильтрационной неоднородности пород на развитие подпора в грунтовых водах.

Точность расчетов прогнозных уровней грунтовых вод во всех приведенных случаях зависит от точности определения коэффициента уронепрободности пласта, который может быть получен решением обратной задачи. Используя зависимости (16) и (17) и зная соотношения уровней во время предыдущих паводков, можно определить в соответствующем случае значения функций λ или τ и затем рассчитать усредненный для зоны река — наблюдательная скважина искомый параметр a .

Зная же средний для пласта параметр a и фактически наблюдавшийся или прогнозный (по данным гидрометеослужбы) максимальный уровень реки, можно с высокой степенью точности рассчитать максимально возможные уровни грунтовых вод в наблюдательных скважинах, приняв в качестве расчетного времени t среднесезонное значение времени подъема уровня грунтовых вод в скважинах от минимального предвесеннего его положения до максимального весеннего.

Разработке аналитических методов прогнозов режима подземных вод посвящены также другие работы [2, 88, 95 и др.].

Прогнозы развития подпора грунтовых вод в зонах влияния реки или водохранилища могут производиться и по уравнениям неустановившегося движения подземных вод, выраженным в конечных разностях. Уравнения одномерного неустановившегося движения в конечных разностях было предложено Г. Н. Каменским в 1940 г. [36]. В общей форме оно имеет вид:

$$\Delta h = \frac{(q_1 - q_2 + w\Delta x) \Delta t}{\mu \Delta x}, \quad (18)$$

где Δh — изменение уровня воды в элементе потока;
 q_1 и q_2 — расход воды, поступающей в элемент и вытекающей из него;
 w — инфильтрация сверху;
 Δx — расстояние между расчетными сечениями;
 Δt — интервал времени;
 μ — недостаток насыщения или водоотдача пород.

Для расчета подпора это уравнение может быть представлено в следующем виде [17]:

$$\begin{aligned} Z_{n,s+2} = Z_{n,s} + \frac{k\Delta t}{\mu l_n l_{n+1} (l_n + l_{n+1})} \{ & [(h_{0,n+1}^2 - h_{0,n}^2) l_n - \\ & - (h_{0,n}^2 - h_{0,n-1}^2) l_{n+1}] + [(Z_{n+1,s}^2 - Z_{n,s}^2) l_n - \\ & - (Z_{n,s}^2 - Z_{n-1,s}^2) l_{n+1}] + 2[(h_{0,n+1} Z_{n+1,s} - h_{0,n} Z_{n,s}) l_n - \\ & - (h_{0,n} Z_{n,s} - h_{0,n-1} Z_{n-1,s}) l_{n+1}] \} + \frac{w}{\mu} \Delta t, \quad (19) \end{aligned}$$

где $Z_{n-1,s}$, $Z_{n,s}$, $Z_{n+1,s}$ — подпор в сечениях $n-1$, n и $n+1$ в первый момент времени s ;
 $Z_{n,s+2}$ — прогнозный подпор в сечении n в следующий момент времени $s+2$;
 k — коэффициент фильтрации пород;
 $h_{0,n-1}$, $h_{0,n}$, $h_{0,n+1}$ — мощности водоносного горизонта в сечениях $n-1$, n и $n+1$ (для первого расчета на урезе реки);
 l_n , l_{n+1} — расстояния между сечениями $n-1$ и n и сечениями n и $n+1$ (рис. 4).

Таким образом, зная исходные уровни в трех сечениях (до подпора) и в какой-то начальный момент развития подпора, можно прогнозировать величину подъема уровня для среднего сечения. Расчет подпора ведется последовательно от сечения к сечению.

В случае большой мощности водоносного горизонта, средняя величина которой h_{cp} может быть принята постоянной во времени и вдоль расчетного профиля, а также при равных расстояниях между расчетными сечениями Δl и отсутствии инфильтрации

уравнение (19) может быть представлено в более простой форме [36]

$$y = h_2 + \frac{2kh_{cp} \Delta t}{\mu (\Delta l)^2} \left(\frac{h_1 + h_3}{2} - h_2 \right). \quad (20)$$

Аналогичным образом при радиальном или двухмерном в плане потоке расчет прогнозных уровней может осуществляться

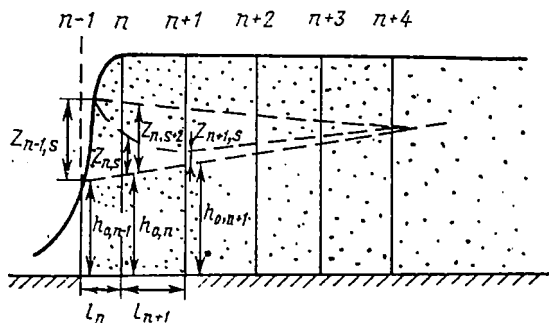


Рис. 4. Схема расчета подпора грунтовых вод методом конечных разностей

ся для группы из пяти скважин, расположенных «конвертом», по уравнению

$$y = h_3 + \frac{4kh_{cp} \Delta t}{\mu (\Delta l)^2} \left(\frac{h_1 + h_2 + h_4 + h_5}{4} - h_3 \right), \quad (21)$$

где y — мощность потока или отметка уровня грунтовых вод в среднем сечении (в средней из трех скважин при одномерном потоке или в центре «конверта» при двухмерном) через промежуток времени Δt ;

$h_1; h_2; h_3; h_4; h_5$ — мощности или отметки уровня грунтовых вод в момент времени, предшествующий расчетному.

Если подобрать значения Δl и Δt так, чтобы члены уравнения (20) и (21) $\frac{2kh_{cp} \Delta t}{\mu (\Delta l)^2} = 1$ и $\frac{4kh_{cp} \Delta t}{\mu (\Delta l)^2} = 1$, то указанные уравнения соответственно примут вид:

$$y = \frac{h_1 + h_2}{2}; \quad (22)$$

$$y = \frac{h_1 + h_2 + h_4 + h_5}{4}. \quad (23)$$

В уравнениях (20) — (23) не учитывать инфильтрацию возможно при слабопроницаемой зоне аэрации, когда подъем уровня грунтовых вод формируется только за счет их подпора со стороны реки, а также когда размеры инфильтрационного питания в период паводка несоизмеримо малы по сравнению с эффектом подпора грунтовых вод.

При фильтрационной неоднородности разреза в плане расчет подпора грунтовых вод при переходе из одной толщи в другую может производиться по уравнению [87]:

$$y_k = \frac{h_{k-1} + bh_{k+1}}{1 + b}, \quad (24)$$

где y_k — прогнозный уровень грунтовых вод на контакте двух толщ с различной проницаемостью;

h_{k-1} и h_{k+1} — уровни грунтовых вод, предшествующие расчетному периоду в сечениях, отстоящих от контакта соответственно на расстоянии Δl_1 и Δl_2 . При этом ΔL подбирается по соотношениям:

$$\Delta l_1 = \sqrt{\frac{2k_1 m_1 \Delta t}{\mu_1}} \quad \text{и} \quad \Delta l_2 = \sqrt{\frac{2k_2 m_2 \Delta t}{\mu_2}}; \quad (25)$$

$$b = \frac{\sqrt{\mu_2 k_2 h_{cp2}}}{\sqrt{\mu_1 k_1 h_{cp1}}}.$$

μ_1 и μ_2 ; k_1 и k_2 ; h_{cp1} и h_{cp2} — соответственно водоотдача, коэффициенты фильтрации и средние мощности водоносного горизонта в пределах контактирующих толщ.

Необходимые параметры k , μ или k/μ определяются также решением обратной задачи по наблюдениям за режимом уровня грунтовых вод в процессе развития подпора. Методы определения гидрогеологических параметров и прогноза развития подпора в приречных и приводохранилищных зонах с применением конечно-разностных уравнений рассматривались в работах [6, 17, 37, 43, 44, 77, 78 и др.].

В особо сложных гидрогеологических условиях (при наличии резкой неоднородности фильтрационных свойств водоносного горизонта в плане и в разрезе, сложных контуров водоносных горизонтов и подстилающих их водоупоров, при неравномерном инфильтрационном питании грунтовых вод, при наложении на естественный режим каких-либо искусственных воздействий) вместо аналитических расчетов могут применяться различные способы моделирования режима подземных вод. Моделирование в настоящее время чаще всего применяется при решении различных задач, связанных с прогнозом нарушенного режима подземных вод. Однако оно также может широко использоваться и уже применялось для прогнозов развития подпора или передачи давления в глубь берега под влиянием колебательных движений поверхностных вод, осуществляемых по любому закону. Для этих целей могут быть использованы прежде всего гидравлические интеграторы В. С. Лукьянова, электронные

аналоговые машины, а также приборы ЭГДА. Возможности применения различных моделирующих устройств, опыт их использования для гидрогеологических прогнозов, а также методические вопросы гидрогеологического моделирования рассмотрены подробно в специальных работах.

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Применение аналитических методов для прогнозов режима подземных вод является довольно ограниченным, так как в большинстве случаев естественный режим подземных вод, а грунтовых вод в особенности, формируется под одновременным воздействием сложного сочетания многочисленных режимообразующих факторов (космических, метеорологических, гидрологических и биолого-почвенных). Определить в каждом конкретном случае долю участия того или иного фактора в формировании режима грунтовых вод довольно трудно. Кроме того, отдельные факторы по-разному влияют на режим подземных вод. Например, атмосферные осадки путем инфильтрации через зону аэрации повышают уровень грунтовых вод, а испарение, наоборот, понижает их уровень. При этом оба эти процесса могут воздействовать на подземные воды одновременно и в зависимости от ряда других факторов в различных соотношениях. Поэтому наиболее приемлемыми методами прогноза режима грунтовых вод в таких случаях становятся вариационно-статистические, так как в соотношениях воздействия различных факторов на режим подземных вод существенную роль играет элемент случайности.

Как уже было отмечено ранее, статистические методы прогнозов подразделяются на ряд групп.

Корреляционные методы прогнозов основаны на установлении корреляционных связей между прогнозируемым элементом режима грунтовых вод и определяющими его факторами. Корреляционный характер связи (в отличие от прямой функциональной) означает наличие при одном и том же значении одной переменной ряда значений другой переменной, несколько отличающихся друг от друга ввиду различной степени участия остальных факторов. Корреляционный анализ заключается в установлении таких связей, определении их формы и оценке тесноты этих связей.

Наличие связи устанавливается либо графически (путем осреднения на графике эмпирически полученных точек связи какой-то линией или серией линий), либо аналитически (путем расчетов коэффициентов корреляции или корреляционных отношений).

Форма связи может быть линейной и нелинейной, а также парной или множественной.

Связь называется линейной, если она отражает зависимость одной переменной от другой (т. е. парная корреляция) в виде прямой линии на графике, описываемой при нормальном законе распределения переменных x и y уравнением регрессии

$$y_i - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x_i - \bar{x}), \quad (26)$$

где \bar{y} и \bar{x} — средние (чаще всего среднееголетние) значения соответственно зависимой и независимой переменных;

y_i и x_i — частные значения (за какой-то год) этих же переменных;

r — коэффициент корреляции, оценивающий тесноту связи и определяемый по формуле

$$r = \frac{\Sigma (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\Sigma (y_i - \bar{y})^2 \Sigma (x_i - \bar{x})^2}}; \quad (27)$$

σ_x и σ_y — среднеквадратические отклонения от средних величин соответственно x и y , определяемые по формулам

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\Sigma (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (28)$$

и

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (29)$$

Техника построения необходимых корреляционных таблиц и расчетов парной корреляции изложена в многочисленной литературе по математической статистике, а также в работах М. Е. Альтовского [3], А. В. Лебедева [77], Д. М. Каца [41] и др.

Квадрат коэффициента корреляции называют коэффициентом детерминации ($D=r^2$), который также отражает тесноту связи переменных в процентах. Так, при $r=0,7$, $D=0,49$, т. е. величина y на 49% связана с x линейно, а на 51% x и y независимы. Весьма тесной связь считается обычно при $|r| > 0,85$, когда x и y связаны на 75% и более. При $0,7 < |r| < 0,85$ связь считается удовлетворительно тесной и слабой при $|r| < 0,7$.

Коэффициент уравнения связи $b_y = r\sigma_y/\sigma_x$, называемый эмпирическим коэффициентом регрессии, проверяется по уравнению

$$\sigma_{b_y} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 3}}. \quad (30)$$

При соблюдении соотношения $b_y > 3\sigma_{b_y}$ вычисленный коэффициент регрессии не случайно отличается от нуля, а имеет существенное значение.

Парная связь может быть и нелинейной: логарифмической, параболической, экспоненциальной и др. В зависимости от этого подобранные к полученной эмпирическим путем криволинейной связи уравнения могут иметь различный вид:

$$y = \ln x; \quad y = ax^2; \quad y = a + bx^\alpha; \quad y = ae^{bx}; \quad y = \frac{1}{a + bx} \text{ и т. д.}$$

Анализ таких зависимостей может производиться так же, как и линейных, если имеется возможность приведения их к линейным, например, путем логарифмирования или методом замены переменных.

Наиболее общими и частыми в режиме подземных вод являются множественные связи, в которых прогнозируемая или искомая переменная y зависит от серии зависимых или независимых друг от друга переменных x_i . В общей форме такая связь выражается уравнением

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (31)$$

или для случая линейных связей полиномом, называемым уравнением регрессии,

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n, \quad (32)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — значения отдельных факторов или независимых переменных, активно влияющих на прогнозируемый элемент y или зависимую переменную;

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ — коэффициенты уравнения.

Множественные связи также можно выявлять аналитическим и графическим путем.

Как известно, коэффициенты корреляции имеют значения от -1 до $+1$ ($-1 < r < 1$). Отрицательные их значения указывают на наличие обратной связи зависимой и независимой переменных, а положительные — прямой.

Уравнение регрессии для зависимой переменной z от двух независимых переменных x и y имеет вид:

$$\begin{aligned} z_i - \bar{z} = & \frac{r_{xz} - r_{yz}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_x} (x_i - \bar{x}) + \\ & + \frac{r_{yz} - r_{xz}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_y} (y - y_0), \end{aligned} \quad (33)$$

где r_{xz}, r_{xy} и r_{yz} — парные коэффициенты корреляции между соответствующими переменными;

σ_z, σ_x и σ_y — среднеквадратические отклонения от средних величин z, x и y .

Общий коэффициент корреляции величины z от x и y имеет вид:

$$R = \sqrt{\frac{r_{xz}^2 + r_{yz}^2 - 2r_{xy}r_{xz}r_{yz}}{1 - r_{xy}^2}}. \quad (34)$$

Значения коэффициентов корреляции парных связей при наличии реально действующего третьего фактора могут существенно искажаться. Для исключения этих воздействий оцениваются частные коэффициенты корреляции. Так, частный коэффициент корреляции x и z при исключении влияния на них y оценивается по формуле

$$r_{xz(y)} = \frac{r_{xz} - r_{xy}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2)(1 - r_{yz}^2)}}. \quad (35)$$

Например, при $r_{xz} = 0,78$ и $r_{zy} = 0,86$ $r_{xz(y)} = 0,1$.

Чтобы исключить взаимовлияние факторов на тесноту связей и коэффициенты уравнения регрессии, их выбирают для множественной корреляции лишь после проведения парной корреляции всех предварительно отобранных для прогноза факторов поочередно как с y , так и между собой. Для последующих расчетов используются лишь те факторы, которые несущественно связаны между собой и существенно с y .

Расчеты уравнений регрессии для трех, четырех и более независимых факторов становятся уже более трудоемкими и выполнимыми лишь на вычислительных машинах. Так, например, исходное уравнение при четырех независимых переменных x_1 , x_2 , x_3 и x_4 может быть записано в виде:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (36)$$

где a ; b_1 ; b_2 ; b_3 и b_4 — коэффициенты уравнения, которые могут быть найдены из решения системы нормальных уравнений, имеющих для данного случая вид:

$$\left. \begin{aligned} b_1 \Sigma x_1^2 + b_2 \Sigma x_1 x_2 + b_3 \Sigma x_1 x_3 + b_4 \Sigma x_1 x_4 &= \Sigma y x_1; \\ b_1 \Sigma x_1 x_2 + b_2 \Sigma x_2^2 + b_3 \Sigma x_2 x_3 + b_4 \Sigma x_2 x_4 &= \Sigma y x_2; \\ b_1 \Sigma x_1 x_3 + b_2 \Sigma x_2 x_3 + b_3 \Sigma x_3^2 + b_4 \Sigma x_3 x_4 &= \Sigma y x_3; \\ b_1 \Sigma x_1 x_4 + b_2 \Sigma x_2 x_4 + b_3 \Sigma x_3 x_4 + b_4 \Sigma x_4^2 &= \Sigma y x_4, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

где Σx_1^2 , $\Sigma x_1 x_2$ и т. д. — суммы квадратов и произведений факторов, выбранных за многолетие.

Коэффициенты регрессии находятся из следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\Sigma y x_1 - b_2 \Sigma x_1 x_2 - b_3 \Sigma x_1 x_3 - b_4 \Sigma x_1 x_4}{\Sigma x_1^2}; \\
 b_2 &= \frac{\Sigma y x_2 A - b_3 \Sigma x_2 x_3 A - b_4 \Sigma x_2 x_4 A}{\Sigma x_2^2 A}; \\
 b_3 &= \frac{\Sigma y x_3 B - b_4 \Sigma x_3 x_4 B}{\Sigma x_3^2 B}; \\
 b_4 &= \frac{\Sigma y x_4 C}{\Sigma x_4^2 C}.
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Требуемые для расчета члены уравнений с индексами A , B и C находятся из следующих зависимостей:

$$\begin{aligned}
 \Sigma y x_2 A &= \Sigma y x_2 - \frac{\Sigma x_1 x_2}{\Sigma x_1^2} \Sigma y x_1; \\
 \Sigma y x_3 A &= \Sigma y x_3 - \frac{\Sigma x_1 x_3}{\Sigma x_1^2} \Sigma y x_1; \\
 \Sigma y x_4 A &= \Sigma y x_4 - \frac{\Sigma x_1 x_4}{\Sigma x_1^2} \Sigma y x_1; \\
 \Sigma x_2^2 A &= \Sigma x_2^2 - \frac{\Sigma x_1 x_2}{\Sigma x_1^2} \Sigma x_1 x_2; \\
 \Sigma x_2 x_3 A &= \Sigma x_2 x_3 - \frac{\Sigma x_1 x_2}{\Sigma x_1^2} \Sigma x_1 x_4; \\
 \Sigma x_2 x_4 A &= \Sigma x_2 x_4 - \frac{\Sigma x_1 x_2}{\Sigma x_1^2} \Sigma x_1 x_4; \\
 \Sigma x_3^2 A &= \Sigma x_3^2 - \frac{\Sigma x_1 x_3}{\Sigma x_1^2} \Sigma x_1 x_3; \\
 \Sigma x_3 x_4 A &= \Sigma x_3 x_4 - \frac{\Sigma x_1 x_3}{\Sigma x_1^2} \Sigma x_1 x_4; \\
 \Sigma y x_3 B &= \Sigma y x_3 A - \frac{\Sigma x_2 x_3 A}{\Sigma x_2^2 A} \Sigma y x_2 A; \\
 \Sigma y x_4 B &= \Sigma y x_4 A - \frac{\Sigma x_2 x_4 A}{\Sigma x_2^2 A} \Sigma y x_2 A; \\
 \Sigma x_3^2 B &= \Sigma x_3^2 A - \frac{\Sigma x_2 x_3 A}{\Sigma x_2^2 A} \Sigma x_2 x_3 A; \\
 \Sigma x_3 x_4 B &= \Sigma x_3 x_4 A - \frac{\Sigma x_2 x_3 A}{\Sigma x_2^2 A} \Sigma x_2 x_4 A;
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

$$\left. \begin{aligned} \Sigma x_4^2 B &= \Sigma x_4^2 A - \frac{\Sigma x_2 x_4 A}{\Sigma x_2^2 A} \Sigma x_2 x_4 A; \\ \Sigma y x_4 C &= \Sigma y x_4 B - \frac{\Sigma x_3 x_4 B}{\Sigma x_3^2 B} \Sigma y x_3 B; \\ \Sigma x_4^2 C &= \Sigma x_4^2 B - \frac{\Sigma x_3 x_4 B}{\Sigma x_3^2 B} \Sigma x_3 x_4 B. \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Теснота парных нелинейных и множественных связей оценивается с помощью корреляционного отношения:

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_y^2}{\sigma_y^2}}, \quad (40)$$

где S_y — мера точности уравнения регрессии или ошибка прогноза, определяемая по уравнению

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - y_{pi})^2}{n - m}}, \quad (41)$$

где y_i — наблюдавшиеся фактические значения зависимой переменной или прогнозируемого элемента за ряд лет n ;

y_{pi} — величины зависимой переменной, вычисленные по уравнению регрессии;

n — число членов ряда, по которому получена связь;

m — число степеней свободы, характеризующее вид уравнения регрессии и равное числу его постоянных членов (так, для уравнения парной корреляции $m=2$, тройственной корреляции $m=3$ и т. д.).

Значения $|r|$ и R , равные или близкие 1, свидетельствуют о наличии функциональной или почти функциональной связи. Сравнение тесноты связи различных случаев по величине коэффициента корреляции не всегда правомерно, так как его значение (даже при тесной связи) в значительной степени зависит от длины ряда измерений, использованных для его расчета.

Вероятная ошибка коэффициента корреляции S_R может быть оценена по уравнению

$$S_R = \pm 0,674 \frac{1 - R^2}{\sqrt{n}}. \quad (42)$$

Доля участия каждого фактора в варьировании прогнозируемого параметра y оценивается через коэффициент детерминации:

$$D = R^2 = \beta_1 r_{yx_1} + \beta_2 r_{yx_2} + \dots + \beta_k r_{yx_k}, \quad (43)$$

где $\beta_1 = b_1 \sigma_{x_1} / \sigma_y$; $\beta_2 = b_2 \sigma_{x_2} / \sigma_y$ и т. д. (b_1, b_2, \dots — коэффициенты уравнения регрессии).

Слагаемые данной суммы в процентах оценивают роль различных факторов, а $1 - R^2$ — долю участия случайных или неучтенных факторов.

Большие значения свободного члена уравнения регрессии a также свидетельствуют о наличии каких-то неучтенных факторов, роль которых в формировании прогнозируемого значения y существенна.

Существующие аналитические формы решения множественной корреляции рассчитаны на наличие линейных или почти линейных связей. При нелинейных зависимостях режима подземных вод от режимобразующих факторов может быть использован графический метод множественной корреляции [90].

Нелинейные парные корреляционные связи аппроксимируются обычно параболическим уравнением связи [111]

$$\bar{y}_x = a + bx + cx^2, \quad (44)$$

где \bar{y}_x — частные средние значения y , соответствующие различным заданным значениям x ;

a, b, c — постоянные коэффициенты.

Коэффициенты a, b и c определяют, решая систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} an_x + b \sum n_x x + c \sum n_x x^2 &= \sum n_x \bar{y}_x; \\ a \sum n_x x + b \sum n_x x^2 + c \sum n_x x^3 &= \sum n_x \bar{y}_x x; \\ a \sum n_x x^2 + b \sum n_x x^3 + c \sum n_x x^4 &= \sum n_x \bar{y}_x x^2. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Корреляционный анализ получил довольно широкое применение при прогнозах естественного режима грунтовых вод.

Парная корреляция для прогноза режима подземных вод в СССР впервые была использована М. Е. Альтовским [3], который по аналогии с соответствующей зависимостью, установленной в гидрологии, привел в качестве примера применения метода корреляции зависимость между уровнями последующего и предыдущего месяцев. В этой же работе им указано на возможность установления связей между амплитудами подъема уровня грунтовых вод и количеством выпадающих осадков, а также на зависимость амплитуды весеннего подъема от «запасов снега на единицу площади» и от глубины промерзания грунта.

А. И. Субботиним [109] была установлена связь между максимальными весенними и минимальными летними уровнями грунтовых вод, позволяющая прогнозировать за несколько месяцев вперед не только уровни грунтовых вод, но и минимальный речной сток. Им же была отмечена целесообразность представления уровней грунтовых вод x_i для удобства их сравнения в виде модульных коэффициентов $k = x_i/x$ отклонений от среднегодовой нормы или среднеарифметической величины x .

В. Г. Богачев и Ю. В. Гуревич установили зависимость амплитуды весеннего подъема уровня грунтовых вод на Силурий-

ском плато от запасов влаги в снежном покрове перед началом снеготаяния и жидких осадков за период снеготаяния.

Зависимости между зимними осадками и весенним подъемом уровня широко используются в Венгрии [122] для прогноза максимальных весенних уровней грунтовых вод. Парные корреляционные связи при прогнозах режима подземных вод использовались и другими зарубежными учеными [119, 120 и др.].

Аналогичные связи устанавливались и на многих гидрогеологических станциях страны [62 и др.]. Однако для прогнозов они не использовались, так как сведения о зимних осадках или запасах воды в снеге к моменту снеготаяния анализируются, как правило, когда надобность в прогнозе весеннего максимума уже отпадает.

С. М. Семенов [101] вслед за А. И. Субботиным, учитывая накопленный материал для европейской части РСФСР, опробовал ряд зависимостей последующих значений уровней грунтовых вод в условиях их спада от предыдущих максимальных и использовал эти связи для прогнозов. В частности, им опробованы зависимости: летне-осеннего минимального уровня грунтовых вод от максимального весеннего; предвесенних минимальных уровней от предшествующих осенних уровней; среднемесячных уровней второго и третьего месяца периода спада от предшествующего максимального весеннего уровня, т. е. от начала его спада. С. М. Семенов опробовал также по большому числу точек зависимость среднегодового уровня грунтовых вод от максимального весеннего и зависимость максимального весеннего уровня грунтовых вод от летне-осеннего минимального уровня предшествующего года.

Парные корреляционные связи устанавливались также и многими другими авторами: Г. Ф. Басовым, А. П. Ваховским, Э. А. Зальцбергом, В. С. Ковалевским, А. А. Коноплянцевым, В. А. Коробейниковым, А. В. Лебедевым, Д. Ю. Сакалаускене, М. А. Шинкаревским и др.

Все перечисленные выше парные корреляционные связи устанавливаются на основе многолетних наблюдений за режимом подземных вод, обладают простотой и дают в ряде случаев достаточную для практики точность прогнозов при существенной их заблаговременности. Возможности применения этих прогнозов будут нами рассмотрены далее.

Методы множественной корреляции появились в гидрогеологии сравнительно недавно. Впервые они были применены в аналитической форме для прогноза режима подземных вод венгерским ученым И. А. Богарди [116]. В настоящее время они уже получили распространение и в СССР. Положительную роль в популяризации этого метода сыграла работа А. А. Коноплянцева [57], в которой были уточнены условия применения этого метода в разных природных условиях и произведены расчеты прогноза весеннего максимального уровня грунтовых вод по ряду

скважин в различных районах страны, показавшие высокую достоверность таких прогнозов.

Метод множественной корреляции использовался также А. П. Ваховским, В. С. Квачевой и П. С. Маковкиным, Э. А. Зальцбергом, В. С. Ковалевским, С. М. Семеновым и Н. Г. Искандеровым, В. И. Пыркиным, М. А. Шинкаревским и др.

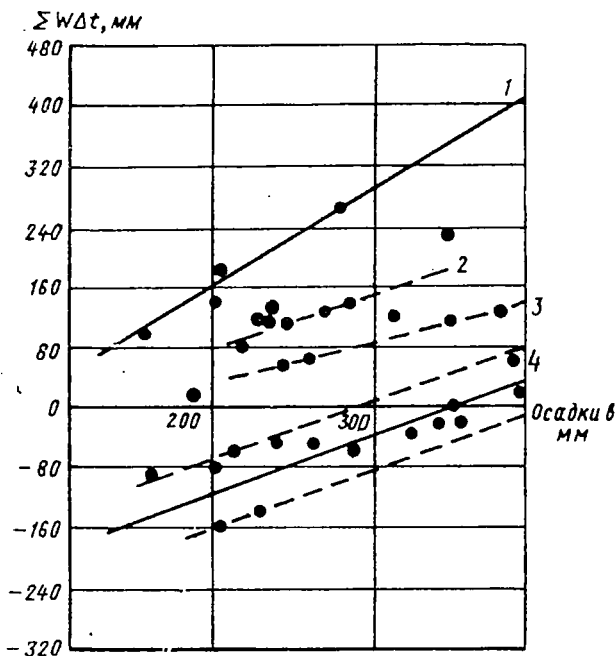


Рис. 5. График зависимости (по А. В. Лебедеву) величин питания и испарения грунтовых вод $\Sigma W\Delta t$ по скважине 30 от метеорологических факторов (для графиков 1—3 зависимости величин питания от осадков учтены осадки с X месяца предшествующего года по III месяц текущего года; для графика 4— зависимости величин испарения — с V по IX месяц)

1 — при дефиците влажности воздуха $d_{IV} = 1,6 : 2,2$ мб; 2 — в годы с оттепелями; 3 — $d_{IV} = 2,8 : 3,8$ мб

Возможности использования метода множественной корреляции в будущем возрастут в связи с более широким внедрением в практику электронно-вычислительных машин.

Графический метод множественной корреляции еще не получил должного развития. Примером применения тройственной корреляции для прогноза режима грунтовых вод является график А. В. Лебедева, составленный для прогноза питания грунтовых вод в весеннее время в Подмосковье в зависимости от величины суммы осадков за осенне-зимний период (с октября по март включительно) и прогнозного дефицита влажности за апрель d_{IV} , а также для прогноза величины испарения с поверхности грунтовых вод в зависимости от осадков летнего периода (за май — август включительно) и дефицита влажности за этот же период (рис. 5).

Один из графических методов множественной корреляции, используемый для четырех факторов и большего их количества, при наличии нелинейных множественных связей впервые был

рассмотрен В. Н. Озябкиным [90] на примере прогноза максимального весеннего уровня грунтовых вод в районе Ленинграда.

Близкими по физическому смыслу к методу множественной корреляции являются методы «черного ящика» и весовых функций, рассмотренные Н. А. Огильви, А. А. Плетневым и Ю. С. Богомоловым [9, 89, 93]. Для линейных систем расчетные уравнения представляются в виде интеграла Дюамеля:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^{T_n} \omega_i(\tau) x_i(t - \tau) d\tau, \quad (46)$$

где x_1, x_2, x_3, \dots — входные режимообразующие факторы и их весовые функции $\omega_1(\tau), \omega_2(\tau), \dots$, отражающие вклад каждого из факторов в выходную величину y в момент времени $t - \tau$;

y — прогнозируемый параметр режима подземных вод;

T_n — память системы по каждому входу.

А. А. Плетневым рассмотрен также случай и нелинейных связей, что делает метод весовых функций более универсальным, чем метод множественной корреляции. Кроме того, метод весовых функций позволяет более четко установить роль различных факторов в формировании прогнозируемого уровня.

Опыт составления прогнозов режима подземных вод и выявления генетических связей, определяющих особенности режима подземных вод, показывает, что влияние различных гидрометеорологических факторов проявляется в режиме подземных вод лишь в течение ограниченного промежутка времени — обычно от нескольких месяцев до одного года, реже в течение двух-трех лет. Таким образом, факторные прогнозы, основанные на установлении корреляционных связей режима подземных вод с гидрометеорологическими факторами, могут иметь заблаговременность максимум до двух-трех лет и наиболее достоверны лишь в течение того же года или даже нескольких первых месяцев. В связи с этим для составления долгосрочных прогнозов режима подземных вод должны быть использованы другие методы, не связанные с метеорологической обстановкой известного нам периода. Среди таких методов можно отметить прежде всего различные варианты гармонического анализа, позволяющие выделить во внутренней структуре колебаний уровней детерминированные циклические колебания с целью их экстраполяции в будущее. Перспективными также являются установление корреляционных связей с глобальными гелиогеофизическими процессами (солнечной активностью, атмосферной циркуляцией и др.) и долгосрочные прогнозы, на основе которых могут быть составлены соответствующие прогнозы режима подземных вод.

Возможны также прогнозы, основанные на чисто математических приемах экстраполяции наблюдающихся колебаний без

выяснения генетических причин этих колебаний. В результате в колебаниях уровней и расходов подземных вод можно выделить с той или иной степенью достоверности многолетние тренды (характеризующие общую тенденцию к подъему или спаду уровней или отрезки каких-то больших циклов по периоду несонизмеримо больших фактических наблюдений), цикличность, отражающую периодические колебания уровней относительно тренда или какой-то многолетней средней, и случайные колебания. Тренды и периодические колебания при определенных условиях могут прогнозироваться во времени, а случайные колебания оцениваться статистически, характеризуя возможный разброс прогнозируемых уровней. Успешность прогноза при этом будет зависеть от соотношения детерминированных и случайных колебаний, т. е. чем больше будет размах возможных случайных колебаний по сравнению с амплитудами детерминированных изменений, тем хуже будет качество прогнозов.

Детерминированность в виде цикличности различных природных процессов отмечалась многочисленными исследованиями с давних пор. В частности, цикличность вскрывалась в колебаниях уровней рек и озер, в характере отложений осадков в озерах, в степени увлажненности климата материков, в уровнях океанов и ледовитости северных морей, в интенсивности роста деревьев, во времени наступления наиболее катастрофических засух и в других явлениях.

Первые работы по установлению цикличности в режиме подземных вод принадлежат Г. Ф. Басову [5] и А. В. Шнитникову [114], которые установили наличие 11- и 35-летних циклов в колебаниях уровней грунтовых вод Каменной степи и сделали первую попытку качественной (визуальной) увязки этих циклов с циклами солнечной активности, выраженной в числах Вольфа. Цикличность в колебаниях уровней отмечали и другие авторы: Н. С. Токарев [110], А. И. Субботин [108 и 109], В. И. Дугин и В. А. Коробейников [27, 28], Д. М. Кац [39, 40], Н. А. Кенесарин [42], Н. В. Роговская [97], А. А. Коноплянец [60] и др., которые также увязывали эти колебания с солнечной активностью. Не совсем четкая связь уровней грунтовых вод и солнечной активности (смещение циклов грунтовых вод на один — три года по отношению к циклам солнечной активности и даже смена знака этой связи с прямой на обратную в 30-х годах, и наоборот, с обратной на прямую в середине 60-х годов) заставила исследователей искать пути различной обработки кривых колебания уровней грунтовых вод, а также формы математического анализа для установления периодичностей в колебаниях уровней.

Н. С. Токарев [110] вместо обычных хронологических графиков предложил использовать метод построения разностных интегральных кривых для выявления связи колебаний уровней грунтовых вод с атмосферными осадками.

М. Е. Альтовский [3] применил один из простейших численных методов периодограммного анализа (упрощенный метод Бейс — Балло) для выявления скрытых периодичностей.

Графический метод последовательного сглаживания многолетних графиков колебаний уровня подземных вод, построенных по его экстремальным годовым значениям, был предложен Т. Н. Ефремовой [30], которая показала возможность использования таких графиков для выявления 11-, 20—25- и 35-летней периодичностей и составления прогнозов среднегодовых уровней подземных вод на ряд лет вперед.

В. А. Коробейников [63, 65] использовал для этих целей хорошо зарекомендовавший себя в гидрологии и метеорологии метод скользящих n -леток, что позволило ему путем последовательного сглаживания графика по 3-, 5- и 11-леткам выделить в режиме уровней грунтовых вод Каменной степи 3-, 7-, 11—13-, 21—23- и 34—35-летние циклы, установить аналитически корреляционную связь между режимом уровня грунтовых вод и солнечной активностью, а также составить впервые сверхдолгосрочный прогноз режима грунтовых вод (среднегодовых уровней) на ряд лет вперед. Аналогичный прогноз впоследствии был произведен А. А. Коноплянцевым [57]. Им же была составлена первая карта фактического за период 1950—1960 гг. и прогнозного на 1960—1970 гг. наступления максимумов уровней грунтовых вод на европейской территории СССР и Средней Азии, а также установлена разновременность наступления максимумов в этих районах СССР.

С. М. Семенов в 1969 г. для ряда скважин европейской части СССР и Казахстана построил разностные интегральные кривые отклонений от нормы не абсолютных значений уровней грунтовых вод, а их модульных коэффициентов:

$$\sum_i^n (k_i - 1), \quad (47)$$

где $k_i = H_i / \bar{H}$ — модульный коэффициент годового уровня грунтовых вод;

H_i — среднегодовой уровень грунтовых вод каждого отдельного года;

\bar{H} — среднемноголетний уровень или норма.

Имеют место и другие виды сглаживания или фильтрации [4], [10], [92], позволяющие отделить детерминированную составляющую от случайной и выделить периодичность или многолетние тенденции. Наиболее распространены нормированные разностные интегральные кривые, рассчитываемые по формуле

$$\frac{\Sigma (k - 1)}{C_v} \text{ или } \frac{\Sigma (k - 1)}{\sigma}, \quad (48)$$

где C_v — коэффициент вариации, равный

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (k-1)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{H_1}{\bar{H}} - 1\right)^2}{n-1}} \quad (49)$$

Остальные обозначения приведены выше.

Эти кривые позволяют исключить различную изменчивость анализируемых факторов и представить их в сопоставимом размахе колебаний.

Для фильтрации колебаний, помимо сглаживания методом скользящих средних (или n -леток), применяются биномиальные и экспоненциальные фильтры, которые также позволяют исключить случайные колебания и короткопериодичную цикличность с малыми амплитудами, осложняющую основные циклы. Сглаживание скользящими средними при малом периоде осреднения (по 3-леткам) приводит к искажению характера анализируемой кривой, включая трансформацию минимумов в максимумы. Этот недостаток устраняется приданием разным значениям сглаживаемых членов различного веса.

При биномиальном фильтре, когда сглаживающая функция имеет форму кривой нормального распределения, коэффициенты сглаживания определяются по формуле

$$C_m = \frac{N!}{m!(N-m)!}; \quad (50)$$

где N — период осреднения;

m — порядковый номер осредняемых членов.

Так, при сглаживании по 5-леткам $N=4$ и биномиальные коэффициенты для $m=0, 1, 2, 3, 4$ равны 1, 4, 6, 4, 1. Помножив каждый из сглаживаемых членов на соответствующий коэффициент и разделив сумму этих произведений на сумму коэффициентов (в данном примере $\sum C_m=16$), получают среднее значение сглаживаемых членов, которое по времени относится к среднему члену сглаживаемого интервала. Для соблюдения последнего требования сглаживание проводится по нечетному числу членов.

Для выявления отдельных специфических связей, например зависимостей уровней подземных вод или расходов источников от суммарных осадков предшествовавшего периода, целесообразно использовать асимметричный экспоненциальный фильтр. Такой фильтр позволяет придать наибольший вес суммарным осадкам непосредственно предшествующего холодного периода с уменьшением веса осадков периодов, отстоящих на один, два, три и т. д. года от анализируемого. Коэффициенты сглаживания в этом случае могут быть равны 1, 2, 4, 8 и т. д. или рассчитаны по формуле

$$C_m = e^{-\lambda m}, \quad (51)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$;

λ — коэффициент, выбираемый по физическим соображениям.

Существующие методы сглаживания кривых многолетних графиков колебаний уровней грунтовых вод имеют свои преимущества и недостатки. Так, разностные интегральные кривые позволяют вскрывать крупные циклы свыше 11 лет (вековой и тренды) и, как правило, нивелируют более мелкие циклы. Методы скользящих средних и различных весовых фильтров позволяют вскрывать различные циклы от 5—6 лет и более, однако они сокращают длину временного ряда наблюдений на $(n-1)$ лет (т. е. при сглаживании по 3-леткам — на два года, по 5-леткам — на четыре года, по 11-леткам — на 10 лет и т. д.). Все методы могут определить сдвиги во времени периодов наступления максимальных и минимальных уровней и требуют довольно трудоемких расчетов. В зависимости от решаемой задачи по одинаковой программе должны рассчитываться не только уровни или дебиты подземных вод, но и коррелируемые с ними основные режимобразующие факторы (солнечная активность, атмосферная циркуляция, атмосферные осадки, температура и дефицит влажности воздуха и т. д.).

Недостаточная теснота связей режима подземных вод и солнечной активности объясняется тем, что последняя воздействует на подземные воды не непосредственно, а через атмосферу, особенности циркуляции которой уже находят прямое отражение в режиме подземных вод. В связи с этим гидрологи и метеорологи в последние годы свои долгосрочные прогнозы стремятся строить на закономерностях атмосферной циркуляции. В качестве методической основы таких прогнозов чаще всего берутся выделенные в 1948 г. Г. Я. Вангенгеймом [12] три типа атмосферной циркуляции для северного полушария: западная *W*, центральная *C* и восточная *E*. Атмосферная циркуляция в различные эпохи характеризуется преобладающим направлением атмосферного переноса тепла и влаги. Смена этих направлений в целом совпадает с циклами солнечной активности, но имеет свои особенности [18, 38].

Первая увязка интегральных кривых преобладающих типов атмосферной циркуляции, по Вангенгейму, с интегральными кривыми уровня грунтовых вод была проведена В. А. Коробейниковым [64, 66], который отметил, что в периоды усиления солнечной активности, обуславливающей усиление циркуляции типов *E* и *C*, наблюдается снижение уровней грунтовых вод по шурфу № 1 Каменной степи, а в периоды снижения солнечной активности, приводящие к образованию циркуляции типа *W*, наоборот, — повышение уровней.

Атмосферная циркуляция разных типов определяет различную степень увлажненности территории, а следовательно, разные условия питания подземных вод, что находит отражение в их

уровнях. Так, Г. Н. Власко [15] отметил довольно четкую зависимость между эпохами атмосферной циркуляции и величиной эффективных зимних атмосферных осадков, определяющих величину питания грунтовых вод в Казахстане (табл. 5).

Таблица 5

Эпоха атмосферной циркуляции	Преобладающий тип циркуляции	Среднее по четырем метеостанциям количество осадков в мм
1929—1939	<i>E</i>	87
1940—1948	<i>C</i>	107
1949—1958	<i>E+C</i>	144
1959—1963	<i>W</i>	159

Хорошо увязываются между собой разностные интегральные кривые величин подземного стока и типа атмосферной циркуляции [25].

Прогнозы режима грунтовых вод, основанные на корреляционных связях с типами атмосферной циркуляции, еще не получили должного применения. Однако этот метод является, безусловно, перспективным, о чем будет сказано далее.

Рассмотрение многолетних закономерностей уровней подземных вод, а также обуславливающих их геллюгеофизических факторов показывает, что в колебаниях уровней подземных вод выделяются серии циклов, характеризующихся различными амплитудами и периодами. В зависимости от гидрогеологических и климатических условий района отдельные циклы могут преобладать над другими. Однако можно предположить, что в наиболее общем смысле наблюдавшиеся колебания уровней подземных вод являются результатом сложения различных гармонических колебаний с периодами 2, 5—6, 11, 19 и т. д. лет, которые могут быть выражены уравнением [10]

$$y_t = \bar{y}_0 + A_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(\omega_n t + \alpha_n), \quad (52)$$

где y_t — значение анализируемого уровня подземных вод за время t (например, среднегодовое);

\bar{y}_0 — константа, равная среднемноголетней величине уровня;

A_1, A_2, \dots, A_n — амплитуды различных гармоник;

ω_n — частота колебаний, связанная с периодами колебаний соотношением $\omega_n = 2\pi/T_n$;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — фазы каждой гармоники в период времени t .

Представление о временных изменениях различных природных процессов как о сумме взаимонакладывающихся периоди-

ческих колебаний позволило наметить различные методы выделения этой скрытой периодичности. Наиболее формальным методом гармонического анализа является разложение имеющихся природных колебаний в ряд Фурье. При этом предполагается, что ряд фактических наблюдений состоит из суммы строгих синусоид с периодами, равными его длине L и долям этой длины $L/2, L/3, L/4$ и т. д. Уравнение (52) для такого случая представляется в следующем виде:

$$y_t = \bar{y} + A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{L}t + \alpha_1\right) + A_2 \sin\left(\frac{4\pi}{L}t + \alpha_2\right) + \dots + A_k \sin\left(\frac{2k\pi}{L}t + \alpha_k\right) \quad (53)$$

или

$$y_t = \bar{y} + a_1 \cos \theta_t + a_2 \cos 2\theta_t + a_3 \cos 3\theta_t + \dots + b_1 \sin \theta_t + b_2 \sin 2\theta_t + b_3 \sin 3\theta_t + \dots, \quad (54)$$

где $\theta_t = 2\pi/Lt$, a_1 и b_1 — компоненты первой гармоники; a_2 и b_2 — компоненты второй гармоники и т. д.

Коэффициенты $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k; b_1, b_2, b_3, \dots, b_k$ определяются по уравнениям:

$$a_1 = \frac{2}{L} \sum_{t=0}^{L-1} (y_t \cos \theta_t); \quad b_1 = \frac{2}{L} \sum_{t=0}^{L-1} (y_t \sin \theta_t); \quad (55)$$

.....

$$a_k = \frac{2}{L} \sum_{t=0}^{L-1} (y_t \cos k\theta_t); \quad b_k = \frac{2}{L} \sum_{t=0}^{L-1} (y_t \sin k\theta_t).$$

Амплитуды и фазы гармоник определяются по уравнениям:

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}; \quad (56)$$

$$\alpha_i = \arctg \frac{a_i}{b_i}. \quad (57)$$

Генетическая природа выделяемых данным методом гармоник не устанавливается. Трудно точно установить и преобладающие в анализируемом ряду гармоники. Поэтому большее распространение получили другие методы выявления скрытой периодичности: периодограммный анализ, автокорреляция и спектральный анализ.

Периодограммный анализ, так же как и гармонический, предполагает, что любой ряд наблюдений может быть представлен с любой степенью точности рядом синусоидальных кривых. Однако периоды гармоник не зависят от длины ряда (т. е. не равны ему или его частям), а определяются природными процессами и наблюдаются в структуре ряда.

В гелиофизике, океанологии, гидрологии и других науках широко развиты периодограммы Шустера [10].

Ряд наблюдений для расчетов гармоник по Шустеру делится на k равных частей, которые затем почленно складываются, а из образованного таким путем нового ряда определяются параметры гармоник длиной $L_1 = n/k$ по формулам (55) — (57). Аналогичным образом определяются параметры для гармоник длиной $L_2 = \frac{n}{k-1}$ и т. д. Отложив затем на графике $A_i = f(L_i)$, на-

зываемом спектром периодограммы, амплитуды рассчитанных гармоник (или их квадраты), можно установить периоды преобладающих в ряду многолетних колебаний. Выбор интервала разбивки ряда определяется физическими соображениями, например стремлением выявить в рядах наблюдений 5—6- и 11-летние солнечные циклы, и поэтому испытания (определения амплитуд) ведутся либо вблизи предполагаемого периода, либо через равные интервалы времени (2, 3, 4, ... года).

Таким образом, для построения периодограмм по Шустеру желательно теоретическое знание выявляемых в ряду наблюдений гармоник, для чего предварительно следует либо установить связь с факторами, характеризующимися циклическими колебаниями, либо провести автокорреляционный или спектральный анализ рядов и вскрыть имеющуюся в них цикличность.

Имеются и более простые формы периодограммного анализа, позволяющие оценивать все основные параметры гармоник (амплитуды, фазы и периоды). Среди таких следует отметить разностные периодограммы Брукса и периодоскоп Карузерс [10].

При отсутствии строгой периодичности каждой из гармоник их параметры T_i , A_i и α_i могут быть оценены лишь как средне-многолетние, а поэтому в приведенное уравнение следует еще ввести дополнительный член $\pm \gamma$ — случайную компоненту (или шум), отражающую случайное появление независимых колебаний. Данная компонента включает в себя также и неточности расчетов, связанные с отбрасыванием части анализируемого ряда при его неполном делении на k частей для периодограммного анализа указанными методами.

Существуют и другие варианты периодограммного анализа, одни из которых с анализом параметров гармоник и случайной компоненты по нескольким продолжительным рядам наблюдений за режимом подземных вод рассмотрели Э. А. Зальцберг, В. Н. Деч и Л. Д. Кноринг [31].

Отсутствие четко повторяющихся циклов в колебаниях подземных вод, их разнообразие по длине периода (от 2-летних до вековых), амплитудам и фазам колебаний (т. е. их некогерентность) свидетельствуют о наличии в процессе формирования режима подземных вод значительного элемента случайности,

приводящего, с одной стороны, к случайному наложению друг на друга различных по длине периодов гармонических колебаний, а с другой — к случайному появлению различных соотношений воздействия отдельных режимообразующих факторов, осложняющих закономерные колебания. В результате можно говорить не столько о наличии строгой цикличности в режиме грунтовых вод, сколько о наличии последовательно сменяющихся друг друга группировок маловодных и многоводных лет, нарушенных иногда случайными годами противоположной водности.

Наличие случайных компонентов в этих колебаниях свидетельствует о возможности использования для прогноза режима подземных вод аппарата случайных функций, который позволяет (на основе установленных за предыдущий период наблюдений закономерностей гармонических колебаний уровня грунтовых вод) прогнозировать режим подземных вод на ряд лет вперед.

«Случайной функцией называется функция, которая в результате опыта может принять тот или иной конкретный вид, но неизвестно заранее — какой именно» [13]. В нашем конкретном случае случайной функцией $x(t)$ служит график колебаний уровней $H(t)$ или дебитов $Q(t)$ подземных вод, построенный за многолетие.

Случайным процессом называют случайную функцию, параметром которой является время.

Одной из основных характеристик случайного процесса является корреляционная или автокорреляционная функция $R(\tau)$, отражающая степень зависимости между сечениями случайной функции, относящимися к разным периодам t . Корреляционная функция имеет вид кривой, ординаты которой равны коэффициентам корреляции смежных значений анализируемого графика $x(t)$, разделенных равномерно увеличивающимся промежутком времени со сдвигом, равным τ . В общем виде она имеет следующее выражение:

$$R(\tau) = M[x(t) x(t - \tau)], \quad (58)$$

где M — символ математического ожидания;
 $x(t)$ и $x(t - \tau)$ — условные обозначения сечений случайной функции в моменты времени t и $t - \tau$.

Расчет корреляционной функции сводится к определению и нанесению на график коэффициентов корреляции между последовательно выбираемыми в результате сдвига на величину τ значениями уровней или дебитов подземных вод и исходным значением уровня или дебита:

$$R(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - x_{n-\tau}^{(1)}) - (x_{i+\tau} - x_{n-\tau}^{(1+\tau)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - x_{n-\tau}^{(1)})^2 \sum_{i=1}^{n-\tau} (x_{i+\tau} - x_{n-\tau}^{(1+\tau)})^2}}, \quad (59)$$

где $R_{(\tau)}$ — коэффициенты корреляции между выбранными сечениями многолетнего ряда уровней или дебитов подземных вод, разделенных увеличивающимся интервалом времени τ ;

x_i и $x_{i+\tau}$ — средние годовые значения уровней или дебитов подземных вод в интервалы времени i и $i+\tau$;

$x_{n-\tau}^{(1)}$ и $x_{n-\tau}^{(1+\tau)}$ — среднелетние значения уровней, определенные соответственно за промежуток времени от 1-го до $n-\tau$ члена и от $1+\tau$ до n -го члена;

τ — промежуток времени или сдвиг, по которому анализируется зависимость последующего уровня или дебита от предыдущего;

n — число членов или расчетных значений ряда наблюдений.

На рис. 6 приведены примеры рассчитанных нами корреляционных функций уровней подземных вод по ряду скважин на территории СССР.

Анализ многолетних колебаний уровней подземных вод с помощью автокорреляционных функций способствует решению следующих двух взаимосвязанных задач.

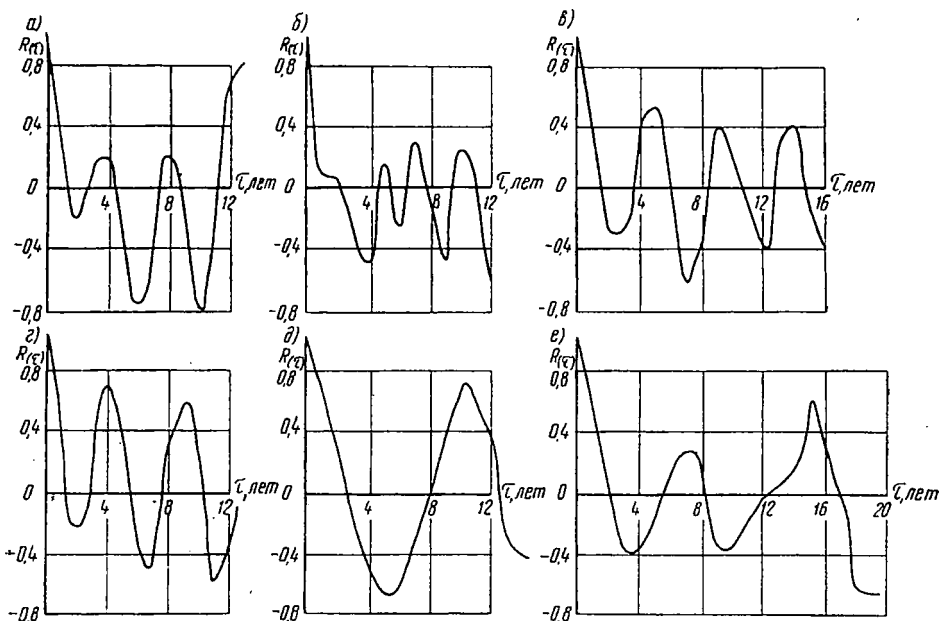


Рис. 6. Автокорреляционные функции среднегодовых уровней и дебитов подземных вод для различных районов территории СССР

а — скважина 69 (Грузия); б — скважина 66 (Ивано-Франковск); в — скважина 11 (Ленинградская обл.); г — скважина 14-135 (Житомир); д — источник 634/111 — Михайловский (Крым); е — скважина 39 (Башкирия)

1. Выявлению цикличности в колебаниях уровней. Так, по наличию на графике автокорреляционной функции точек перегиба корреляционной функции можно установить наличие ритмичности в исследуемом ряду наблюдений, а по положению положительных экстремальных значений $R_{(\tau)}$ определить длину периодов ритмов.

Цикличность можно считать достоверной, если автокорреляционная функция периодически переходит из отрицательной области в положительную и характеризуется высокими всплесками, превышающими выбранный уровень значимости. Существуют различные способы оценки уровня значимости. В качестве одного из критериев значимости могут быть приняты 90—95%-ные доверительные пределы колебаний функций, оцениваемые по формуле [32]

$$ДП_{\kappa} = \frac{-1 \pm t_{\alpha} \sqrt{n-2}}{n-1}, \quad (60)$$

где n — длина ряда;

t_{α} — распределение Стьюдента, определяемое по табл. 6.

Таблица 6

t_{α}	90%	1,9	1,83	1,80	1,77	1,75	1,74	1,72	1,71	1,70	1,65
	95%	2,37	2,46	2,20	2,16	2,15	2,11	2,08	2,06	2,04	1,96
$n-1$	—	7	9	11	13	15	17	21	25	30	∞

Если всплески R_{τ} выходят за пределы доверительных интервалов, то нулевая гипотеза (о их случайном отличии от нуля) отвергается и R_{τ} могут считаться значимыми.

Для усиления всплесков на коррелограмме с целью выделения главной цикличности, осложненной случайными близкими по частоте колебаниями, проводится повторная автокорреляция корреляционной функции либо автокорреляция сглаженных по скользящим средним значений уровней.

Корреляционная функция, экспоненциально стремящаяся к нулю (не пересекая нулевую абсциссу), свидетельствует о незакономерных (случайных) значениях членов анализируемого ряда или о наличии периодов циклов, превышающих длину анализируемого ряда.

2. Установлению степени взаимосвязанности уровней соседних лет, разделенных интервалом времени τ . Высокие коэффициенты корреляции свидетельствуют о наличии связи между уровнями или дебитами (минимальными, максимальными или среднегодовыми) лет, разделенных интервалом τ , и могут быть

использованы для прогнозов с заблаговременностью τ лет по уравнению простой парной корреляции:

$$h_{n+\tau} = \bar{h}'_n + R_\tau \frac{\sigma'_{hn-\tau}}{\sigma_{hn-\tau}} (h'_{n-\tau} - \bar{h}_{n-\tau}), \quad (61)$$

где $h_{n+\tau}$ — прогнозный уровень, отстоящий от последнего наблюдавшегося уровня h_n на τ лет;

$\bar{h}'_{n-\tau}$ и $\bar{h}_{n-\tau}$ — среднемноголетние уровни, рассчитанные по рядам длиной $n-\tau$ лет соответственно без первых и последних τ лет;

$\sigma'_{hn-\tau}$ и $\sigma_{hn-\tau}$ — среднеквадратичные отклонения уровней, рассчитанные по рядам длиной $n-\tau$ лет соответственно без первых и последних τ лет;

R — коэффициент корреляции между уровнями, отстоящими на τ лет.

Составление подобных уравнений целесообразно при $R > 0,5 \div 0,7$. Корреляционная функция позволяет правильно судить о тесноте связи членов случайной функции лишь в случае ее линейности. Сравнение корреляционных функций подземного стока и солнечной активности показывает их явную аналогию [25].

По физическому смыслу к данному методу близок метод прогноза режима подземных вод как марковского процесса первого порядка [13] (или простой цепи Маркова), определяющий зависимость каждого последующего значения уровня только от одного предыдущего его значения. Критерием марковского процесса являются высокие значения $R_{\tau=1}$.

Прогноз может выдаваться в вероятностной форме:

$$\Delta h_{n+1} = \Delta h_n \pm \sigma_M, \quad (62)$$

где Δh_{n+1} — отклонение уровня подземных вод последующего года от среднемноголетней нормы;

Δh_n — отклонение уровня подземных вод текущего года от нормы;

σ_M — среднеквадратичное отклонение ряда отклонений последующих уровней от предыдущих

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (h_{i+1} - h_i)^2}{n-1}}. \quad (63)$$

Возможная ошибка прогноза S_M оценивается по уравнению

$$S_M = \sigma_M \sqrt{1 - R_\tau^2}. \quad (64)$$

В зависимости от многолетней направленности колебаний уровней подземных вод к моменту составления прогноза может

быть также оценена наибольшая вероятность того или иного знака σ_M .

Следует заметить, что σ_M чаще всего значительно меньше σ_y рассчитываемой по уравнению (28), что также характеризует высокую взаимосвязь членов рядов уровней и расходов подземных вод.

Прогноз уровней как марковского процесса может составляться и на ряд лет вперед по уравнению

$$H_t = \pm \Delta H_0 R_{\tau=1}^t + \bar{H}_n, \quad (65)$$

где H_t — прогнозный уровень (минимальный, максимальный или среднегодовой) через интервал времени в t лет;

ΔH_0 — отклонение уровня последнего года фактических наблюдений от среднемноголетней нормы этого уровня \bar{H}_n ;

$R_{\tau=1}$ — коэффициент автокорреляции уровней для лет, разделенных интервалом времени в один год.

Однако такой прогноз во всех случаях показывает лишь постепенное приближение уровней к их норме, что с вероятностной точки зрения является действительно наиболее возможным, хотя и далеко не всегда наблюдающимся на практике.

Наличие в многолетнем режиме подземных вод ритмов различной продолжительности, наложенных друг на друга, может позволить более четко провести анализ графиков режима подземных вод с помощью стационарных спектральных функций (или спектральной плотности).

«Стационарными случайными процессами называются такие, которые имеют вид случайных колебаний, сосредоточенных вокруг некоторого среднего значения и при условии, что ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний не имеют существенных изменений во времени» [13]. Другими словами, для стационарных случайных колебаний характерно относительное постоянство как среднемноголетней нормы, так и дисперсии для различных по длине отрезков наблюдаемого ряда колебаний. Спектральное разложение таких колебательных движений показывает, какие колебания из суммы гармонических колебаний различных частот ($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_h$), из которых состоит анализируемый ряд, преобладают в данном процессе

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad (66)$$

где $S_x(\omega)$ — спектральная плотность функции;

$R(\tau)$ — корреляционная функция (при сдвиге τ).

Спектр стационарной случайной функции показывает распределение дисперсий по различным частотам, имеющим место в структуре колебаний, т. е. вклад каждой гармоники в полную дисперсию анализируемых колебаний. При этом площадь под

дисперсионным спектром равна сумме вкладов отдельных частот, т. е. равна полной дисперсии.

Существуют различные алгоритмы для расчетов спектральных функций [26], [32]. Нами для расчетов использовалась программа, применявшаяся Г. П. Калининим и А. И. Давыдовой [34], в которой спектральная функция оценивается по формуле

$$S_k = \Delta t \left[\frac{R_0}{2\pi} + \frac{1}{n} \sum_{\tau=1}^M \left(1 - \frac{\tau}{M+1} \right) R_\tau \cos(2\pi k \tau) \right], \quad (67)$$

где k — интервал сдвига ($k=0, 1, 2, \dots, M$), т. е. $k=M+1$;

$\varphi = k\Delta t\Delta f$;

Δt — интервал времени, через который расположены значения уровней или расходов подземных вод;

Δf — интервал частот, через который считается функция S_k ;

M — максимальный сдвиг;

R_0 и R_τ — автокорреляционные функции соответственно при нулевом сдвиге и сдвиге τ лет.

На рис. 7 приведены спектральные функции колебаний уровней грунтовых вод по двум скважинам, по которым видно наличие в спектре 12-летних и близких к 5- и 2-летним циклов.

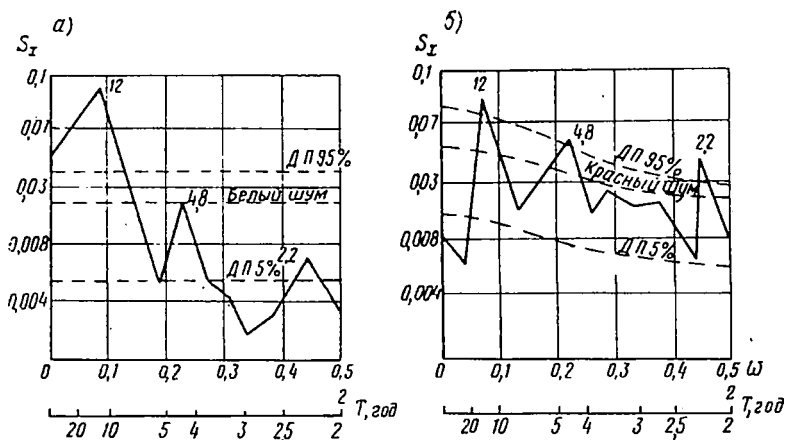


Рис. 7. Спектральные функции S_x колебаний среднегодовых уровней по скважине 6, Москва (а) и максимальных весенних уровней грунтовых вод по скважине 1/2, Горький (б)

ДП — доверительные пределы 95 и 5%-ной значимости

Число максимальных сдвигов при расчете S_k выбирается равным 10—30% длины ряда n , и поэтому спектральный анализ требует длинных рядов наблюдений. Следовательно, более приемлемым для массового анализа цикличности в режиме подземных вод является автокорреляционный анализ, где требования к максимальному сдвигу менее жестки.

Если анализируемые выборки случайны и распределение их нормально, то распределение выборочных спектральных оценок соответствует приблизительно распределению χ^2 (хи-квадрат), деленному на число степеней свободы γ , где $\gamma = 2n/M$ (по Кайслу) или $\gamma = \frac{2n - M/2}{M}$ (по Пановскому и Брайеру).

В соответствии с этим доверительные пределы для оценки спектральных функций (по Тьюки) могут быть рассчитаны по формуле

$$ДП_c = \bar{S}_k \chi_p^2 / \gamma, \quad (68)$$

где \bar{S}_k — среднее значение спектральной плотности из k значений, называемое нулевым континуумом, или белым шумом [32];

χ_p^2 / γ — табличное значение распределения, принимаемое равным $P = 5\%$ или $P = 10\%$ для нижнего предела и 90 или 95% — для верхнего.

Таблица χ_p^2 / γ для наиболее часто встречаемых значений γ приведена в приложении 1. Более полные таблицы даны в [68].

Всплески спектрограммы, превышающие верхний доверительный предел, свидетельствуют о значимости цикличности, соответствующей частоте ω , а не превышающие — лишь о тенденции к цикличности, которая может быть определена и случайными причинами. Если анализируемый ряд наблюдений существенно взаимосвязан (т. е. при значимом $R_{\tau=1}$), то нулевой континуум становится криволинейным, убывающим от высоких к низким частотам спектра и характеризующим спектр марковского процесса, или красный шум (см. рис. 7, б). Расчет такого континуума ведется по формуле

$$S_{kR}(f) = \bar{S}_k \left(\frac{1 - R_{\tau=1}^2}{1 + R_{\tau=1}^2 - 2R_{\tau=1} \cos \frac{\pi k}{M}} \right), \quad (69)$$

где $f = k\Delta t \Delta f$ (Δf — интервал частот, через который считается спектральная функция S_k).

Нестационарные ряды для анализа их ритмичности и прогнозов могут быть приведены к стационарным путем выделения из них линейного или нелинейного тренда¹. Это важно в тех случаях, когда анализируемые малые циклы колебаний уровней подземных вод (2—3-, 7—8-, 11-летние) накладываются на явно выраженные циклы много большей продолжительности (80—100-, 140- и 230-летние и др.). Последние из-за малой продолжительности наблюдений на сегодня мы не можем выделить и учесть в расчетах, но они проявляются в виде четко выраженной многолетней направленности колебательных движений уров-

¹ Под трендом понимается направленное возрастание или убывание значений временного ряда.

ня, поэтому возникает необходимость выделения этой направленности или тренда из колебаний более мелких частот. В качестве примера на рис. 8 приведены графики колебаний уровней грунтовых вод, построенные по среднегодовым значениям, и их тренды, имеющие нелинейный (а) и линейный (б) характер.

Линейный тренд может быть выявлен по уравнению $y=f(t)$, т. е. путем расчета уравнения парной корреляции между анализируемыми значениями уровней или дебитов подземных вод и их порядковыми номерами в ряду.

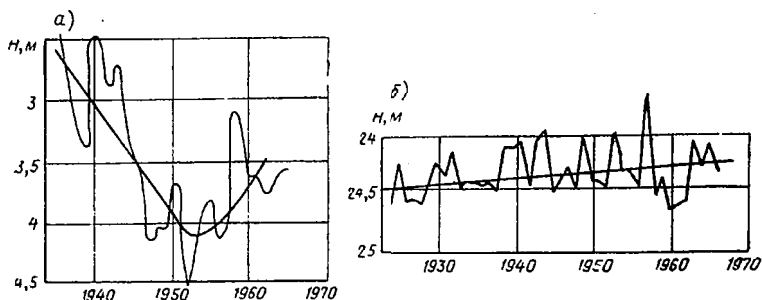


Рис. 8. Графики многолетних колебаний уровней грунтовых вод H по двум скважинам США и их тренды

Нелинейный тренд может быть охарактеризован путем сглаживания и подбора к имеющимся данным многолетних колебаний уровня подземных вод полинома вида:

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m. \quad (70)$$

После установления тренда его устраняют путем вычитания соответствующих его значений из наблюдаемых значений временного ряда, в результате чего цикличность более низкого порядка располагается уже относительно трендовой линии в виде отклонений от нее (с плюсом или минусом).

Степень полинома m , как показали расчеты В. И. Пыркина, должна выбираться в зависимости от длины ряда n , число членов которого должно быть в несколько раз (не менее 5) больше степени полинома. Чем выше степень полинома, тем больше корреляционное отношение R и меньше стандарт или ошибка S_p .

Суммируя представления о колебаниях уровней подземных вод как о сумме различных гармоник, можно наметить ряд принципиально возможных путей долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов.

1. На основе определенных параметров гармоник, выявленных тем или иным способом по уравнению (52) путем подстановки различных значений времени t .

Основной сложностью таких прогнозов является трудность достаточно достоверной аппроксимации весьма незакономерных колебаний наблюдаемых природных процессов строгими синусоидальными колебаниями. Ошибки, вызываемые такой аппроксимацией, могут достигать таких величин, что прогноз уровней, производимый по уравнению (52), может оказаться совершенно нереальным.

2. На основе выявления преобладающей цикличности в режиме подземных вод и ее экстраполяции в будущее, допуская, что она сохранится и на прогнозный период. При подобной экстраполяции цикличности генетические причины могут устанавливаться, а могут и не устанавливаться. В первом случае экстраполяция уровней или расходов подземных вод осуществляется в соответствии с прогнозными значениями основных режимобразующих факторов. Подобные прогнозы позволяют подойти лишь к приближенной количественной оценке изменений в режиме подземных вод в многолетнем разрезе. Особенно ненадежными такие прогнозы могут оказаться в периоды экстремальных значений уровней грунтовых вод. На ветвях же многолетнего их спада или подъема прогнозы среднегодовых уровней в различных случаях могут выдаваться с удовлетворительной точностью при заблаговременности до двух-трех лет и более.

3. На основе учета инерционности подземных вод, находящей отражение в автокоррелированности рядов.

4. На основе выявления многолетних тенденций (трендов) и их экстраполяции в будущее.

Прогноз режима подземных вод на основе стационарных случайных функций осуществляется с помощью линейной экстраполяционной формулы [105]

$$x_{\text{пр}}(t+m) = \alpha_1 x(t-1) + \alpha_2 x(t-2) + \dots + \alpha_n x(t-n), \quad (71)$$

где $x_{\text{пр}}(t+m)$ — прогнозное значение уровня или дебита с заблаговременностью m от момента времени t ;

α_i — коэффициенты, определяемые по системе уравнений с учетом корреляционной функции наблюдавшегося ряда;

$x(t-i)$ — значения членов ряда в промежутки времени, отличающиеся на величину сдвига τ .

Аналогичным образом можно подобрать полиномы высоких степеней, которые с достаточной точностью опишут наблюдавшиеся колебания уровней подземных вод. Однако все методы, основанные лишь на чисто математическом подборе расчетных значений (полиномов, линейных экстраполяционных формул, гармонического анализа и т. п.) к фактическим, даже при очень хорошем сопоставлении их в известном периоде не дают удовлетворительных прогнозов на неизвестный период. Лишь в условиях относительно зарегулированного режима подземных вод такие методы могут позволить составлять приближенные про-

гнозы с заблаговременностью один — три года. Наиболее перспективными из календарных вероятностно-статистических методов прогноза являются генетические, основанные на установленных многолетних закономерностях режима подземных вод, и прогнозы, основанные на инерционности и асинхронности режима подземных вод, а также невременные статистические оценки, о чем подробнее будет сказано ниже.

БАЛАНСОВЫЕ МЕТОДЫ

Балансовые методы прогнозов режима грунтовых вод основываются на решении уравнения общего водного баланса какой-то территории или балансового уравнения грунтовых вод. Отдельные элементы водного баланса оцениваются либо экспериментальным путем, либо путем гидродинамического анализа режима грунтовых вод. Первый путь развивался А. Н. Костяковым [67], М. М. Крыловым [70], А. В. Лебедевым [74, 75] и др., второй — Г. Н. Каменским [37], А. В. Лебедевым [74, 77] и др.

Применение балансовых методов составления прогнозов ограничено, так как приходится использовать прогнозные данные по атмосферным осадкам, температурам воздуха или испарению, которые не для каждого района и не всегда можно получить от гидрометеослужбы достаточно достоверными и заблаговременными. Поэтому эти методы прогнозов режима грунтовых вод более применимы в орошаемых районах, где основной приходной статьей баланса является водоподача, которую можно планировать. Однако балансовый метод может использоваться для составления приближенных прогнозов режима грунтовых вод и в естественных условиях, например для прогноза весеннего подъема уровня. Для этой цели А. В. Лебедевым [76] рассматриваются одновременно два уравнения баланса: грунтовых вод и всей почвенно-грунтовой призмы, т. е. включая зону аэрации.

Как известно [37], уравнение баланса грунтовых вод имеет вид:

$$\mu \Delta H = \frac{Q_1 - Q_2}{F} \Delta t + w \Delta t, \quad (72)$$

- где μ — водоотдача или недостаток насыщения грунтов;
 ΔH — изменение уровня грунтовых вод в выбранном для расчетов элементе потока грунтовых вод за промежуток времени Δt ;
 Q_1 и Q_2 — приток и отток грунтовых вод, поступающих в данный элемент и вытекающих из него;
 w — интенсивность инфильтрационного питания грунтовых вод сверху, выраженная слоем воды в единицу времени (сутки); положительная величина w означает пита-

ние, отрицательная — расходование грунтовых вод за счет их испарения и транспирации из зоны аэрации;

F — площадь горизонтальной проекции элемента потока.

Уравнение водного баланса всей почвенно-грунтовой призмы, ограниченной сверху дневной поверхностью, а снизу — водопором грунтовых вод, имеет вид (по А. В. Лебедеву):

$$\Delta C + n\Delta H = \left(\omega_a + \frac{Q_1 - Q_2}{F} \right) \Delta t, \quad (73)$$

где ΔC — изменение запасов влаги в зоне аэрации от дневной поверхности до зеркала грунтовых вод между начальным и конечным моментами времени, разделенными интервалом Δt , выраженное высотой слоя воды;

n — полная влагоемкость грунтов (насыщенных водой) в долях единицы объема;

ω_a — влагообмен зоны аэрации с атмосферой, выраженный слоем воды в единицу времени; положительная величина ω_a означает поступление влаги в зону аэрации за счет инфильтрации атмосферных осадков, отрицательная — испарение влаги из зоны аэрации, включая транспирацию влаги растительностью.

Совместное решение уравнений (72) и (73) позволяет получить следующие выражения:

$$\Delta H = \frac{1}{v_{об}} (\omega_a \Delta t - \omega \Delta t - \Delta C); \quad (74)$$

$$\frac{\Delta H v_{об}}{\omega_a \Delta t} = 1 - \frac{\omega \Delta t + \Delta C}{\omega_a \Delta t}, \quad (75)$$

где $v_{об}$ — объемная влажность грунтов над капиллярной каймой ($v_{об} = n - \mu$).

Остальные обозначения прежние.

Уравнения (74) и (75) позволяют приближенно прогнозировать весенний подъем уровня грунтовых вод ΔH , если на этот момент времени Δt известны влагообмен зоны аэрации с атмосферой $\omega_a \Delta t$, питание грунтовых вод сверху $\omega \Delta t$, изменение запасов влаги в зоне аэрации ΔC и объемная влажность грунтов $v_{об}$.

Имея многолетний ряд наблюдений за уровнем грунтовых вод и влажностью в зоне аэрации, можно установить в среднем процент изменения запаса влаги в пределах весеннего подъема уровня грунтовых вод $\Delta H v_{об}$ по отношению к инфильтрации талой воды в почву $\omega_a \Delta t$, т. е. определить эмпирически среднегоголетний для изучаемого участка коэффициент

$$\alpha = \frac{\Delta H v_{об}}{\omega_a \Delta t}, \quad (76)$$

откуда

$$\Delta H = \alpha \frac{\omega_a \Delta t}{v_{об}}. \quad (77)$$

После определения α задача составления прогноза сводится к правильному выбору факторов, определяющих влагообмен зоны аэрации с атмосферой, и расчету весеннего подъема уровня по уравнению (77). Так, например, для прогноза весеннего подъема уровня грунтовых вод в конце апреля — начале мая на Шемиловском стационаре ВСЕГИНГЕО А. В. Лебедев принял

$$\omega_a \Delta t = N_{XI-III} - U_{XI-III} - U_{IV},$$

где N_{XI-III} — атмосферные осадки с ноября предшествующего года по март включительно текущего года;

U_{XI-III} — испарение осадков с поверхности земли за зимний период (рассчитанное, например, по графикам Б. В. Полякова или другими методами);

U_{IV} — испарение с поверхности земли за апрель (также расчетное в зависимости от средней суммы осадков и среднемесячной температуры в апреле, взятой по прогнозу гидрометеослужбы).

Поверхностный сток на изучаемом участке практически отсутствует и поэтому не учитывался. Осадки за апрель для средних по влажности лет также не учитывались, так как они не велики и в основном расходятся на испарение. Расчеты за многолетие проводились по уравнению (73), $v_{об}$ составила 13,7%, $\alpha = 0,4$. Подставив эти значения в уравнение (77), прогноз рассчитывали по формуле

$$\Delta H = 2,92 (N_{XI-III} - U_{XI-III} - U_{IX}).$$

Правильный выбор факторов, определяющих весенний подъем уровня грунтовых вод, может обеспечить высокую достоверность его прогноза (с ошибкой менее 10%) при условии достоверности гидрометеорологических прогнозов о возможных осадках и температурах воздуха на период снеготаяния (или на период заблаговременности прогноза).

Второй рассмотренный А. В. Лебедевым [76] более универсальный способ прогноза весеннего уровня грунтовых вод, позволяющий непосредственно учитывать большинство приходных и расходных статей баланса (а не косвенно через коэффициент α) и в том числе изменение влагозапасов в зоне аэрации, основан на составлении водного баланса почвенно-грунтовой призмы в следующем виде:

$$N + \Sigma U \Delta t + C_n = \Sigma U_a \Delta t + v + v' + \Pi_{п.в} + \omega \Delta t, \quad (78)$$

где N — эффективные атмосферные осадки (определяющие размеры инфильтрации), выпавшие в виде дождя и снега с начала наступления низких температур (октябрь — ноябрь), т. е. с момента, когда их испарение уже не ве-

лико, до начала снеготаяния (например, до середины марта);

$\Sigma U \Delta t$ — суммарное испарение грунтовых вод (точнее их дистилляция в зону аэрации) за весь выбранный календарный период, определяемое методом конечных разностей на основе наблюдений по створу из трех скважин (для плоского потока);

C_{II} — начальный (в октябре-ноябре) запас влаги в зоне аэрации от дневной поверхности до капиллярной каймы;

$\Sigma U_a \Delta t$ — испарение влаги из зоны аэрации за период с октября до установления устойчивого снегового покрова, определяемое балансовым методом по ежемесячным наблюдениям за влажностью пород зоны аэрации;

v — испарение осадков с поверхности земли, определяемое приближенно за весь расчетный период (октябрь — март включительно);

v' — испарение с дневной поверхности за период снеготаяния и подъема уровня грунтовых вод (за апрель), определяемое также по графикам Б. В. Полякова при наличии данных о среднемесячных осадках и температурах воздуха;

$\Pi_{п.в}$ — предельная полевая влагоемкость пород зоны аэрации, определяемая в прошедшие годы по наблюдениям за влажностью непосредственно после окончания инфильтрации талых снеговых вод и просачивания их до грунтовых вод;

$\omega \Delta t$ — питание грунтовых вод весной при подъеме уровня (в слое воды).

В данном случае, так же как и в предыдущем, допускается, что апрельские осадки не успевают просачиваться в почву и испаряются. В противном случае они должны войти в левую часть уравнения как прогнозная величина или величина, равная среднесезонной норме осадков за апрель. Определив по уравнению (78) величину $\omega \Delta t$, прогнозное повышение весеннего уровня грунтовых вод ΔH рассчитывают по уравнению (72), для чего необходимо знать недостаток насыщения пород в зоне колебаний уровня μ и возможную разность между притоком и оттоком подземных вод $\frac{Q_1 - Q_2}{F} \Delta t$, которая в соответствующий период может быть принята по аналогии с таковой в предыдущие годы. Величины осадков и испарения также могут быть приняты в расчет в виде их характерных значений для аналогичных по водности лет.

МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

В тех случаях, когда по каким-либо причинам исключена возможность составления прогнозов режима подземных вод на основании сравнительно точных методов (аналитических, вари-

ционно-статистических или балансовых), прогнозы могут строиться на основе гидрогеологической аналогии. Составление подобных прогнозов основывается на общих гидрогеологических закономерностях и может производиться двумя способами: 1) составлением прогнозов во времени и в пространстве; 2) комбинированием прогнозов во времени и в пространстве.

Под методами аналогии нередко понимаются различные по подходу и степени достоверности способы приближенных оценок колебаний уровней подземных вод.

Некоторые из них относятся к собственно методам аналогии, когда, например, для прогноза режима подземных вод какого-либо года подбирается год-аналог по степени водности из числа наблюдавшихся ранее лет с имеющимися данными по режиму подземных вод (аналогия во времени) или когда режим грунтовых вод какого-либо участка, где наблюдений раньше не проводилось, характеризуется по материалам наблюдений на другом участке, сходном в гидрогеологическом отношении с первым (аналогия в пространстве).

Другие способы приближенных оценок относятся скорее к методам экстраполяции во времени или в пространстве, например экстраполяция колебаний уровней на будущее при сохранении каких-либо условий, отмеченных ранее (темп спада, амплитуда и период цикличности и т. п.), или экстраполяция характеристик режима подземных вод в пределах какой-то однородной по геологическому строению и гидрогеологическим условиям территории по имеющимся единичным наблюдательным точкам.

Точность всех таких прогнозов невелика, однако последняя группа прогнозов может рассматриваться как более достоверная.

Применение метода аналогии для прогнозов режима подземных вод рекомендовалось многими авторами [59, 66, 84 и др.].

Приведем некоторые примеры возможного применения метода гидрогеологических аналогий для прогноза режима грунтовых вод.

1. Наблюдая в пределах какого-либо промежутка времени темп спада уровня или дебита подземных вод и предполагая в результате анализа природных условий невозможность резкого его изменения за счет какого-либо питания подземных вод, можно прогнозировать по данному темпу спада уровень на один-два месяца вперед.

Одним из вариантов такого метода прогнозов является метод Мак-Ниша, применяемый для прогнозов солнечной активности [14]. В основу метода положены следующие предпосылки: а) оценкой какого-то будущего значения уровня при сравнительно циклических колебаниях является среднее из всех прошлых значений для той же фазы; б) отклонение прогнозного значения от этого среднего пропорционально отклонениям более ранних

значений этого же цикла от соответствующих их средних. Отсюда можно записать:

$$H_n = \bar{H}_n + k\Delta H_{n-1}, \quad (79)$$

где H_n — прогнозируемый уровень какого-либо фиксированного месяца периода спада или минимальный уровень;
 \bar{H}_n — среднемноголетнее значение этого же уровня;
 ΔH_{n-1} — отклонение какого-либо предшествующего наблюдаемого уровня от его среднемноголетней нормы в пределах того же периода спада;
 k — прогностический коэффициент, отражающий соотношение отклонений от норм уровней в фазах n и $n-1$ за период предшествующих наблюдений.

2. Установив в предыдущие годы зависимость соотношения амплитуд колебаний уровней грунтовых вод $\Delta h_{\text{гр. вод}}$ и воды в реке Δh_p в период паводка от расстояния наблюдательных скважин до реки, можно затем, зная амплитуду колебания уров-



Рис. 9. Графики зависимости отношений амплитуд колебаний уровней грунтовых вод и воды в реке $\Delta h_{\text{гр. вод}}/\Delta h_p$ от расстояния наблюдательных скважин до реки
 а — р. Куберле (суглинок); б — р. Ангара (пески с галькой); в — р. Печора (пески с галькой)

ней воды в реке, определить по графикам, аналогичным изображенным на рис. 9, амплитуды колебаний уровней подземных вод не только в наблюдательных скважинах, но и в любом месте между ними, а также на соседних участках, имеющих сходное гидрогеологическое строение с участком наблюдательного створа (аналогия во времени и в пространстве). Подобным образом можно составить графики зависимостей уровней или амплитуд колебаний уровня подземных вод от расстояния до реки для разных по водности лет.

3. Прогнозируя время наступления максимальных уровней подземных вод, вызванных их подпором со стороны реки, можно составить графики зависимостей времени отставания пика (максимальных уровней) подземных вод для разноудален-

ных от реки наблюдательных скважин от соответствующего пика уровней воды в реке.

Учитывая то, что скорость передачи подпора зависит не только от фильтрационных свойств водоносного горизонта k/μ , которые могут быть приняты постоянными во времени, но и от величины подпора Δh , особенно если эта величина соизмерима с мощностью водоносного горизонта, такие графики можно составлять для разных по водности лет (рис. 10) или для разных амплитуд подпора через определенные выбранные интервалы. Составление указанных выше графиков позволит в ряде случаев (как видно из приведенного примера) прогнозировать время

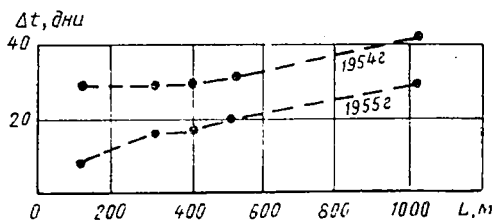


Рис. 10. График зависимости отставания времени наступления максимальных уровней грунтовых вод Δt от расстояния L наблюдательных скважин до р. Волги по отношению ко времени пика паводка (по материалам Средневолжской гидрогеологической станции)

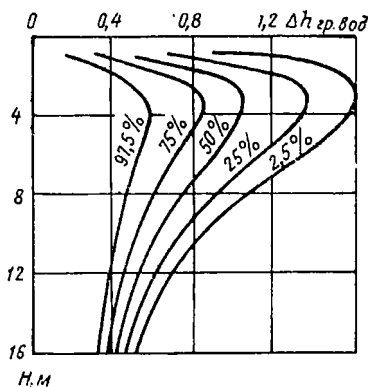


Рис. 11. График зависимости амплитуд колебаний уровней грунтовых вод $\Delta h_{гр.вод}$ различной обеспеченности от глубины залегания грунтовых вод H от поверхности земли

наступления максимальных уровней подземных вод и их величины с заблаговременностью до полутора месяцев.

4. Составив графики зависимостей амплитуд колебаний уровней грунтовых вод за весенний период их питания от мощности зоны аэрации [46], можно дать прогноз весеннего подъема уровня грунтовых вод по скважинам или целым территориям, наблюдения за режимом подземных вод в которых вообще не проводились (при условии, что известны глубины залегания грунтовых вод в этих скважинах и что они располагаются в одинаковых гидрогеологических условиях с теми, по которым были установлены подобные зависимости). Такие графики могут строиться по многолетним данным в процентах отклонений от среднееголетних норм или в обеспеченностях уровней через определенные интервалы, удобные для практических целей (рис. 11).

5. Выбирая скважины-аналоги на основе типизации режима грунтовых вод по основным видам и разновидностям режима [45, 54] и основываясь на гидрогеологическом районировании

территорий по условиям формирования режима грунтовых вод, можно не только прогнозировать амплитуды колебаний уровней грунтовых вод и определять сроки наступления минимумов и максимумов во вновь пробуренных скважинах или в скважинах с ограниченным периодом наблюдений, но и экстраполировать результаты прогноза режима подземных вод на широкие площади, т. е. картировать данные по прогнозу режима подземных вод. Таким образом, точечные прогнозы (по каждой репрезентативной скважине) могут распространяться на определенную площадь, характеризующую соответствующим видом и разновидностью режима.

В качестве прогнозных значений, полученных методом аналогии, могут рассматриваться и некоторые самые общие статистические характеристики результатов многолетних наблюдений за режимом подземных вод. Такими значениями могут быть средние многолетние значения уровней грунтовых вод по отдельным месяцам, среднемноголетние значения максимальных, минимальных и среднегодовых уровней. Данные характерные точки могут быть получены либо простым аналитическим расчетом, либо как среднемедианные значения, либо путем графической обработки результатов наблюдений, представляемых в виде гистограмм, графиков распределения или типовых графиков по характерным данным, построенных отдельно для периодов многолетнего спада или подъема по способу, предложенному Н. Д. Добровольской [24].

В связи с тем, что ряды наблюдений за режимом подземных вод в большинстве случаев короткие, все указанные выше параметры (средние годовые, минимальные или максимальные) с течением даже ограниченного времени могут существенно изменяться. Поэтому расчеты этих величин по имеющемуся в наличии ряду наблюдений могут также рассматриваться как прогноз.

6. Сопоставляя величины атмосферных осадков или поверхностного стока с их нормами, можно выбрать из имеющегося длинного ряда наблюдений за режимом подземных вод год-аналог, на основании которого можно определить прогнозные величины основных прогнозируемых элементов режима подземных вод. Подобным же образом могут быть выбраны типичные графики колебаний уровней или дебитов подземных вод для лет разной обеспеченности и по ним дан приближенный прогноз уровней в текущем году.

В частности, построив по имеющимся данным графики обеспеченности и экстраполировав по ним прямые или кривые линии, можно таким образом составить прогноз о возможных значениях низких (95, 97, 99) или высоких (5, 3, 1) уровней (в процентах их обеспеченности), а также прогноз возможных амплитуд колебаний уровней подземных вод с различной обеспеченностью.

7. К методу аналогии можно также отнести и визуальное сопоставление многолетних циклических колебаний уровней

подземных вод с аналогичными колебаниями определяющих эти изменения факторов, т. е. с колебаниями атмосферного давления, солнечной активности, атмосферной и стратосферной циркуляции ветров, геомагнитной возмущенности Земли, поверхностного стока, температур воздуха и т. д. Выявив цикличность в указанных выше режимобразующих факторах и установив по предшествующему периоду наблюдений связь между факторами и уровнями подземных вод, можно, экстраполировав данную цикличность, дать примерный прогноз режима подземных вод на будущее, считая, что цикличность колебаний уровней или дебитов подземных вод так же, как и определяющих их режимобразующих факторов, будет в прогнозируемый период аналогична наблюдавшейся.

Существующим в настоящее время методам прогнозов естественного режима уровня грунтовых вод посвящено достаточно много работ, и гидрогеологи обладают довольно разнообразными методами прогнозов, часть из которых разработана сравнительно хорошо, другая требует значительного развития и совершенствования (балансовые и статистические), а некоторые методы прогноза практически не разработаны и охарактеризованы как принципиально возможные.

**ПРОГНОЗЫ МИНИМАЛЬНЫХ ГОДОВЫХ УРОВНЕЙ
И ДЕБИТОВ ГРУНТОВЫХ ВОД****ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И НЕКОТОРЫЕ
ОБЩИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗОВ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ И ДЕБИТОВ ГРУНТОВЫХ ВОД**

С учетом проведенных ранее работ [54] и выполненного на основе этих работ районирования территории по условиям формирования режима грунтовых вод оказалось возможным разделить территорию СССР на три гидрогеологические провинции с принципиально различными типами режима грунтовых вод (рис. 12).

I. Провинция с распространением многолетнемерзлых пород, характеризующаяся кратковременным летним питанием грунтовых вод и их промерзанием в зимний период (за исключением прилегающих к речным долинам зон таликов и зон разгрузки глубокозалегающих подмерзлотных напорных или межмерзлотных подземных вод).

II. Провинция с сезонным (зимним) устойчивым промерзанием верхней части зоны аэрации, характеризующаяся в основном весенним питанием грунтовых вод.

III. Провинция со спорадическим промерзанием зоны аэрации или с полным отсутствием ее промерзания, характеризующаяся главным образом зимним питанием грунтовых вод.

В зависимости от приуроченности наблюдательных скважин к выделенным выше провинциям характер экстремальных уровней на графиках режима грунтовых вод бывает различным.

В первой провинции минимальные уровни грунтовых вод наблюдаются в период наступления отрицательных температур осенью, когда зона аэрации уже начала промерзать. Питание грунтовых вод в это время отсутствует, и поэтому их уровни постепенно снижаются за счет разгрузки вод в реки. Увеличение глубины промерзания зоны аэрации приводит, наконец, к постепенному промерзанию и грунтовых вод. В соответствии с этим, чем выше температура осеннего периода и, следовательно, чем дольше процесс промерзания зоны аэрации, тем больше период спада уровня (разгрузки) грунтовых вод и тем ниже их наблюдаемый уровень.

В процессе весеннего оттаивания зоны аэрации и грунтовых вод последние пополняются не только за счет влаги, сохранившейся в зоне аэрации с осеннего периода, но и за счет инфильтрации талых вод. Поэтому даже самые первые наблюдения за уровнями оттаивающего водоносного горизонта в первой

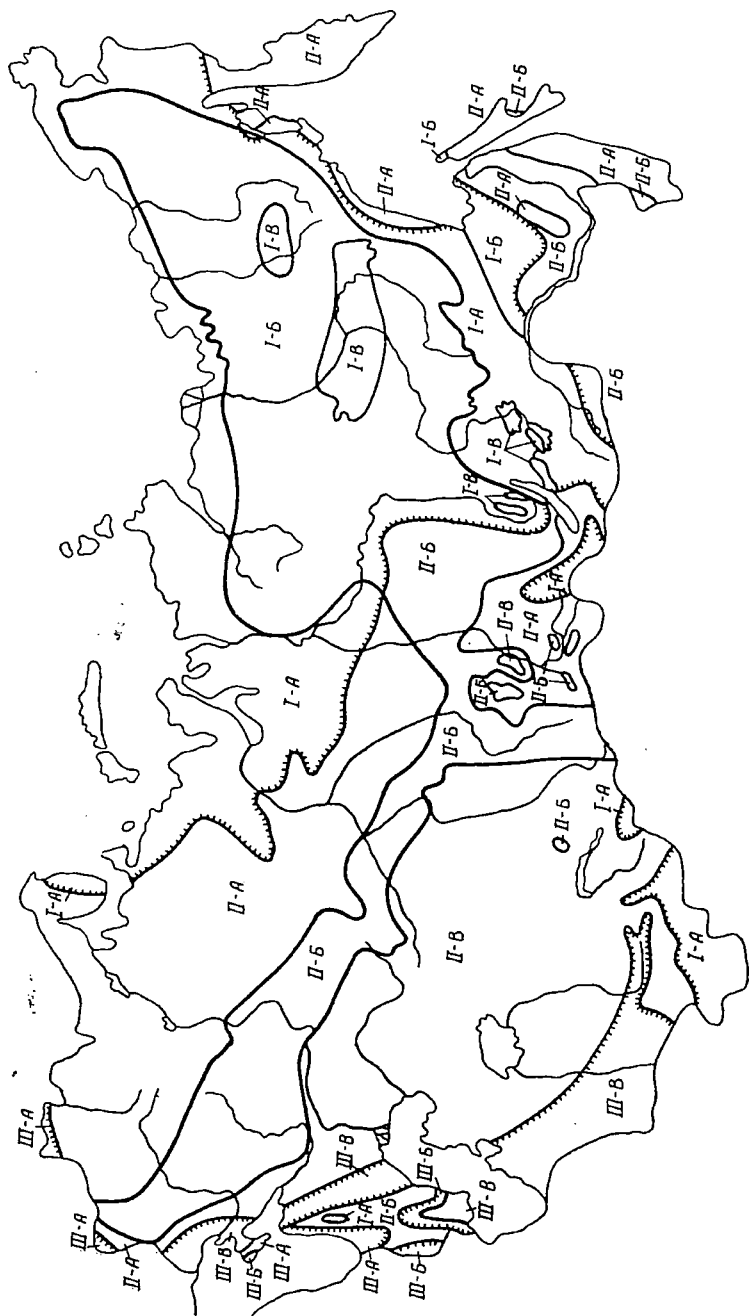


Рис. 12. Схема районирования территории СССР по типам естественного режима грунтовых вод

т и п ы р е ж и м а: I — кратковременного, преимущественно летнего питания; II — сезонного, преимущественно всесезонного и осеннего питания; III — круглогодичного, преимущественно зимнего питания и од т и п ы р е ж и м а: I-A; II-A; III-A — обильного питания; I-B; II-B; III-B — умеренного питания; I-В; II-В; III-В — скудного питания

провинции чаще всего фиксируют уже начавшийся неуклонный подъем грунтовых вод.

- Последнее обстоятельство осложняется еще и тем, что промерзание зоны аэрации вдоль ствола скважины увеличивается, и поэтому вода в стволе наблюдательной скважины весной появляется спустя некоторое время после начала оттаивания водоносного горизонта. В результате даже самых ранних весенних замеров уровней видно, что они располагаются выше минимальных осенних уровней.

В период промерзания водоносного горизонта в его режиме также не удастся наблюдать каких-либо изменений, так как вода в стволе скважины замерзает быстрее, чем в водоносном горизонте, и поэтому смыкание мерзлоты, появление напора в грунтовых водах и подъемы уровней напорных вод в период смыкания мерзлоты могут быть вскрыты лишь специальными датчиками, установленными в затампонированных скважинах. Типичные графики режима грунтовых вод для первой провинции аналогичны изображенным на рис. 13, а и б.

Весенний максимум в первой провинции формируется в результате инфильтрации талых вод и жидких осадков, выпадающих в период снеготаяния. Из-за резко континентального климата, характерного для центральных и южных районов данной провинции, жидкие летние осадки не приводят к изменению режима грунтовых вод (за исключением заболоченных и переувлажненных земель), так как они невелики и вследствие высокого дефицита влажности воздуха расходятся на испарение с поверхности земли и из зоны аэрации, не достигая грунтовых вод и не осложняя летне-осеннего спада уровня. Следовательно, основными факторами, формирующими минимальное осеннее положение уровня грунтовых вод, являются величина максимального весеннего уровня грунтовых вод, устанавливающая начальную точку независимого спада уровня, и осенне-зимние отрицательные температуры, определяющие момент замерзания грунтовых вод или конечную точку спада их уровня.

Не редки случаи, особенно в северных районах страны, когда из-за низких температур воздуха в летний период атмосферные осадки испаряются незначительно и растягивают процесс питания на весь летний период. Максимум уровней и дебитов в таких случаях наблюдается лишь в конце лета — осенью (август-сентябрь), после чего начинается осенне-зимний спад уровней с промерзанием водоносного горизонта в декабре-январе, когда и наблюдается годовой минимум уровней. Положение этого минимума в данном случае зависит в основном от осеннего максимума.

Растянутые периоды подъема уровней и сдвинутые на осень максимальные годовые уровни подземных вод наблюдаются и в глубокозалегающих подземных водах (межмерзлотных и подмерзлотных).

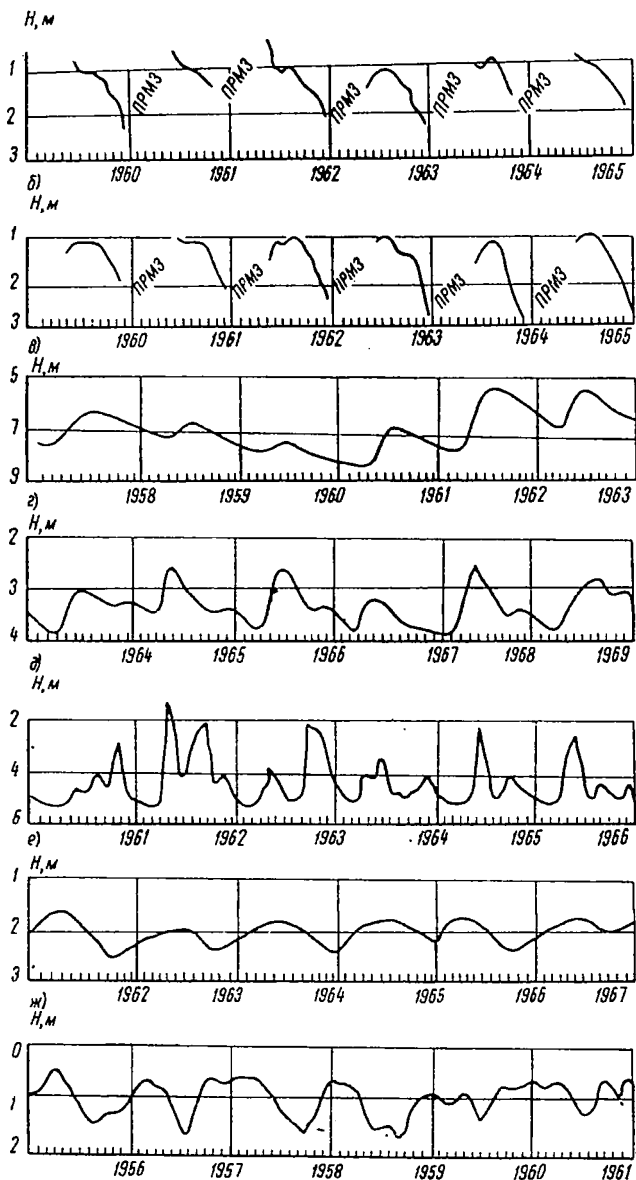


Рис. 13. Типичные графики колебаний уровней грунтовых вод H для различных провинций территории СССР
 а, б — I провинция (скважины 1 и 9, Магаданская обл.); в, г, д — II провинция (скважина 221, Среднее Поволжье; скважина 253, Башкирия; скважина 2, Приморье); е, ж — III провинция (скважина 337, Дагестан; скважина 34, Литва); п/рмз — промерзание

Вторая провинция охватывает большую часть территории СССР и характеризуется устойчивым промерзанием верхней части зоны аэрации в зимний период без промерзания грунтовых вод. Наличие промерзшей зоны аэрации и отрицательных температур воздуха обуславливает накапливание твердых осадков на поверхности земли и отсутствие питания подземных вод в этот период. В связи с этим запасы подземных вод, образовавшиеся в водоносном горизонте к осеннему периоду, постепенно расходуются (в течение всего зимнего периода за счет стока в поверхностные водотоки и водоемы), определяя тем самым наличие наиболее характерного для данной провинции предвесеннего минимального уровня или дебитов грунтовых вод. Испарение подземных вод в этот период ничтожно мало, хотя некоторое количество влаги под влиянием термодиффузии передвигается по направлению от зеркала грунтовых вод к промороженной верхней части зоны аэрации, уменьшая тем самым запасы подземных вод и увеличивая запасы влаги в зоне аэрации.

При наличии взаимосвязи грунтовых и напорных вод на вододелительных участках грунтовые воды могут перетекать в ниже лежащие водоносные горизонты, а в долинах, наоборот, — подпитываться напорными. Величина этого перетекания в естественных условиях изменяется незначительно, поэтому при прогнозах режима подземных вод ею в большинстве случаев можно пренебречь.

В ряде случаев независимость стока может нарушаться временным подпитыванием подземных вод во время оттепелей, число и продолжительность которых с севера на юг и с востока на запад возрастают. Следовательно, основными факторами, формирующими прогнозную величину предвесеннего минимального уровня грунтовых вод или дебитов источников, являются осенние уровни грунтовых вод на момент перехода температур воздуха через 0°C , определяющие сформировавшиеся к началу независимого спада уровня запасы подземных вод, и суммарные положительные температуры воздуха за зимние месяцы, обуславливающие наличие оттепелей или их продолжительность, т. е. число дней с положительными температурами.

Для большей части территории второй провинции, и особенно для ее южной половины, предвесенний минимум является единственным минимумом в году, так как летние и даже осенние осадки расходуются на испарение, не достигая грунтовых вод, и сказываются лишь в уменьшении темпа спада уровней грунтовых вод. Таким образом, период независимого спада уровня начинается с максимального весеннего уровня грунтовых вод предшествующего года и продолжается до предвесеннего минимума последующего года (рис. 13, в). При залегании грунтовых вод (менее 2 м в рыхлых отложениях и независимо от глубины в сильно трещиноватых породах) в зоне избыточного и реже умеренного увлажнения осенние осадки вызывают много меньший, чем ве-

сенний, но все же существенный подъем уровня грунтовых вод в сентябре—декабре. В таких случаях помимо предвесеннего минимума может быть зафиксирован четкий летний или летне-осенний (сентябрь—октябрь) минимум (рис. 13, *г*). Аналогичный характер имеет режим подземных вод в районах таликов в пределах первой провинции.

Одним из основных факторов, определяющих летне-осенний минимум, является также предшествующий максимальный весенний уровень или дебит подземных вод. Однако из-за малых глубин залегания грунтовых вод существенную роль в их балансе играют летние осадки и испарение, определяемое летними и весенними температурами и дефицитом влажности воздуха.

В северных и восточных (Восточная Сибирь, Дальний Восток) районах вследствие более сдвинутого во времени начала весеннего подъема уровней (иногда до мая—июня) процесс питания грунтовых вод растягивается и максимальные весенние уровни наблюдаются уже осенью.

Наиболее динамичным режимом грунтовых вод в данной провинции характеризуются районы с муссонным климатом (Приморье), где питание, помимо основных (весеннего и осеннего) периодов, происходит практически все лето. Более того, интенсивность питания грунтовых вод осенью в отдельные годы даже превышает весеннее питание (рис. 13, *д*).

Третья провинция охватывает лишь самую южную и частично западную часть территории СССР (см. рис. 12), на которой зона аэрации практически не промерзает. Наличие низких температур, резко снижающих величину испарения, и выпадение основной массы годовых осадков в зимний период приводят к интенсивному питанию грунтовых вод именно в это время. В соответствии с этим максимальные уровни грунтовых вод в третьей провинции наблюдаются в конце зимы, а иногда и в пределах всего холодного периода года (декабрь—апрель), после чего на большей части территории начинается постепенный спад уровня, продолжающийся до конца лета. Летние осадки расходуются только на испарение, и основными статьями баланса грунтовых вод в это время являются сток (там, где он имеется) и испарение. Исключение составляют районы с избыточным увлажнением (Рионская низменность), где обильные атмосферные осадки питают неглубоко залегающие грунтовые воды и летом. Тем не менее минимальные уровни грунтовых вод и дебиты источников здесь так же, как и в других районах, относящихся к третьей провинции, наблюдаются один раз в году — в конце лета (рис. 13, *д, е*). Основными факторами, формирующими эти минимумы, так же как и для предыдущей провинции, являются зимние осадки, определяющие максимальные зимние уровни, а также летние температуры и дефицит влажности воздуха, устанавливающие характер и интенсивность спада уровней летом.

В данном разделе мы рассмотрели лишь основные характеристики режима грунтовых вод на территории СССР. Размеры амплитуд колебаний уровней грунтовых вод, темпы их спада, а также время наступления экстремальных уровней в каждом конкретном случае могут быть различны. Это зависит прежде всего от величины мощности зоны аэрации, ее литологического строения, фильтрационных свойств пород водоносного горизонта, степени залеженности и расчлененности рельефа, удаленности наблюдательного пункта от области питания или разгрузки водоносного горизонта и от других факторов, определяющих размеры поверхностного стока, процент инфильтрации атмосферных осадков, интенсивность дренирования водоносного горизонта и баланс грунтовых вод в целом. Эти же факторы объясняют и известную инерционность водоносного горизонта как гидравлической системы, определяющую запаздывание наблюдаемых изменений в режиме подземных вод по сравнению с соответствующими изменениями в области питания водоносного горизонта (что особенно характерно для родников) или в области разгрузки (что характерно для приречных зон, где режим подземных вод формируется под влиянием режима поверхностных водотоков).

Вместе с тем во всех рассмотренных выше случаях можно четко выделить три минимальных положения уровней или дебитов источников: предвесенний, летне-осенний и зимний минимумы. Учитывая различия в факторах, формирующих эти минимумы, рассмотрим возможные методы прогнозов каждого из них.

ПРОГНОЗЫ ПРЕДВЕСЕННЕГО МИНИМУМА

Предвесенние минимумы во многих случаях формируются только в результате подземного стока, не осложненного питанием подземных вод. Поэтому их прогнозы могут осуществляться аналитическим методом на основе уравнений (1), (2), (5) или (7). Апробация этих методов показывает довольно высокую сходимость прогнозных и фактических уровней (рис. 14) и дебитов подземных вод даже при весьма большой (до 10 месяцев) заблаговременности прогноза.

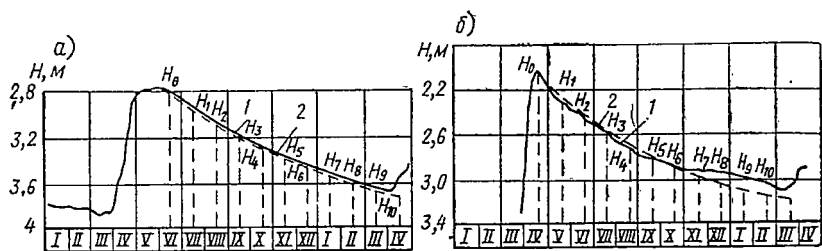


Рис. 14. График фактических 1 и расчетных 2 уровней грунтовых вод по скважинам Подмосковья

а — скважина 19 ($\alpha = 0,0045$); б — скважина 26 ($\alpha = 0,008$)

Применение аналитических методов целесообразно особенно тогда, когда использование вероятностно-статистических методов невозможно. Так, при наличии даже одного-трех лет наблюдений уже можно установить характер спада уровней, определить типичные коэффициенты истощения водоносных горизонтов и использовать их для прогнозных расчетов. Расчетное время Δt можно определить по аналогии по другим скважинам района, располагающимся в сходных гидрогеологических условиях. При сравнительно длительных наблюдениях, отмечавших систематический спад уровней грунтовых вод, обусловленный устойчивым промерзанием зоны аэрации, расчетное время прогноза Δt (в сутках) может быть определено как разность между датой осеннего перехода положительных температур через 0°C , т. е. датой составления прогноза, и среднемноголетней датой наступления минимального предвесеннего уровня. Снижение уровня или дебита подземных вод имеет экспоненциальный характер, поэтому ошибка во времени наступления минимума в ± 5 и даже ± 10 суток не дает существенных ошибок в абсолютных значениях прогнозных минимальных уровней.

Среднемноголетнюю дату или декаду наступления предвесеннего минимума лучше всего выбирать по гистограммам распределения времени наступления минимума за многолетие (рис. 15), позволяющим не только определить наиболее вероятное время наступления этого минимума, но и охарактеризовать возможный разброс значений времени наступления минимума.

Уравнения (1), (2), (5) и (7) могут быть использованы не только для определения предвесеннего минимума, но и для составления прогнозов уровня грунтовых вод или дебитов источников на любой промежуток времени в пределах независимого спада.

Апробация нами рассмотренного ранее метода Мак-Ниша показала его приемлемость для прогнозов минимальных предвесенних уровней грунтовых вод с заблаговременностью до двух-трех месяцев. Особенно хорошие результаты прогнозов с помощью данного метода получаются при сравнительно синусоидальных внутригодовых колебаниях уровней подземных вод при достаточно глубоком (свыше 5 м) залегании грунтовых вод.

Зависимость минимальных предвесенних уровней грунтовых вод или дебитов источников от осенних или зимних уровней или дебитов, фиксируемых в начале независимого спада, можно выразить также в виде графической корреляционной связи, используя данные многолетних наблюдений за уровнями или дебитами грунтовых вод (рис. 16). Для районов, где независимый спад уровня не нарушается инфильтрацией во время зимних оттепелей, данная зависимость представляет собой почти прямую линию. В качестве предшествующих осенних или зимних уровней в различных случаях могут быть приняты: 1) максимальные осенние уровни или дебиты при наличии четкого осеннего пика;

2) осенние уровни или дебиты, зафиксированные в момент устойчивого перехода температур воздуха через 0°C , что может служить гарантией начала независимого спада уровней; 3) зимние уровни на любую выбранную дату (например, на 1/1 каждого

Рис. 15. Гистограммы времени наступления предвесеннего минимума по скважине 2 Горьковской гидрогеологической станции (а) и по скважине 26 Московской гидрогеологической станции (б)

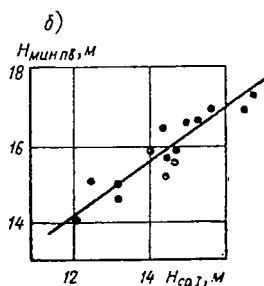
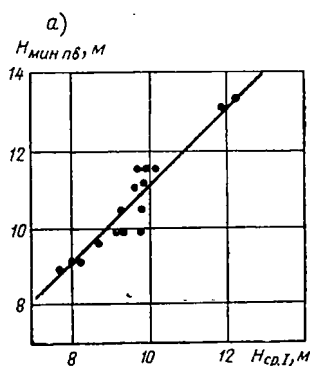
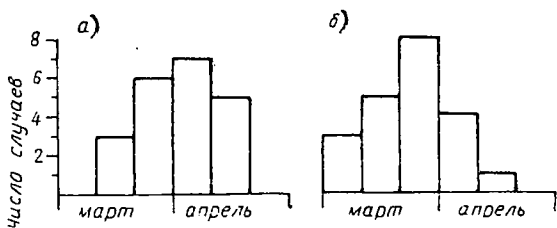
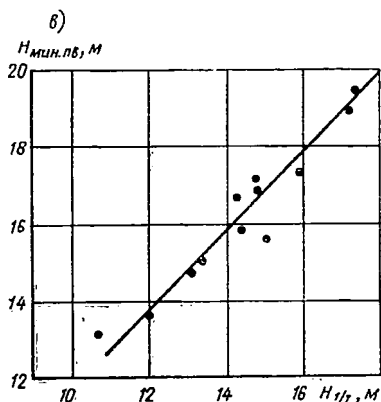


Рис. 16. Графики зависимости предвесенних минимальных уровней грунтовых вод $H_{мин.п.в}$ по скважинам северо-запада СССР от предшествующих зимних уровней $H_{1/I}$

$$\begin{aligned} \bar{a} - y &= 0,639x + 2,68, & r &= 0,78, \\ \bar{S}/\sigma &= 0,625 & (\text{скважина } 5/1-1); \\ \bar{b} - y &= 1,157x - 0,69, & r &= 0,72, \\ \bar{S}/\sigma &= 0,676 & (\text{скважина } 8/2-2); \\ \bar{в} - y &= 0,851x + 0,98, & r &= 0,93, \\ \bar{S}/\sigma &= 0,115 & (\text{скважина } 1/3-3) \end{aligned}$$



года) или среднемесячный уровень какого-либо зимнего месяца (например, января).

При использовании последнего варианта нет необходимости отыскания дат устойчивого перехода температур через нуль, что за многолетие не всегда легко сделать, и появляется возмож-

ность учитывать при корреляции наиболее поздние сведения об уровнях грунтовых вод, в которых уже нашли отражение возможные нарушения независимости спада в результате оттепелей. Связи предвесеннего минимума с зимними уровнями бывают, как правило, более тесными, чем с осенними. Более того, теснота связи возрастает с уменьшением заблаговременности прогноза. Так, при заблаговременности один-два месяца коэффициенты корреляции зависимостей предвесеннего минимума от предшествующего уровня достигают 0,9—0,95. При увеличении заблаговременности до трех—пяти месяцев коэффициенты корреляции указанных парных связей уменьшаются до 0,7—0,85 и т. д. При этом увеличивается и величина ошибки прогнозов. В качестве примера можно привести зависимость предвесеннего минимального уровня грунтовых вод по одной из скважин Москвы, фиксируемого в конце марта — начале апреля, от среднемесячных уровней января, декабря, ноября и максимального уровня (май) предыдущего года (рис. 17). Наиболее высокие коэффициенты корреляции перечисленных выше парных связей отмечаются в

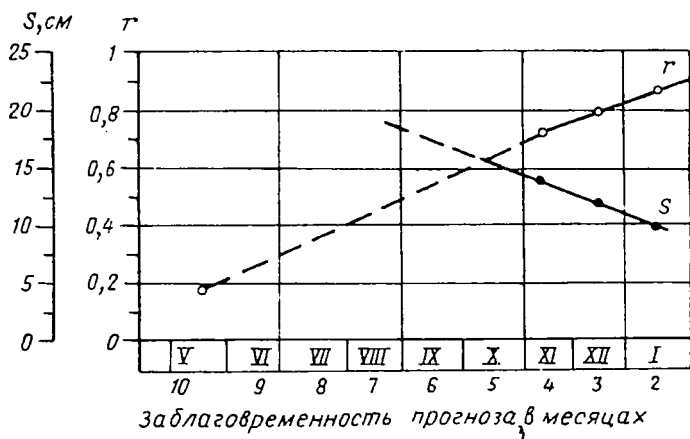


Рис. 17. График зависимости величины коэффициентов корреляции r и ошибок прогнозов предвесенних уровней S от времени составления прогноза (от заблаговременности составления прогноза)

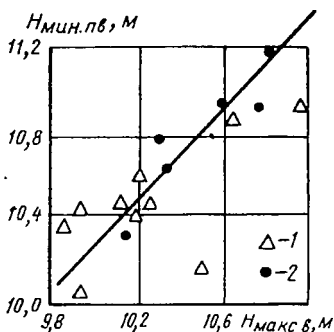
районах с резко континентальным климатом при глубинах залегания грунтовых вод выше 3—5 м.

При отсутствии осеннего питания, когда спад уровня начинается сразу после весеннего подъема уровня и продолжается в течение всего года вплоть до нового весеннего подъема, прогноз предвесеннего минимального уровня можно давать с еще большей заблаговременностью, установив связь между максимальными весенними уровнями предыдущего года и минимальными предвесенними уровнями последующего года (рис. 18). Боль-

шие отклонения отдельных точек от линии регрессии обусловлены наличием эпизодического питания грунтовых вод осенью. В остальные же годы даже небольшое подпитывание грунтовых вод (эти годы обозначены треугольниками) не нарушает общей довольно закономерной связи. Лишь систематическое питание грунтовых вод осенью резко нарушает тесноту связи, не позволяя использовать ее для прогнозов.

Рис. 18. Графики зависимости предвесеннего минимального уровня грунтовых вод $H_{\text{мин.пв}}$ от максимального весеннего уровня предыдущего года $H_{\text{макс.в}}$ по одной из скважин Подмосковья

1 — с осенним питанием грунтовых вод; 2 — без осеннего питания грунтовых вод



Четкая парная связь предвесенних минимальных уровней с зимними или осенними уровнями наблюдается далеко не всегда, а лишь при достаточно глубоком залегании грунтовых вод, т. е. при сравнительно хорошей изолированности водоносного горизонта от поверхности земли и от воздействия метеорологических факторов. В частности, при наличии оттепелей, во время которых происходит питание подземных вод, указанные выше зависимости предвесенних минимальных уровней от предыдущих нарушаются. В эти периоды на графиках колебаний уровней грунтовых вод и дебитов источников наблюдаются подъемы, после чего вновь продолжается их спад по такому же закону. Величина подъема уровней и увеличения дебитов источников зависит главным образом от продолжительности оттепелей, температуры воздуха и количества сформировавшейся влаги на поверхности земли (в виде льда и снега). Все эти факторы можно учитывать с помощью метода множественной корреляции. Однако в ряде случаев прогноз предвесеннего минимума может быть произведен графическим методом и методом тройственной корреляции с учетом, помимо уровня грунтовых вод за предыдущий период, либо продолжительности оттепелей в сутках, либо суммы суточных положительных температур воздуха за период оттепелей. График строится также по многолетним данным, но у каждой точки на графике, отражающей зависимость предвесеннего минимального уровня от осеннего или зимнего, ставится цифра, характеризующая продолжительность оттепелей за зиму или сумму положительных температур. Затем по этим цифрам проводятся соответствующие изолинии через определенные интервалы.

На рис. 19, а видно, что чем больше число оттепелей, тем вы-

ше предвесенний минимальный уровень при одном и том же значении зимнего уровня. Коэффициенты корреляции этих связей достигают 0,3—0,6. Указанная выше зависимость может оказаться и нелинейной (рис. 19, б, в). При этом разброс точек, или дисперсия, при больших мощностях зоны аэрации гораздо мень-

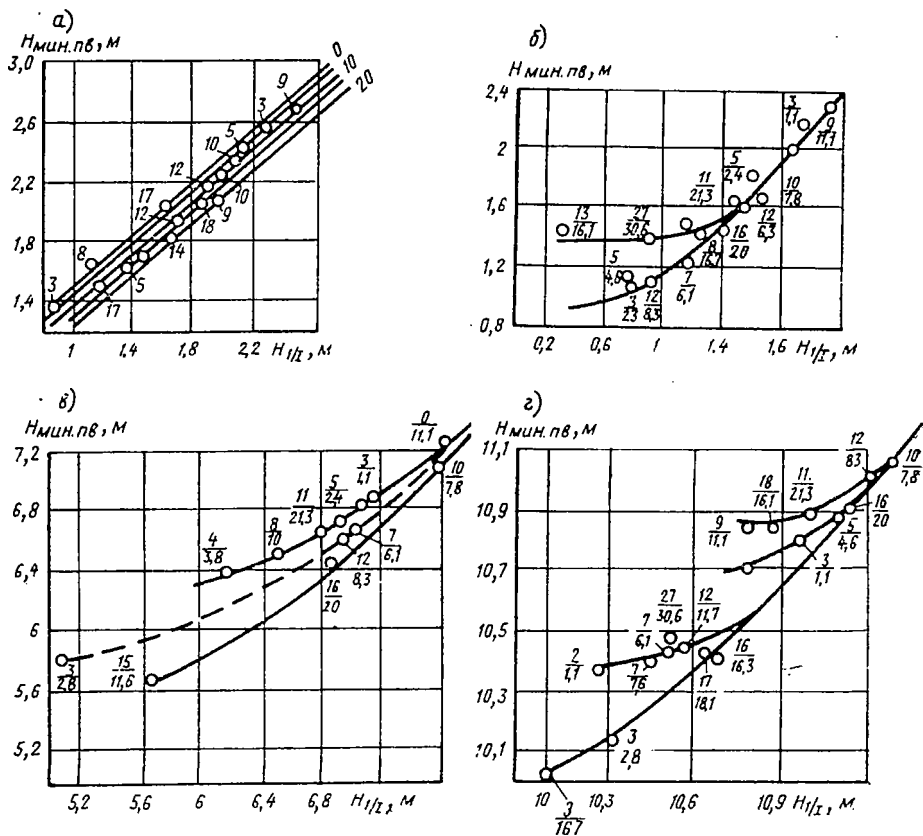


Рис. 19. Графики зависимости минимального предвесеннего уровня грунтовых вод $H_{\text{мин.пв}}$ от уровней на 1 января каждого года $H_{1/1}$ и оттепелей по скважинам Подмосковья. На графике а цифры обозначают количество дней с оттепелями (скважина 21); на графиках б (скважина 48), в (скважина 44) и г (скважина 28) в числителе — количество дней с оттепелями, в знаменателе — сумма положительных суточных температур воздуха в период оттепелей за XII—II месяцы

ше, чем при малых, что позволяет выделить область, в которой оттепели можно не учитывать, и наоборот, определить те минимальные значения мощностей зоны аэрации, при которых такой учет уже необходим. Ряд точек на графиках располагается незакономерно относительно числа оттепелей и сумм положительных суточных температур (см. рис. 19, б и в). Это свидетельству-

ет о том, что, видимо, далеко не каждая оттепель и появление положительных температур воздуха зимой приводят к питанию грунтовых вод, поскольку питание в периоды оттепелей возможно лишь при небольшом промерзании зоны аэрации, которое зависит от ряда факторов: высоты снежного покрова, увлажненности почвы с осени, суммы отрицательных температур воздуха осенью при отсутствии снежного покрова и зимой и др. Для оценки таких связей нужен уже многофакторный анализ. Еще более сложная связь предвесеннего минимума и уровня на $1/I$, которую трудно охарактеризовать только оттепелями и положительными зимними температурами, представлена на рис. 19, г. Возможно, что здесь проявляется влияние какого-то другого фактора (например, водность года, уровень базиса дренирования и др.).

Из изложенного выше можно сделать вывод, что прогноз предвесеннего минимального уровня грунтовых вод и минимальных дебитов источников во многих случаях возможен с помощью довольно простых методов и с достаточно высокой заблаговременностью (до трех — шести месяцев, в зависимости от продолжительности зимнего периода в различных районах страны). Точность таких прогнозов для практических целей вполне удовлетворительна.

ПРОГНОЗЫ ЛЕТНЕ-ОСЕННЕГО И ЗИМНЕГО МИНИМУМА

Прогнозы летне-осеннего минимума во второй провинции и зимнего минимума в первой во многом аналогичны прогнозам предвесеннего минимума. При составлении этих прогнозов также могут быть применены уравнения (1), (2), (5) и (7) для расчетов независимого спада уровня или дебита подземных вод, особенно тогда, когда мощность зоны аэрации достаточно большая, чтобы летние осадки и испарение не повлияли на характер спада. Проведенные нами [50] массовые расчеты независимого летнего спада уровней и дебитов подземных вод по многочисленным скважинам и источникам на территории СССР с различными глубинами залегания грунтовых вод показали, что спад уровня и дебитов грунтовых вод может рассчитываться по данным уравнениям даже при сравнительно неглубоком (около 1,5—2 м) залегании грунтовых вод и осложнении независимости спада периодическим подпитыванием грунтовых вод. Естественно, точность таких расчетов тем выше, чем больше мощность зоны аэрации. В качестве исходных значений H_0 или Q_0 принимаются максимальные весенние уровни или дебиты подземных вод.

Рассмотренные в главе II методы определения среднегого-летнего значения α можно применять для составления как очередных, так и предварительных прогнозов летне-осеннего или зимнего минимума. Предварительные прогнозы производятся до

того момента, когда темп спада уже выявился и по нему можно определить соответствующее данному году значение коэффициента α . Такие прогнозы могут производиться уже в феврале. В этом случае за исходное значение весеннего максимума принимается его прогнозируемое значение.

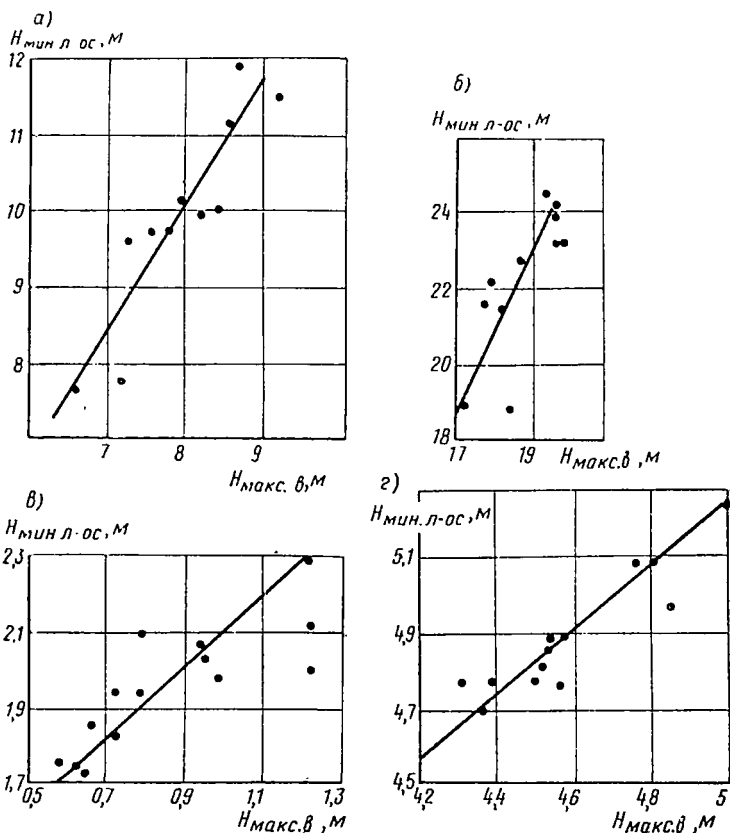


Рис. 20. Графики зависимости минимальных летне-осенних уровней грунтовых вод $H_{\text{мин.л-ос}}$ от предшествующих максимальных весенних уровней $H_{\text{макс.в}}$

а — $r=0,93$ (скважина 5/1-1); б — $r=0,72$ (скважина 4/42-1); в — $y=1,1+0,744x$, $r=0,88$, $S/\sigma=0,47$ (скважина 223); г — $y=1+0,851x$, $r=0,92$, $S/\sigma=0,39$ (скважина 361)

Предварительными прогнозами могут считаться и те, которые составляются в периоды максимального значения уровней грунтовых вод или дебитов источников, особенно когда этот максимум растянут во времени и спад уровней или дебитов в его начальной стадии осложняется интенсивным подпитыванием грунтовых вод инфильтрующимися атмосферными осадками. В такие моменты трудно установить, начался ли устойчивый спад

уровня или дебита, а поэтому могут использоваться среднемесячные значения α .

Характер спада, типичный для данного года, можно выбрать и по аналогии, если имеется длинный ряд наблюдений за режимом уровня воды в скважине или дебита источника. Для этого на один график наносятся все наблюдавшиеся за многолетние кривые спада уровня или дебита. По полученным таким образом кривым спада в соответствии с наблюдавшимися значениями уровней или дебитов в максимуме подбирают год-аналог текущего года и, используя график спада уровня или дебита года-аналога, дают прогноз спада в текущем году.

Довольно широко для прогнозов летне-осеннего минимума могут использоваться и его зависимости от предыдущих максимальных значений уровня или дебита. В частности, при больших зонах аэрации тесная парная связь устанавливается между максимальными весенними и минимальными осенними уровнями этого же года (рис. 20). Коэффициенты корреляции данной связи часто достигают 0,8—0,97, хотя в отдельных случаях они могут быть и низкими (0,2—0,6).

Аналогичным образом устанавливаются корреляционные связи между максимальным весенним уровнем грунтовых вод и среднемесячными уровнями любого месяца или уровнями на любую конкретную дату в пределах систематического спада уровня, независимо от темпа этого спада.

Зависимости последующих уровней или дебитов от предыдущих могут быть представлены и в более универсальной форме: в виде корреляционных связей уровней каждого последующего месяца H_n от предыдущего H_{n-1} . Графики, построенные по точкам, которые отражают связи среднемесячных уровней в пределах периодов спада, не осложняемых какими-либо подъемами, имеют, как правило, вид прямой линии. В некоторых случаях эти графики получаются криволинейными, по характеру близкими к степенной зависимости. Такие графики могут быть перестроены в логарифмическом масштабе или в координатах $\lg H_n - \lg H_{n-1}$, после чего они спрямляются и прогноз по ним облегчается. Графики последнего типа лучше всего строить для ряда лет сразу. Тогда они будут отражать соотношения уровней или дебитов смежных месяцев для разных по водности лет, т. е. при низких и высоких значениях уровней или дебитов. На рис. 21 приведен пример такого графика, построенного нами для скважины 21 (Щемилово). Как видно из этого графика, данная связь характеризуется почти идеальной прямой линией. Разброс точек наблюдался лишь в тех случаях, когда устанавливалась связь с каким-либо из месяцев, в котором отмечался подъем уровня в результате питания грунтовых вод, например точек, отражающих связь между апрельскими и майскими (IV—V) уровнями.

Прогноз с помощью последнего графика должен проводиться:

последовательно от месяца к месяцу, т. е. зафиксировав в текущем году майский уровень, можно определить по нему сначала июньский уровень, затем по июньскому уровню установить июльский и т. д.

При необходимости подобные графики могут быть составлены и для более дробных интервалов времени, например для среднедекадных значений уровней или дебитов. Основные требо-

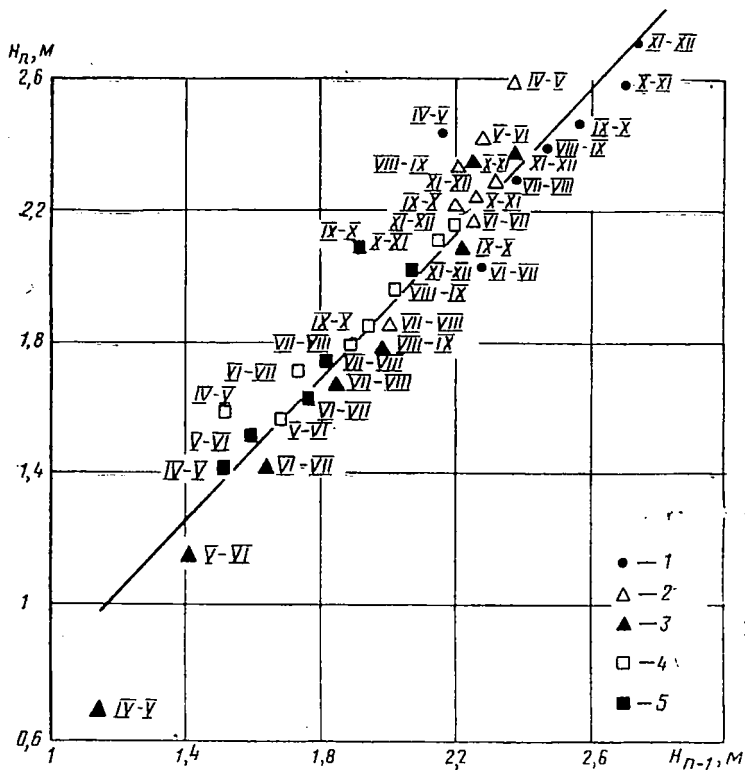


Рис. 21. График зависимости среднемесячных уровней грунтовых вод каждого последующего месяца H_{n-1} от предыдущего H_n для периодов спада уровней за ряд лет

1 — 1964 г., 2 — 1965 г., 3 — 1966 г., 4 — 1967 г., 5 — 1968 г.

вания при этом заключаются лишь в использовании равных промежутков времени между коррелируемыми значениями уровней или дебитов.

При неглубоком залегании грунтовых вод, как уже указывалось ранее, на характер их летнего спада начинают влиять многие факторы, среди которых основная роль принадлежит атмосферным осадкам (инфильтрация которых приводит к подъему уровней и нарушению темпов спада), а также дефициту влажности и температуре воздуха, определяющим величину испарения с

поверхности грунтовых вод и влаги из зоны аэрации. Парные связи, аналогичные приведенным на рис. 20, дают в этих случаях очень большой разброс точек относительно линии регрессии, что не позволяет использовать их для прогнозов.

Указанный разброс точек может быть систематизирован путем наложения на эти графики значений еще одного фактора, в качестве которого следует прежде всего апробировать атмосферные осадки, дефицит влажности или температуру воздуха. Эти данные обычно имеются на ближайшей метеостанции. Значения осеннего минимального уровня будут при этом наиболее четко увязываться с суммарными значениями этих факторов, взятыми за весь период от весеннего максимума до осеннего минимума.

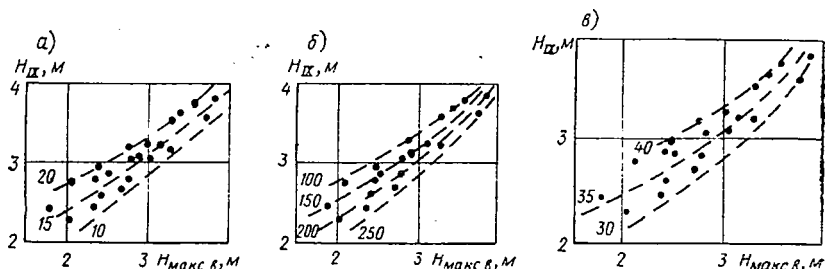


Рис. 22. Графики зависимости осенних (сентябрь) минимальных уровней грунтовых вод $H_{\text{м.н}}$ по скважине 19 (Подмосковье) от максимального весеннего уровня $H_{\text{макс.в}}$ и суммарных за апрель—июнь дефицита влажности воздуха в мм (а), осадков в мм (б) и среднемесячной температуры воздуха в °С (в)

Однако достаточно тесные связи получаются, если значения сумм осадков, дефицита влажности или температуры воздуха берутся и за более ограниченный период, например за период питания подземных вод и начала спада уровня, т. е. за апрель—июнь или апрель—май. Это объясняется тем, что в большинстве случаев основная часть дополнительного подпитывания и испарения грунтовых вод осуществляется именно в этот период. В последующем, когда уровень грунтовых вод в результате стока и испарения понизится, влияние этих факторов уже нивелируется. Примеры подобной двухфакторной связи, подтверждающие сказанное, приведены на рис. 22. Последний вывод позволяет обеспечить прогнозирование осенних минимальных уровней с заблаговременностью в два—четыре месяца.

Анализ подобных графиков, а также результатов многочисленных расчетов методом множественной корреляции позволяет сделать следующие выводы.

1. Чем больше заблаговременность прогноза, тем больше дисперсия точек, а следовательно, ниже точность сезонных прогнозов.

2. В 45% рассмотренных случаев парная корреляционная связь минимальных осенних и максимальных весенних уровней при заблаговременности прогноза в три-четыре месяца дает коэффициенты корреляции выше 0,74, т. е. удовлетворяет основным требованиям к качеству прогноза: $\Delta < 0,674\sigma$ и $M \geq 3$ (о чем будет подробнее сказано далее в главе VIII). Таким образом, практически в половине случаев прогнозы с достаточной достоверностью могут быть даны на основании только этих парных связей. Следует отметить, что вероятность появления отмеченных высоких парных корреляционных связей закономерно растет с северо-запада на юг и юго-восток европейской территории СССР.

3. Введение в расчет дополнительных факторов при достаточно высоких связях осенних и весенних уровней не всегда улучшает прогностические зависимости. В 47% случаев учет второго мало значащего фактора, наоборот, снизил коэффициент множественной корреляции по сравнению с первым. Поэтому введение дополнительных факторов целесообразно лишь при низких парных (частных) коэффициентах корреляции (не менее 0,75). При достаточно же высоких парных связях добавление новых факторов следует оценивать специально.

4. В большинстве случаев при составлении прогнозов летне-осенних минимумов методом множественной корреляции наибольшее весовое значение среди других факторов имеет максимальный весенний уровень. На втором, третьем и четвертом месте соответственно находятся сумма осадков за март — июнь, суммарные среднемесячные температуры и дефицит влажности воздуха (за те же периоды времени, что и осадки).

Таблица 7

Факторы	Коэффициенты корреляции			Значения фактора по весу в %				
	в абсолютных значениях	в процентах случаев в зависимости от их абсолютных значений			1-е место	2-е место	3-е место	4-е место
		>0,7	0,4—0,7	<0,4				
Максимальный весенний уровень	0,25—0,99	75	20	5	61	17	22	—
Суммарные осадки за март — июнь	0,01—0,69	—	35	65	18	41	18	23
Суммарная среднемесячная температура за март — июнь	0,03—0,77	10	20	70	16	26	26	32
Суммарный дефицит влажности за март — июнь	0,06—0,87	15	45	40	6	18	35	41

Роль отдельных факторов в формировании летне-осеннего минимума показана в табл. 7.

Введение в расчет дополнительных факторов улучшает точность прогнозов, что особенно заметно в средних широтах (в районе Москвы, Западной Сибири — до 75% случаев) и в меньшей степени в районе северо-запада СССР (в 33% случаев). В южных районах (Нижнее Поволжье, Северный Кавказ, Курская магнитная аномалия, Украина) учет дополнительных факторов чаще всего не требуется, так как здесь парная корреляция летне-осенних минимальных и весенних максимальных уровней грунтовых вод показывает достаточно высокие связи: в 78% случаев $r_1 = 0,81 \div 0,99$ и в 22% случаев $r_1 = 0,69 \div 0,8$.

В целом при движении с севера на юг можно отметить возрастание роли весеннего максимального уровня и уменьшение роли остальных факторов в формировании летне-осенних уровней.

5. Интересным и довольно часто встречающимся является тот факт, что в отдельных случаях фактор, имеющий меньший по сравнению с другим частный коэффициент корреляции с прогнозируемым летне-осенним минимумом, имеет большее весовое значение. Это легко установить по коэффициентам уравнения регрессии. Так, например, уравнение регрессии для прогноза летне-осеннего минимума по скважине 38-1 (северо-запад СССР) имеет вид:

$$y = 7,759 + 0,928 x_1 - 0,0051 x_2 + 0,014 x_3 - 0,116 x_4,$$

где x_1 — максимальный весенний уровень (частный коэффициент корреляции $r_1 = 0,8651$);

x_2 — сумма атмосферных осадков за апрель-май ($r_2 = -0,686$);

x_3 — суммарная среднемесячная температура за апрель-май ($r_3 = 0,03$);

x_4 — суммарный дефицит влажности воздуха за апрель-май ($r_4 = 0,499$).

Подставив в уравнение фактические значения факторов за 1971 г.

$$y = 7,759 + 16,87 - 0,56 + 0,142 - 1,07,$$

можно убедиться, что значение пятого члена суммы почти в 2 раза больше значения третьего, несмотря на то, что $r_4 < r_2$.

Приведенный пример может служить иллюстрацией и к положению, изложенному выше в п. 3. Коэффициент множественной корреляции R в данном примере равен 0,8135, т. е. меньше, чем r_1 . Таким образом, учет дополнительных факторов не привел к улучшению связи, и поэтому в данном случае прогноз летне-осеннего минимума лучше и проще проводить только по парной его связи с x_1 , что хорошо видно и из приведенного выше

цифрового уравнения (последние три члена практически мало влияют на величину y).

5. В 55% случаев при составлении прогнозов летне-осеннего минимума с заблаговременностью три-четыре месяца даже учет нескольких факторов не дал достаточно высокого (не менее 0,74) коэффициента множественной корреляции, позволяющего составлять прогнозы с необходимой достоверностью. Причиной такого высокого процента низких результатов прогнозов летне-осеннего минимума является прежде всего неустойчивость этого минимума во времени, т. е. отсутствие четкого минимума в отдельные годы вообще, что особенно характерно для зон умеренного и недостаточного увлажнения провинции сезонного питания грунтовых вод и даже при сравнительно глубоком залегании грунтовых вод в зоне избыточного увлажнения. Низкие результаты прогнозов летне-осеннего минимума наблюдаются и в районах с резко выраженным муссонным климатом (например, Приморье), где значительную (если не сказать основную) роль в формировании режима грунтовых вод играют летние осадки. В этих случаях заблаговременность составления таких прогнозов должна быть сокращена.

6. Для самых южных районов страны с преимущественно зимним питанием грунтовых вод минимальные летние уровни определяются главным образом максимальными зимними или зимне-весенними уровнями. Поэтому прогноз летне-осенних минимумов здесь может производиться как на основе парной корреляции этих уровней с максимальными весенними, так и на основе множественной корреляции с учетом в качестве третьего фактора либо суммарных значений атмосферных осадков, либо среднемесячных температур или дефицита влажности воздуха за период отсутствия резкого преобладания испарения над осадками. Для учета возможного влияния осадков, которые выпадут в последующие месяцы, можно к фактически наблюдавшимся зимне-весенним осадкам прибавить среднеголетние значения месячных осадков последующего (по отношению к моменту выдачи прогнозов) периода. Такие прогнозные осадки могут браться как за весь прогнозируемый период, так и только за те месяцы, осадки которых, судя по предыдущим наблюдениям, как-то влияют на режим грунтовых вод. Эти прогнозные осадки могут выбираться как среднеголетние и как осадки с различной степенью обеспеченности (5, 50 или 95%-ная обеспеченность) в соответствии со степенью водности года, которая к моменту составления прогноза (апрель-май) для данных районов уже может быть определена.

Аналогичным образом могут быть составлены графики тройственной корреляции с суммами среднемесячных температур и дефицита влажности воздуха.

7. Анализ степени зависимости прогнозируемых уровней грунтовых вод от различных режимобразующих факторов

с учетом литологического состава водовмещающих пород и пород зоны аэрации показывает, что наиболее высокие корреляционные связи уровней почти со всеми факторами прослеживаются в породах с низкими фильтрационными свойствами (в суглинках) по сравнению с породами, характеризующимися более высокими фильтрационными свойствами (супеси, пески, известняки). Исключение составляют лишь связи с атмосферными осадками, которые в условиях хорошо проницаемой зоны аэрации в закарстованных известняках более высокие, чем в суглинках (хотя и не намного). Иллюстрацией сказанному может служить табл. 8, составленная по наиболее типичным расчетам множественной корреляции.

Таблица 8

Факторы x_i	Частные коэффициенты корреляции для различных пород		
	известняки	пески	суглинки
Максимальный весенний уровень x_1	0,57—0,93	0,69—0,96	0,8—0,99
Суммарные осадки весеннего периода x_2	0,57—0,69	0,09—0,34	0,5—0,63
Суммарная температура весеннего периода x_3	0,03—0,15	0,08—0,45	0,63—0,64
Дефицит влажности того же периода x_4	0,3—0,5	0,22—0,64	0,64

8. Степень изолированности водоносного горизонта от поверхности земли по-разному воздействует на характер взаимосвязей прогнозируемого уровня грунтовых вод с различными факторами. Так, с увеличением мощности зоны аэрации в рыхлых отложениях (пески, супеси, суглинки) коэффициенты корреля-

Таблица 9

Известняки (Ленинградская обл.)					Песчано-суглинистые отложения (Новосибирская обл.)				
глубина до воды в м	коэффициенты корреляции				глубина до воды в м	коэффициенты корреляции			
	r_{x_1}	r_{x_2}	r_{x_3}	r_{x_4}		r_{x_1}	r_{x_2}	r_{x_3}	r_{x_4}
8	0,75	0,56	0,03	0,4	1,4	0,69	0,38	0,73	0,77
9,7	0,93	0,62	0,15	0,3	1,9	0,25	0,14	0,78	0,7
13,2	0,53	0,69	0,11	0,46	2,95	0,73	0,22	0,28	0,41
15,5	0,75	0,64	0,11	0,34	—	—	—	—	—
21	0,71	0,61	0,05	0,5	4,5	0,88	0,24	0,64	0,63

ции связей минимальных летне-осенних уровней с максимальными весенними уровнями грунтовых вод x_1 , как правило, растут, а с остальными факторами x_2 , x_3 и x_4 имеют явную тенденцию к уменьшению. Лишь в известняках с хорошо проницаемой зоной аэрации коэффициенты корреляции всех связей почти не зависят от глубины залегания водоносного горизонта. Данная закономерность видна из табл. 9.

Прогноз времени наступления осеннего минимального уровня весьма сложен и пока еще трудно выполним. Объясняется это тем, что само наличие четкого осеннего минимума не всегда гарантировано. Так, например, по гистограммам времени наступления осеннего минимума в Подмосковье можно видеть, что даже для скважин с неглубоким залеганием грунтовых вод (0,5—1,5 м) осенний минимум в отдельные годы вообще отсутствует. В те же годы, когда он имеет место, время его наступления (а следовательно, и время предшествующего ему летне-осеннего минимума) очень закономерно, так как зависит в основном от погодных условий, прогноз которых пока еще разработан слабо и не может браться за основу при гидрогеологических прогнозах.

Изложенные в данной главе физические основы и примеры прогнозов минимальных годовых значений уровней подземных вод показывают, что в большинстве случаев такие прогнозы могут производиться с достаточной для практических целей достоверностью и заблаговременностью. Методы, применяемые для таких прогнозов, довольно просты и доступны даже тем гидрогеологическим партиям, которые не имеют возможности использовать ЭВМ для расчета прогнозов режима подземных вод.

Рассмотренные методы прогнозов минимальных уровней подземных вод могут быть использованы для территорий с различными видами режима (междуречным, склоновым, террасовым, приречным и др.). Для расчетов прогнозов наиболее целесообразно составлять уравнения регрессии не только для оценки коэффициентов корреляции как меры тесноты связи, но и для определения ошибок уравнения регрессии, ошибок коэффициента корреляции и оценок критериев реальности связи. Однако при выборе факторов для анализа закономерностей их связей с прогнозируемым уровнем целесообразно также составлять и графики связей, которые наглядно показывают особенности анализируемых зависимостей и помогают вскрыть причины наблюдаемых аномальных отклонений фактических значений от осредняющих их прямых или кривых, а также оценить линейность связей.

ПРОГНОЗЫ МАКСИМАЛЬНЫХ ГОДОВЫХ УРОВНЕЙ И ДЕБИТОВ ГРУНТОВЫХ ВОД

В соответствии с гидрогеологическим районированием территории СССР по типам режима грунтовых вод (см. главу III) можно констатировать наличие следующих максимальных уровней грунтовых вод: 1) весенне-летних максимальных в первой провинции; 2) весенних максимальных во второй провинции; 3) осенних максимальных в зонах избыточного увлажнения второй провинции и 4) зимних или зимне-весенних максимальных в третьей провинции.

По условиям формирования перечисленные выше максимумы уровней или дебитов грунтовых вод могут быть объединены в две группы: а) весенне-летние и весенние максимумы, образующиеся в основном в результате инфильтрации талых вод; б) осенние и зимне-весенние максимумы, образующиеся в основном вследствие инфильтрации дождевых вод.

Прогнозы максимумов для этих двух групп имеют свою специфику, и поэтому их целесообразно рассмотреть отдельно.

ПРОГНОЗЫ ВЕСЕННЕГО МАКСИМУМА¹

Прогнозы весеннего максимума, как, впрочем, и всех остальных максимальных значений уровней или дебитов подземных вод, более сложны, чем прогнозы минимумов. Связано это с тем, что на величину весеннего подъема уровня грунтовых вод или дебита источника одновременно влияют следующие факторы: запасы влаги на поверхности земли за зимний период (твердые осадки), величина снежного покрова, определяющая размеры промерзания зоны аэрации, запасы влаги в зоне аэрации, характер снеготаяния или степень «дружности» весны, определяемые температурным режимом воздуха в этот период, глубина залегания грунтовых вод к началу снеготаяния, количество жидких осадков, выпавших в период снеготаяния и др. Учесть все эти факторы, количественно их охарактеризовать для участка расположения каждой наблюдательной скважины и оценить степень влияния каждого фактора в отдельности или всех их в совокупности на режим подземных вод очень трудно и практически даже невозможно, так как обычно таких детальных наблюдений гидрогеологические станции в районе своих наблюдательных скважин не проводят и поэтому не располагают

¹ Под прогнозом весеннего максимума нами в данном случае и в последующем в целях избежания повторений понимаются прогнозы максимумов группа а).

необходимой для прогноза информацией. Кроме того, как уже отмечалось ранее, часть этих факторов на момент составления прогнозов (а ценность прогноза заключается в их заблаговременности) неизвестна.

Выбор метода прогноза, состава и количества учитываемых в прогнозных расчетах и построениях факторов должен базироваться на детальном анализе режима и баланса грунтовых вод за предшествующий период и на знании общих зависимостей основных характеристик режима грунтовых вод от определяющих его факторов за многолетие.

Как было показано ранее [49—51], помимо запасов воды в снеге (или суммы зимних твердых атмосферных осадков), запасов влаги в зоне аэрации к моменту снеготаяния, весенних и осенних жидких осадков, составляющих приходную часть баланса грунтовых вод в этот период, для прогнозов весеннего максимума необходимо учитывать суммы отрицательных температур воздуха за зимний период, положительных температур за летне-осенний период предыдущего года и положительных температур за период снеготаяния, дефицит влажности за предыдущий летне-осенний период и период снеготаяния, глубины промерзания и влажность пород зоны аэрации.

Чем больше реально действующих факторов можно учесть одновременно при прогнозе, тем точнее будет такой прогноз, и наоборот. Однако апробацию возможных методов прогнозов лучше всего начинать с установления наиболее простых и доступных зависимостей с последующим их усложнением в том случае, если они не дадут достаточно четких связей. Такой подход целесообразен в связи с тем, что роль отдельных факторов для прогнозов в различных климатических зонах и гидрогеологических условиях неодинакова, и поэтому в каждом конкретном случае следует устанавливать, какими режимобразующими факторами можно пренебречь, а какие, наоборот, являются доминирующими в формировании режима подземных вод.

При составлении прогнозов методом парной корреляции среди наиболее простых предварительных зависимостей могут быть апробированы следующие.

1. Зависимость амплитуды весеннего подъема уровня грунтовых вод от суммы твердых осадков, запасов воды в снеге за зиму или за часть зимы (декабрь-январь или декабрь — февраль включительно), т.е. до периода составления прогноза, а также от суммы запасов влаги в снеге и жидких осадков за период снеготаяния (рис. 23).

2. Зависимость максимального весеннего уровня грунтовых вод от прогнозного (определенного любым из изложенных в главе III методом) предвесеннего минимального уровня, какого-либо среднемесячного зимнего уровня (января) и уровня, наблюдавшегося в момент осеннего перехода положительных температур через нуль (рис. 24). Как видно из графиков, в од-

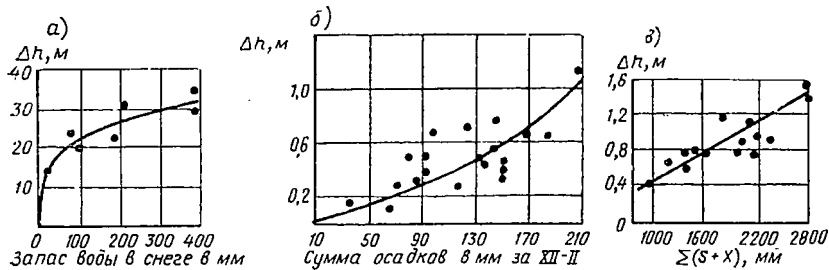


Рис. 23. Графики зависимости амплитуд весеннего подъема уровня грунтовых вод Δh от запасов воды в снеге (а), суммарных твердых осадков (б) и суммы запасов воды в снеге к моменту снеготаяния S и количества осадков x в период снеготаяния (в) (по материалам гидрогеологической станции Центрально-черноземной полосы — а и Шемилловского стационара ВСЕГИНГЕО — б, в)

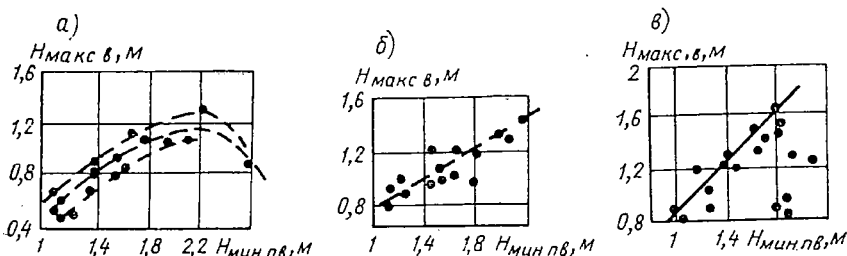
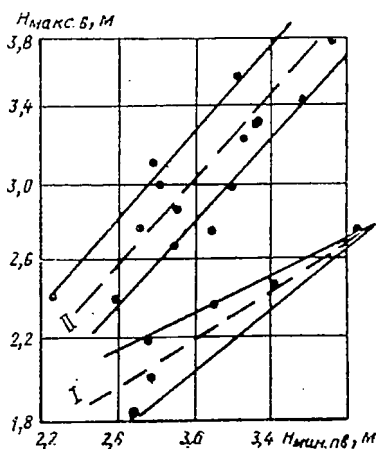


Рис. 24. Графики зависимости максимальных весенних уровней $H_{\text{макс.в}}$ и амплитуд весеннего подъема уровней грунтовых вод от предвесенних минимальных уровней $H_{\text{мин.п.в}}$ по ряду скважин Подмосковья

а — скважина 48; б — скважина 15/50; в — скважина 6

Рис. 25. График зависимости максимального весеннего уровня грунтовых вод $H_{\text{макс.в}}$ по скважине 19 Подмосковья от среднегодового уровня предыдущего года $H_{\text{мин.п.в}}$

I — линия регрессии для лет повышенной водности; II — то же, для лет с водностью ниже нормы



них случаях связь устанавливается довольно определенно, в других (рис. 24, в) можно говорить лишь о тенденции и о верхнем пределе возможной амплитуды, что также имеет значение при решении практических вопросов.

3. Зависимость максимального весеннего уровня от среднегодового, максимального и минимального летне-осеннего уровня предыдущего года (рис. 25). Как видно из данного графика, парная связь максимального весеннего уровня и среднегодового уровня предыдущего года дает очень большой разброс точек. Однако анализ этого разброса показал, что левая группа точек на графике соответствует годам повышенной водности (это в основном пиковые значения уровней), а правая — годам с водностью ниже нормы (это в основном многолетние минимумы колебаний уровня грунтовых вод или периоды его спада). Следовательно, составлять такие графики или выполнять расчеты парной корреляции в таких случаях можно отдельно для лет разной водности (при расчетах методом множественной корреляции этот фактор следует учитывать).

Из приведенных примеров видно, что прогноз весеннего максимума может даваться двумя путями: 1) определением прогнозного весеннего подъема или амплитуды уровня грунтовых вод, которая прибавляется к прогнозируемому предвесеннему минимальному уровню; 2) определением весеннего максимального уровня, выражающегося мощностью водоносного горизонта или глубиной залегания грунтовых вод.

Корреляционные связи можно устанавливать, используя либо абсолютные значения уровней грунтовых вод, осадков, запасов влаги в зоне аэрации и т. д., либо отклонения значений этих факторов от их среднесезонных норм, т. е. их модульные коэффициенты.

В тех случаях, когда указанная выше парная корреляция не дает удовлетворительных результатов (а такие случаи довольно распространены), необходим учет дополнительных факторов. Одним из возможных способов такого учета является составление графиков тройственной корреляции, среди которых могут быть следующие зависимости.

1. Зависимость максимального весеннего уровня от какого-либо среднемесячного уровня зимнего периода (февраля, января или декабря, в зависимости от срока прогнозов) и суммарных зимних или осенне-зимних осадков (также соответственно до февраля, января или декабря включительно).

2. Зависимость амплитуды весеннего подъема уровня грунтовых вод от суммы зимних осадков и влажности зоны аэрации в период составления прогноза или в любой другой срок за осенне-зимний период, предшествующий составлению прогнозов. Вместо суммарных запасов влаги в зоне аэрации могут быть использованы сведения об объемной влажности на какой-либо глубине, например, 0,5, 0,6 или 0,9 м, если между суммарными запа-

сами влаги в зоне аэрации и влажностью почвогрунтов на выбранной глубине существует хорошая корреляционная связь.

При отсутствии сведений о влажности в зоне аэрации данный фактор можно учесть косвенно, используя сведения о количестве жидких осенних осадков, которые в основном и определяют степень увлажнения зоны аэрации. В этом случае строится график зависимости или рассчитывается уравнение связи амплитуды весеннего подъема уровня грунтовых вод с суммой твердых зимних осадков и жидких осенних осадков.

3. Зависимость амплитуд весеннего подъема уровня или весенних уровней грунтовых вод от сумм зимних осадков и мощности зоны аэрации в момент осеннего перехода температуры воздуха через нуль или в период составления прогнозов (например, на 1 января или февраля каждого года, рис. 26). Как

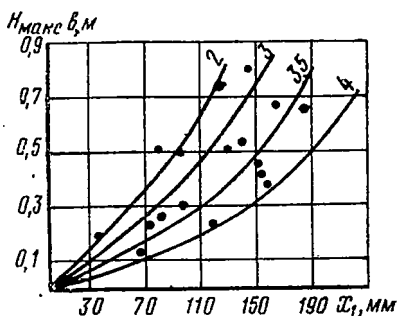


Рис. 26. График зависимости максимального весеннего уровня грунтовых вод $H_{\text{макс.в}}$ по одной из скважин Подмоскovie от суммарных зимних (декабрь — февраль) осадков x_1 и мощности зоны аэрации на 1 января каждого года в м

уже отмечалось [46], амплитуды колебаний уровня грунтовых вод (особенно при небольших до 5—6 м глубинах их залегания) в значительной степени зависят от мощности зоны аэрации. Это связано как с расходом части инфильтрующейся воды на насыщение зоны аэрации, так и главным образом одновременным расходом инфильтровавшейся в зону аэрации влаги на испарение и перераспределение питания грунтовых вод во времени. Наблюдающиеся в многолетнем разрезе значительные колебания уровней грунтовых вод требуют учета при прогнозах и этого фактора.

Еще более точные прогнозы могут быть получены, если в подобных зависимостях будут использованы мощности зоны аэрации, наблюдающиеся в момент начала весеннего подъема уровня, что возможно при составлении краткосрочных прогнозов. В сезонных прогнозах для этой цели можно использовать прогнозные предвесенние минимальные уровни.

4. Зависимость амплитуд весеннего подъема уровня грунтовых вод от суммы зимних осадков и глубин промерзания зоны аэрации (рис. 27). В тех случаях, когда сведения о глубинах промерзания зоны аэрации отсутствуют, в качестве третьего фактора могут использоваться суммарные значения среднеме-

сячных отрицательных температур за зиму, которые косвенно определяют размеры промерзания зоны аэрации.

5. Зависимость весеннего подъема уровня грунтовых вод от суммы зимних твердых осадков (за декабрь — февраль) и весенних осадков, выпадающих в период снеготаяния (за март-апрель). Для прогнозов, выдаваемых в конце февраля — начале марта, могут быть взяты прогнозные сведения об осадках на период снеготаяния. При более раннем составлении прогнозов (январь, декабрь) для учета этого фактора можно взять среднеемноголетние значения осадков за март-апрель или осадки заданной обеспеченности.

6. Зависимость амплитуд весеннего питания грунтовых вод от суммы зимних осадков и дефицита влажности воздуха за период снеготаяния (см. рис. 5).

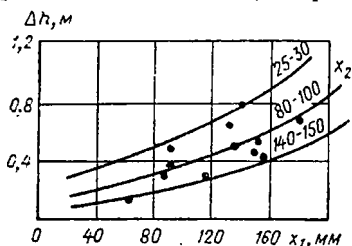


Рис. 27. График зависимости амплитуд весеннего подъема уровней грунтовых вод Δh по одной из скважин Подмосковья от суммарных зимних (декабрь — февраль) осадков x_1 и глубины промерзания зоны аэрации x_2 в см

В тех случаях, когда тройственная корреляция не позволяет вскрыть четких связей, прогноз режима должен базироваться на множественной корреляции.

Расчет уравнений регрессии вручную очень трудоемок, и поэтому прогнозы данным методом могут производиться лишь с применением электронно-вычислительных машин. Недостаток этого метода в том, что при его использовании нельзя выявить аномальность отдельных значений факторов, которая вызывается либо браком в замерах, либо какими-то искусственными явлениями. Точность таких расчетов будет резко сниженной, если связь между выбранными независимыми переменными или одной из них и зависимой переменной является нелинейной. А как видно из предыдущих парных и тройственных связей, мы иногда имеем дело как раз с нелинейными зависимостями. В таких случаях более универсальным, более наглядным и вместе с тем менее трудоемким является метод множественной графической корреляции.

Приведем пример одного из наиболее простых методов множественной графической корреляции, применяющихся в статистике, — метод последовательных приближений. Для этой цели сначала строят график парной корреляции, например график зависимости отклонений максимального уровня грунтовых вод от его многолетней нормы y и отклонений зимнего уровня грунтовых вод, например, на $1/I$ каждого года, от его многолетней

нормы x_1 (рис. 28, а). Осреднив полученные на графике точки прямой или кривой линией, строят затем второй график зависимости полученных на графике отклонений точек от осредняющей их линии и значений второго фактора x_2 — суммы зимних (XII—III) осадков (рис. 28, б). Проведя затем осредняющую линию на графике (см. рис. 28, б) и определив отклонения каждой точки от этой линии с плюсом или минусом, эти отклонения переносят на первый график (см. рис. 28, а) в соответствии с их знаком вниз или вверх от осредняющей линии по ординате точек соответствующего года. Как видно из рисунка, разброс точек с учетом второго фактора уменьшается. В случае необходи-

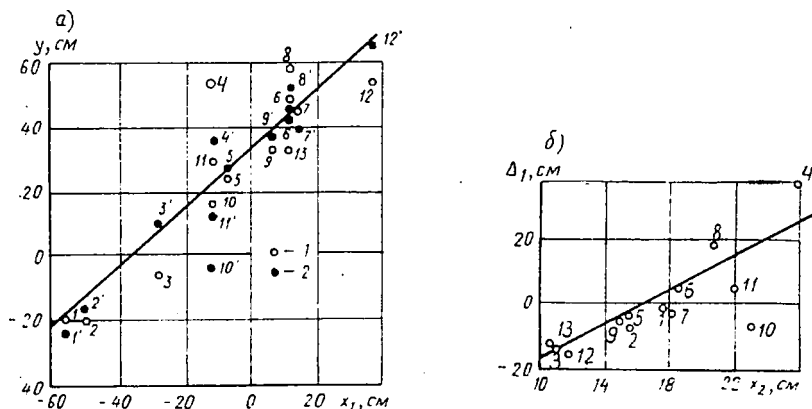


Рис. 28. Графики зависимости весеннего максимального уровня грунтовых вод y (в отклонениях от нормы) от зимнего уровня x_1 (а) и зависимости полученных отклонений Δ_1 от суммы зимних осадков x_2 (б)

1 — первоначальные данные; 2 — данные с учетом отклонений, полученных по графику б (цифры на графике обозначают порядковый номер лет)

мости осредняющая линия на графике (см. рис. 28, а) может быть подкорректирована.

При наличии все еще большого разброса точек (относительно подкорректированной осредняющей кривой) строят третий график — зависимость отклонений точек от осредняющей линии от значений третьего фактора x_3 — глубин промерзания зоны аэрации или какого-либо другого фактора и т. д. Процедура внесения корректур в график (см. рис. 28, а) будет аналогична описанной выше. Полученный таким образом график парной связи будет отражать влияние уже нескольких факторов.

Этот метод дает хорошие результаты при сравнительно глубоко залегании грунтовых вод (свыше 3 м). В тех же случаях, когда участие различных факторов оказывает большое влияние на режим грунтовых вод, целесообразно составлять многофакторные соосные графики и использовать их для прогнозов режима подземных вод.

Соосные многофакторные графики составляются как по рассчитанным на ЭВМ уравнениям регрессии для любого числа

факторов, так и по фактическим значениям факторов прямым путем.

Приведем пример построения такого графика для прогноза весеннего максимального уровня y по одной из скважин Подмосковья. Уравнение регрессии, рассчитанное на ЭВМ для трех факторов, в данном случае имеет вид:

$$y = 0,67 + 0,91 x_1 - 0,0034 x_2 - 0,0023 x_3,$$

где x_1 — предвесенний минимальный уровень в м;

x_2 — сумма жидких осадков за сентябрь-октябрь предыдущего года в мм;

x_3 — сумма зимних осадков за ноябрь — март включительно в мм.

Для построения графика данное уравнение представляется в виде двух уравнений:

$$y' = 0,67 + 0,91 x_1 - 0,0034 x_2;$$

$$y = y' - 0,0023 x_3.$$

Точки, наносимые в квадранте I (рис. 29), рассчитывают по первому уравнению, задаваясь рядом округленных значений параметров x_1 и x_2 . Расчет y' представлен в табл. 10.

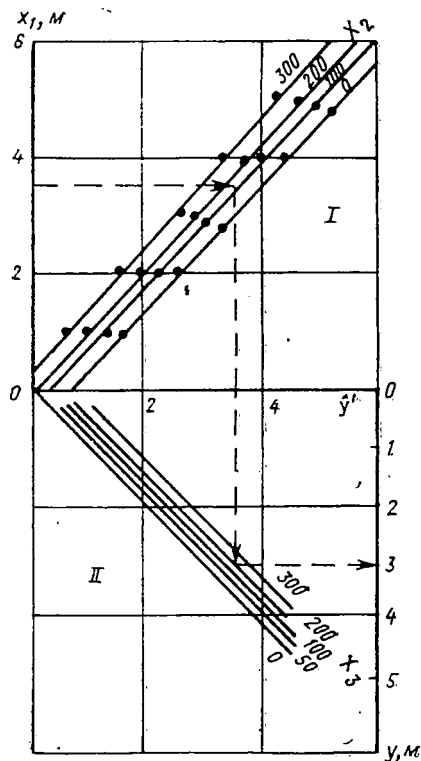


Таблица 10

x_1	x_2			
	0	100	200	300
0	0,67	0,33	-0,01	-0,35
1	1,58	1,24	0,9	0,54
2	2,49	2,15	1,81	1,47
3	3,4	3,06	2,72	2,38
4	4,31	3,97	3,69	3,29
5	5,56	5,22	4,88	4,54

Таблица 11

y'	x_3				
	0	50	100	200	300
1	1	0,885	0,77	0,54	0,31
2	2	1,885	1,77	1,54	1,31
3	3	2,885	2,77	2,54	2,31
4	4	3,885	3,77	3,54	3,31

Рис. 29. Многофакторный график зависимости максимального весеннего уровня грунтовых вод y по одной из скважин Подмосковья от минимального предвесеннего уровня x_1 , суммы жидких осенних (IX—XI) x_2 и твердых зимних (XII—III) x_3 осадков в мм

Расчет значений y в зависимости от принимаемых величин y' и x_3 представлен в виде табл. 11.

Полученные значения y' и y наносятся на четырехфакторный график (см. рис. 29) соответственно в I и II квадрантах в любом удобном масштабе.

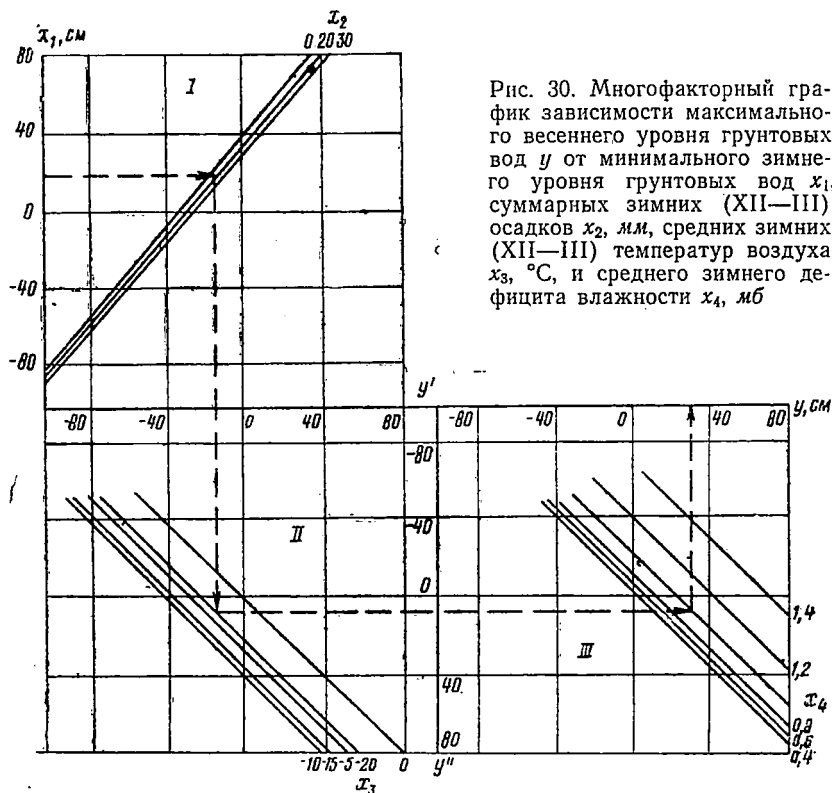


Рис. 30. Многофакторный график зависимости максимального весеннего уровня грунтовых вод y от минимального зимнего уровня грунтовых вод x_1 , суммарных зимних (XII—III) осадков x_2 , мм, средних зимних (XII—III) температур воздуха x_3 , °С, и среднего зимнего дефицита влажности x_4 , мб

Многофакторные соосные графики можно строить как для линейных, так и нелинейных связей. На рис. 30 приведен пример построения графика для прогноза весеннего максимального уровня по одной из скважин Северо-Западной гидрогеологической станции. Уравнение регрессии, полученное В. Н. Озябкиным с помощью метода множественной графической корреляции, имеет вид:

$$y = -33 + 0,87 x_1 + 1,6^{0,14x_2} - 0,27x_3^2 - 6,4 x_3 + 1,78 e^{2,65x_4},$$

где y — отклонения максимального весеннего уровня грунтовых вод от среднемноголетней нормы в см;

x_1 — отклонения минимального зимнего (предвесеннего) уровня грунтовых вод от среднемноголетней нормы в см;

x_2 — сумма зимних осадков за декабрь — март в см;

x_3 — средняя зимняя температура воздуха в °С;

x_4 — средний зимний дефицит влажности в мб.

По аналогии с предыдущим примером данное уравнение можно представить в виде трех отдельных уравнений:

$$y' = -33 + 0,87 x_1 + 1,6^{0,14x_2},$$

$$y'' = y' - 0,27 x_3^2 - 6,4 x_3;$$

$$y = y'' + 1,78 e^{2,65x_4}.$$

Расчет этих уравнений также производится в форме таблиц, после чего результаты этих расчетов переносятся на график. Первое уравнение строится в I квадранте в виде трехфакторного графика, второе — во II и третье — в III.

Многофакторные графики могут быть построены и только по фактическим значениям режимобразующих факторов за многолетие. Построение осуществляется осреднением разброса точек способами, изложенными ранее при характеристике трехфакторных связей.

Построив однажды по многолетним данным такие графики и зная наблюдавшиеся в текущем году величины основных режимобразующих факторов, можно, как это показано пунктирной линией на рис. 29 и 30, быстро определить прогнозное значение весеннего максимума в его абсолютном значении или в отклонениях от нормы. Например, при предвесеннем уровне 3,5 м (см. рис. 29), сумме осенних осадков 100 мм и зимних осадков 200 мм максимальный весенний уровень грунтовых вод составит около 3 м от поверхности земли.

Если уравнения регрессии и многофакторные графики были составлены по коротким (до 10—15 лет) рядам наблюдений, то их следует постоянно (через один — три года) пересоставлять, что повышает точность прогноза. Добавление же одного-двух лет к длинным рядам наблюдений (свыше 30 лет), естественно, не может существенно повлиять на величины параметров уравнений или характер графиков связи, и поэтому подобные корректуры следует делать через большие промежутки времени (через пять-шесть лет).

Построение многофакторных графиков целесообразно, даже когда известно рассчитанное на ЭВМ уравнение регрессии и когда, казалось бы, прямо по нему можно составлять прогноз и делать это более точно.

Основным достоинством многофакторных графиков является возможность анализа особенностей влияния отдельных факторов на прогнозируемый элемент режима подземных вод, что невозможно при аналитических расчетах прогнозов. Например, по графику в квадранте II (см. рис. 30) можно сделать вывод, что максимальные значения весенних амплитуд уровня в районе Ле-

нинграда наблюдаются при средних зимних температурах воздуха около -10°C . Более высокие и более низкие зимние температуры воздуха приводят к снижению весеннего питания грунтовых вод. Это объясняется тем, что понижение температур ниже -10°C приводит к увеличению промерзания зоны аэрации, медленное оттаивание которой в весеннее время способствует повышению испарения и поверхностному стоку талых вод, а следовательно, и уменьшению инфильтрации. И наоборот, повышение средних зимних температур выше -10°C , связанное с большим количеством оттепелей, приводит к рассредоточению питания грунтовых вод во времени и балансированию этого питания подземным стоком.

Гидрогеологический анализ графиков, построенных по уравнениям регрессии, в ряде случаев позволяет ограничить прямо на графике области применения этих уравнений и определить, при каких значениях параметров этих уравнений прогнозы будут достоверными или, наоборот, абсурдными (например, когда максимальные уровни могут оказаться ниже минимальных, что возможно при нелинейности связей и т. п.). Подобный анализ уравнений необходим, и его можно легко выполнить с помощью таких графиков. Особенно важен такой анализ в случаях, когда для прогнозов используется несколько различных значений уровней, предшествующих прогнозируемому.

Предлагаемые нами многофакторные графики в отличие от графиков, применяющихся гидрометеослужбой США [21], позволяют учитывать одновременно любое число факторов. Порядок введения факторов при построении таких графиков и их выбор желательно заранее определить путем парных корреляционных связей каждого из этих факторов с прогнозируемым максимальным уровнем или амплитудой весеннего подъема уровня грунтовых вод и определения степени их связи. Лучше всего в графики множественной корреляции включать в порядке убывания лишь те факторы, которые имеют сравнительно высокие коэффициенты корреляции (не менее 0,4—0,5). Нарращивание числа факторов можно прекращать при сформировании групп точек, лежащих на прямых или кривых линиях без существенного разброса. Вместе с тем следует отметить, что построение графиков не по уравнениям, а по фактическим точкам при числе факторов более четырех-пяти делает их очень трудоемкими. Кроме того, определенная субъективность в проведении изолиний по факторам (x_2 , x_3 и т. д.) может снизить точность прогнозов, так как ошибка в любом предыдущем квадранте неизбежно отразится и во всех последующих. Наложение же ошибок, сделанных при осреднении точек в каждом квадранте, может вообще привести к ошибочным прогнозам. Поэтому необходимо следить, чтобы пристраивание каждого нового квадранта приводило бы лишь к уменьшению разброса точек вокруг усредняющих их прямых или кривых линий. Этого можно

достичь путем некоторого смещения и подбора наилучшего расположения усредняющих линий в предыдущих квадрантах.

Особенно необходимы многофакторные графики для станций, на которых ЭВМ для расчетов уравнений регрессии пока еще не применяются. Построение графиков намного легче составления уравнений регрессии вручную. Кроме того, графики вскрывают незакономерность разброса отдельных точек, вызванную некачественными замерами, и, что самое главное, позволяют устанавливать истинный характер связей прогнозируемого элемента режима грунтовых вод с различными режимобразующими факторами. Приведенные ранее примеры показывают что многие из этих связей имеют явно нелинейный характер. В частности, во всех многофакторных связях при неглубоком залегании грунтовых вод линейности связи может и не быть, так как амплитуды колебаний уровней грунтовых вод в таких случаях в значительной степени зависят от мощности зоны аэрации и эта связь является не прямолинейной, а параболической [46]. Зависимость амплитуд колебаний уровней грунтовых вод от осадков также, видимо, нелинейная.

Спрямление таких линий связей, предусматриваемое самим методом линейной множественной корреляции, может привести к резкому снижению точности прогнозов и даже к их полной нереальности. Поэтому аналитический метод множественной линейной корреляции применим лишь при очень осторожном подборе режимобразующих факторов, имеющих линейную или близкую к ней связь с прогнозируемым параметром режима подземных вод. Хорошие результаты он дает при сравнительно глубоком залегании грунтовых вод от поверхности земли.

Анализ многочисленных расчетов максимальных весенних уровней грунтовых вод по территории РСФСР, проведенных автором совместно с Гидрорежимной экспедицией Министерства геологии РСФСР методом множественной корреляции, показал, что прогнозы этих уровней могут выдаваться за три-четыре месяца при достаточно высокой точности. На основе анализа приведенных ранее парных связей для массовой множественной корреляции были выбраны следующие факторы:

- x_1 — среднемесячный уровень грунтовых вод за январь в m ;
- x_2 — суммарные жидкие осадки осеннего периода (октябрь-ноябрь или сентябрь — ноябрь) в $мм$;
- x_3 — суммарные твердые зимние осадки (декабрь-январь) в $мм$;
- x_4 — суммарная среднемесячная температура холодного периода (октябрь — январь) в $^{\circ}C$.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы о роли различных факторов в формировании весеннего максимума.

1. Выбранные факторы позволяют составлять прогнозы весеннего максимума в 85% всех рассмотренных случаев. Лишь

в 15% случаев этих факторов для составления указанных прогнозов недостаточно. Низкие результаты прогнозов получены в северных районах в зоне развития вечной мерзлоты, а также на Дальнем Востоке, где процесс питания грунтовых вод сосредоточен во времени за счет активного участия в питании подземных вод весенних и летних осадков, в результате чего максимальный годовой уровень здесь, как уже отмечалось ранее, сдвинут на осень. Поэтому в феврале, т. е. на момент со-

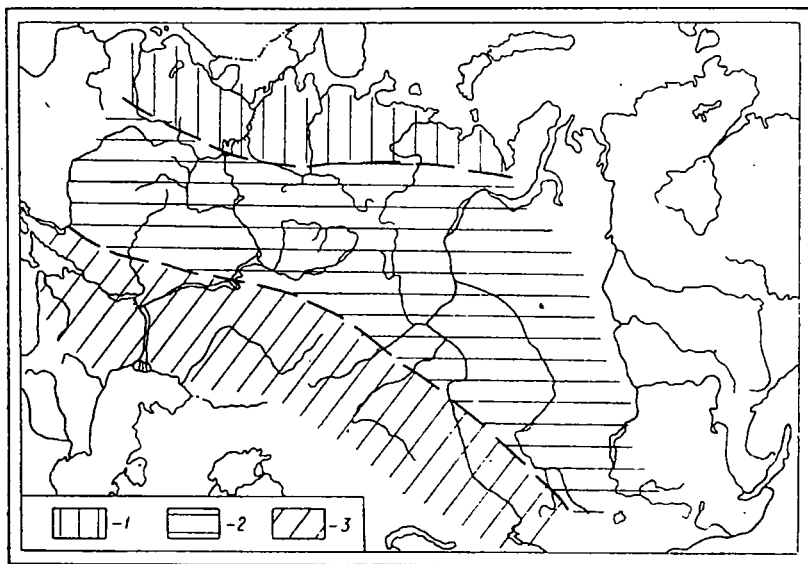


Рис. 31. Схематическая карта вероятности появления высоких ($r > 0,5$) коэффициентов корреляции между весенними максимальными и зимними (январскими) уровнями грунтовых вод

1 — около 25%; 2 — около 50%; 3 — свыше 65%

ставления прогнозов, основные факторы, формирующие максимальный уровень, еще не выявились, что и отразилось на качестве прогнозов для этих районов. Для остальных территорий к февралю уже определяются основные факторы, обуславливающие положение весеннего максимума текущего года.

2. Сопоставление степени участия различных факторов в формировании весеннего максимума показывает, что по всей территории РСФСР, независимо от литологического состава водовмещающих пород и глубины залегания грунтовых вод, основную роль играет предшествующий уровень грунтовых вод, т. е. среднемесячный уровень января. В большинстве случаев коэффициенты корреляции весеннего максимума с январскими уровнями выше 0,6. Лишь в двух скважинах северо-запада РСФСР коэффициенты корреляции были 0,15—0,2, но и в этом

случае весовое значение данного фактора было очень высоким.

Вероятность появления сравнительно высоких корреляционных связей (с коэффициентом корреляции свыше 0,5—0,6) между весенним максимумом и предшествующим зимним уровнем на наиболее изученной нами территории не одинакова и возрастает с северо-запада на юго-восток страны (рис. 31).

Характер вскрытых связей различных факторов с прогнозируемым весенним максимумом и их весовое значение в полученных уравнениях множественной корреляции показаны в табл. 12.

Таблица 12

Факторы x_i	Коэффициенты корреляции*			Значение фактора по весу в %				
	в абсолютных значениях	в процентах случаев в зависимости от их абсолютных значений			1-е место	2-е место	3-е место	4-е место
		>0,7	0,4—0,7	<0,4				
Среднемесячный уровень января x_1 . . .	0,19—0,96	50	35	15	80	8	4	8
Сумма осенних осадков x_2 . . .	0,02—0,48	6	18	76	4	40	35	21
Сумма зимних осадков (до января) x_3 . . .	0,07—0,96	10	40	50	15	33	22	30
Суммарная температура холодного периода x_4	0,03—0,74	4	26	70	2	23	44	31

* Коэффициенты корреляции даются без учета их знака.

3. Парных корреляционных связей для составления прогнозов максимальных весенних уровней бывает, как правило, недостаточно. Однако в 60% случаев такие прогнозы могут составляться и с помощью только парных связей. При этом вероятность использования парных связей с севера на юг возрастает. Например, процент случаев по отдельным регионам, где для прогнозов максимального уровня грунтовых вод можно использовать только парные связи, следующий: северо-запад СССР—около 50%, Московская область—55%, Западная Сибирь—40%, Саратовское Поволжье—65%, Башкирия—66%, Нижнее Поволжье—70%.

4. Во всех случаях (100%) введение дополнительных (к x_1) факторов приводило к увеличению тесноты связи, т. е. коэффициент множественной корреляции был выше коэффициента парной корреляции. При этом низкие (<0,5) частные коэффициенты корреляции выбранных факторов с прогнозируемым максимальным весенним уровнем грунтовых вод далеко не всегда

имеют соответственно малое весовое значение в прогнозном уравнении. Существенная роль проанализированных факторов была отмечена (при низких коэффициентах корреляции) в следующих случаях: с x_1 — в 23%, с x_2 — в 20%, с x_3 — в 7% и с x_4 — в 10%.

5. Роль метеорологических факторов в формировании весеннего максимума в различных климатических зонах не одинакова. На северо-западе СССР и в Центральных районах нечерно-

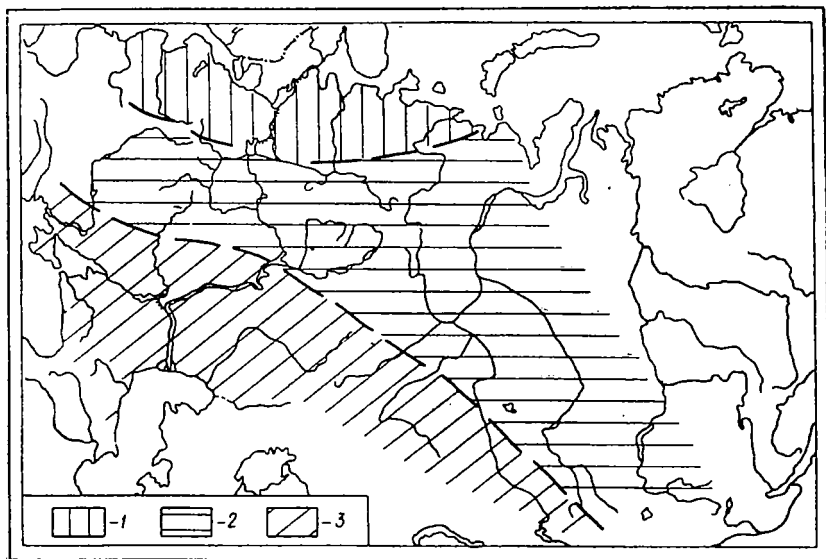


Рис. 32. Схематическая карта вероятности появления тесных корреляционных связей ($r > 0,5$) между максимальными весенними уровнями грунтовых вод и суммарными зимними осадками

1 — свыше 60%; 2 — 40–60%; 3 — менее 40%

земной области на втором месте (после x_1) по значимости стоят зимние осадки (x_3), роль которых во всех случаях высока. Именно в этих районах коэффициенты корреляции с зимними осадками достигают 0,96. Значение осенних осадков и температуры воздуха холодного периода здесь много меньше, чем первых двух факторов, т. е. основную роль в питании грунтовых вод играют зимние осадки. Вероятность установления высоких ($r > 0,5—0,6$) корреляционных связей между весенним максимальным уровнем и зимними осадками убывает с северо-запада на юго-восток страны (рис. 32).

В Среднем и Нижнем Поволжье, Прикаспии и на юге Западной Сибири на втором месте (после x_1), как правило, стоят осенние осадки, а на третьем — температура холодного периода. Роль осенних осадков в формировании весеннего максиму-

ма здесь соизмерима с ролью предшествующих уровней подземных вод, а иногда даже больше ее (Западная Сибирь), т. е. условия ежегодного восполнения запасов подземных вод определяются в этих районах интенсивностью осеннего увлажнения зоны аэрации.

6. Наиболее низкие коэффициенты корреляции связи максимальных весенних уровней с предшествующими зимними наблюдаются в известняках, а наиболее высокие — в суглинках и песках, т. е. инерционность водоносного горизонта прямо зависит от скоростей фильтрации подземных вод и интенсивности водообмена. Роль остальных факторов мало зависит от литоло-

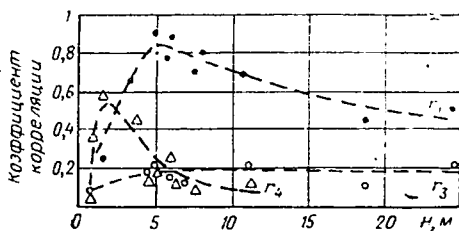


Рис. 33. График зависимости тесноты связей максимальных весенних уровней с зимними уровнями r_1 , осадками r_3 и температурами воздуха r_4 от глубины залегания грунтовых вод H

гического состава водовмещающих пород и пород зоны аэрации.

7. Теснота взаимосвязи прогнозируемого максимального весеннего уровня и рассматриваемых факторов в значительной степени зависит от мощности зоны аэрации, определяющей степень изолированности водоносного горизонта от внешних воздействий. Для всех факторов отмечается уменьшение степени их связи с прогнозируемым уровнем при малых мощностях зоны аэрации (особенно менее 1 м). С увеличением мощности зоны аэрации абсолютные значения коэффициентов корреляции возрастают и на глубинах 5—6 м (для связей весеннего максимума с предшествовавшими зимними уровнями и зимними осадками) и около 1,5 м (для связей с температурами воздуха зимнего периода) достигают своего максимума. При дальнейшем увеличении мощностей зон аэрации коэффициенты корреляции постепенно затухают (рис. 33).

Уменьшение связи уровней с определяющими их факторами при малых глубинах объясняется регулирующей ролью зоны аэрации, лимитирующей возможные колебания (амплитуды) уровней грунтовых вод, а при больших глубинах — рассредоточением питания грунтовых вод во времени и ослаблением воздействия основных режимобразующих факторов на подземные воды.

Выявленные для каждого района аналогичные зависимости позволяют определить оптимальное число факторов, которые следует учитывать при составлении прогнозов весенних максимумов в зависимости от глубины и литологического состава водовмещающих пород.

8. Теснота проанализированных множественных корреляционных связей, так же как и парных, в значительной степени зависит от заблаговременности прогноза. На рис. 34, *a* показаны изменения частных коэффициентов корреляции связи максимального весеннего (майского) уровня по одной из скважин Москвы с некоторыми основными режимобразующими факторами в зависимости от заблаговременности составления прогноза (от двух до четырех месяцев). Как видно из рисунка, все коэффициенты корреляции с увеличением заблаговременности уменьшаются. При этом особенно интенсивно, как правило, уменьшаются связи с метеорологическими факторами (атмос-

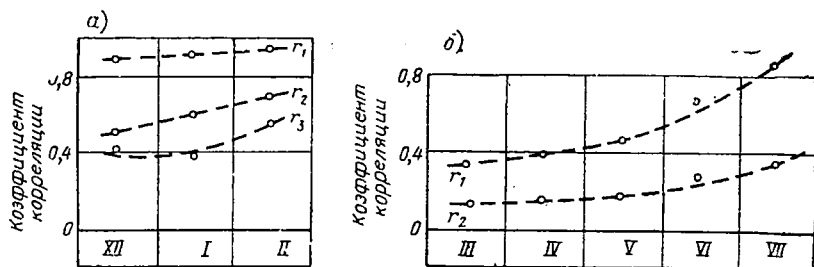


Рис. 34. Графики зависимости тесноты связей прогнозируемого максимального годового уровня грунтовых вод от определяющих его факторов при различной заблаговременности составления прогноза

ферными осадками зимнего периода r_2 и температурой воздуха зимнего периода r_3) и значительно медленнее со среднемесячными уровнями предыдущего периода (февраля, января и декабря). Это вполне понятно, так как чем больший период накопления твердых зимних осадков, определяющих весеннее инфильтрационное питание грунтовых вод, и суммарных зимних температур воздуха, определяющих условия промерзания зоны аэрации, можно учесть к моменту составления прогноза, тем более точно можно оценить максимальный весенний уровень. Среднемесячные же уровни грунтовых вод для периода независимого спада довольно тесно связаны между собой (см. главу III), и поэтому связи этих уровней с максимальным весенним уровнем r_1 сохраняются довольно высокими и при увеличении заблаговременности.

Приведенный пример позволяет сделать вывод о том, что в подобных климатических условиях прогнозы с учетом конкретной метеорологической обстановки данного года имеют смысл при сравнительно небольшой заблаговременности (до двух-трех месяцев). С увеличением же заблаговременности основным фактором для прогноза становятся уровни подземных вод предшествующего периода.

Более резко затухание корреляционных связей происходит в зонах с муссонным климатом (Приморье), где максимум сдвинут на август-сентябрь и в его формировании участвуют летние осадки (рис. 34, б). Здесь r_1 — коэффициенты корреляции между максимальным уровнем и среднемесячными уровнями предшествовавшего периода (марта, апреля и т. д.), а r_2 — коэффициенты корреляции между теми же максимальными уровнями и суммарными летне-весенними осадками (также последовательно марта—мая и т. д.).

Как видно из рис. 34, удовлетворительные множественные связи здесь получаются при заблаговременности про-

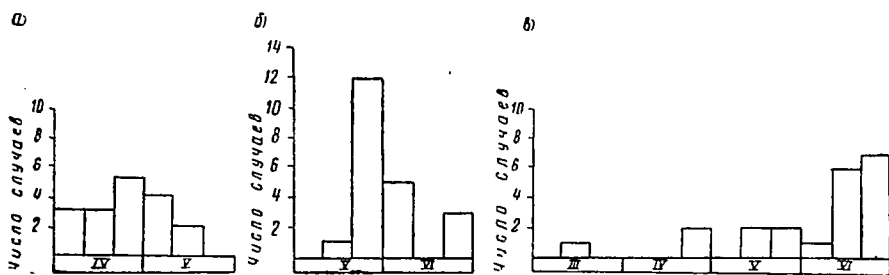


Рис. 35. Гистограммы времени наступления весеннего максимума уровней грунтовых вод с различными глубинами залегания (0, 5, 3 и 10 м)

а — скважина 48; б — скважина 19; в — скважина 28

гнозов не более двух месяцев, а в ряде случаев (при хорошо проницаемой зоне аэрации, когда график колебаний уровней грунтовых вод имеет пилообразную форму) факторные сезонные прогнозы вообще невозможны.

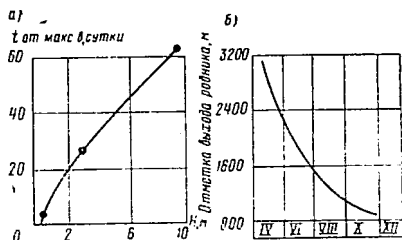
Прогнозы времени наступления максимальных уровней подземных вод пока еще плохо освоены и весьма сложны. Связано это с тем, что время наступления максимума также определяется многими факторами, большая часть которых обычно неизвестна с необходимой заблаговременностью. К таким факторам прежде всего относятся: 1) время начала весеннего подъема уровней грунтовых вод; 2) мощность зоны аэрации в период начала подъема уровня грунтовых вод, определяющая время прохождения инфильтрующейся влаги от поверхности земли до грунтовых вод; 3) температура воздуха в период снеготаяния, определяющая степень «дружности» весны и интенсивность инфильтрации; 4) наличие дождей в конце снеготаяния, способных продлить время питания грунтовых вод и сместить во времени весенний максимум, и др.

Несмотря на многофакторность весеннего максимума, ведущая роль в нем принадлежит мощности зоны аэрации, определяющей интенсивность воздействия или весовое значение отдельных факторов, а также рассредоточивающей процесс пита-

ния подземных вод во времени. Из рис. 35 видно, что, несмотря на сравнительно одновременное начало весеннего подъема уровня грунтовых вод в районе Щемиловского стационара ВСЕГИНГЕО (в марте — начале апреля), время наступления максимального уровня грунтовых вод в различных скважинах, расположенных на участках с разной мощностью зоны аэрации, отличается на два-три месяца. При этом чем меньше зона аэрации, тем более компактно группируются периоды максимальных уровней, и наоборот.

На основе гистограмм, аналогичных изображенным на рис. 35, могут быть составлены графики зависимости средне-

Рис. 36. График зависимости отставания времени наступления весеннего максимума уровней грунтовых вод $t_{от. макс. в}$ (а) от глубины их залегания H (Подмосковье) и дебитов родников (б) от гипсометрической высоты выхода родника (Армения)



многолетнего времени наступления весеннего максимума грунтовых вод от глубин их залегания (рис. 36). По таким графикам можно легко установить время сдвига или отставания наступления максимальных уровней в зависимости от степени их изолированности от поверхности земли и, зафиксировав максимум на участках с малыми глубинами залегания грунтовых вод, определить время наступления максимума на участках с большими глубинами. Заблаговременность таких прогнозов может достигать двух и более месяцев. Еще большая заблаговременность прогноза может быть в горных районах (см. рис. 36).

Несмотря на очевидность доминирующего влияния мощности зоны аэрации, корреляционные связи времени наступления максимальных уровней грунтовых вод с уровнями предшествовавшего периода показывают лишь наличие тенденции или минимальных пределов, раньше которых максимальный уровень наступить не может.

Более эффективными при составлении данного прогноза должны быть, видимо, методы множественной корреляции дат наступления максимальных уровней с датами наступления предвесеннего минимума, прогнозными мощностями зоны аэрации, температурами за период снеготаяния и другими факторами.

ПРОГНОЗЫ ОСЕННЕГО И ЗИМНЕ-ВЕСЕННЕГО МАКСИМУМОВ

Особенностью прогнозов осенних (для второй провинции) и зимне-весенних (для третьей провинции) максимальных уровней является то, что питание грунтовых вод в эти периоды осу-

ществляется не за счет накапливающихся за зиму твердых осадков, а за счет выпадающих жидких соответственно осенних и зимних осадков. Эта особенность значительно затрудняет составление данных прогнозов, так как прогнозы первопричины, т. е. осадков, выдаются всего лишь с месячной заблаговременностью, да и то весьма условно. В соответствии с этим генетические или факторные прогнозы осенних и зимне-весенних максимальных уровней грунтовых вод могут производиться лишь с

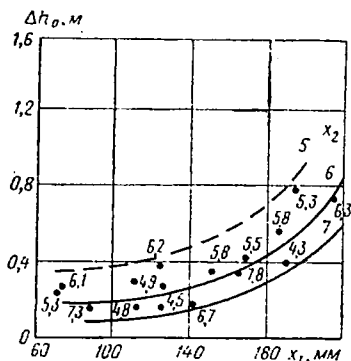


Рис. 37. График зависимости амплитуды осеннего подъема уровня грунтовых вод Δh_0 по одной из скважин Подмосковья от суммы жидких осенних осадков x_1 (за IX—XI) и дефицита влажности воздуха за сентябрь — ноябрь x_2 , мб

весьма малой заблаговременностью, т. е. при краткосрочных прогнозах. Принцип составления таких прогнозов во многом аналогичен описанному ранее. Здесь также применяются как парные, так и множественные связи. Во избежание повторений перечислим лишь основные возможные корреляционные зависимости, позволяющие составлять прогнозы осенних и зимне-весенних максимальных уровней.

1. Зависимость амплитуд осеннего или зимнего подъема уровня грунтовых вод от суммы жидких осадков за соответствующие периоды. Используемые для прогнозов суммы осадков могут быть получены различными путями:

а) по данным метеосиноптических прогнозов;

б) установлением корреляционных связей осадков с типами атмосферной циркуляции и прогнозом на этой основе возможных осенних или зимних осадков;

в) выбором по многолетним данным прогнозных статистических значений осадков с разными их обеспеченностями. В соответствии с этим прогнозы максимальных значений уровней будут многовариантными и разнообеспеченными.

При таких прогнозах важно установить величину осадков, участвующих в питании грунтовых вод, и пределы того минимального количества осадков, которое, расходуясь на испарение и сток, не сказывается на подъеме уровня.

2. Зависимость амплитуд осеннего или зимнего подъема уровня от суммы жидких осадков x_1 и среднего дефицита влажности воздуха x_2 за соответствующий период (рис. 37). Вместо дефицита влажности воздуха могут быть использованы средние или суммарные среднемесячные температуры воздуха, которые косвенно отражают размеры возможного испарения выпавших атмосферных осадков в этот период. В качестве третьего фактора можно использовать влажность в зоне аэрации для учета

степени ее иссушенности за предшествовавший летний период, а следовательно, косвенного учета потерь инфильтрующейся воды на увеличение размеров связанной влаги в зоне аэрации.

3. Зависимость осенних и зимних максимальных уровней грунтовых вод от предшествовавших минимальных летне-осенних уровней или от среднегодовых уровней предшествовавшего года для учета, с одной стороны, влияния мощности зоны аэрации на возможные амплитуды осенне-зимнего подъема, а с другой — для учета предствовавшей прогнозу водности года, которая косвенно может характеризовать и степень увлажнения зоны аэрации, и положение данного года в группировке маловодных или многоводных лет, и соответствующие данным группировкам лет возможные размеры осенне-зимних осадков.

В целом прогнозы осенних и зимних максимальных уровней грунтовых вод или дебитов источников являются одними из наиболее сложных. Методы этих прогнозов в достаточной мере еще не разработаны, и поэтому апробация и совершенствование таких прогнозов, а также изучение условий и факторов, определяющих величины максимальных осенних и зимних уровней грунтовых вод, являются первоочередными.

Все рассмотренные выше методы прогнозов максимальных годовых значений уровней подземных вод применимы в основном для территорий, характеризующихся междуречным, склоновым или террасовым видами режима. Для участков с речным видом режима подземных вод, определяемым преимущественно колебаниями уровней поверхностных вод, наиболее достоверные прогнозы могут быть получены на основе корреляционных связей или аналитических зависимостей между уровнями поверхностных и подземных вод. Учитывая весьма малую заблаговременность гидрологических прогнозов, их целесообразно составлять в следующих случаях:

1) для экстренных или краткосрочных прогнозов с целью предупреждения о возможных катастрофических подъемах уровней грунтовых вод в те моменты, когда уже были зафиксированы высокие уровни воды в реках. Для этого могут использоваться графики связей, аналогичные представленным на рис. 9, либо расчеты простой парной корреляции между уровнями или расходами реки и уровнями грунтовых вод. Время наступления прогнозируемых максимальных уровней грунтовых вод может быть определено по графикам, аналогичным графикам на рис. 10;

2) для участков, расположенных на сравнительно большом расстоянии от реки, где ее воздействие проявляется с большим запозданием (до одного-двух месяцев) и такая заблаговременность не теряет практического значения;

3) для бассейнов тех рек, по которым гидрометеослужбой составляются долгосрочные прогнозы режима рек, обеспечивающие необходимую заблаговременность гидрогеологических

прогнозов. В этих случаях последние базируются на прогнозных значениях режима поверхностных вод.

Для малых рек, характеризующихся небольшими величинами подпора грунтовых вод, соизмеримыми с величинами инфильтрационного питания и определяющимися закономерностями изменений метеорологической обстановки той локальной территории водосбора, в пределах которой располагается анализируемая наблюдательная скважина, прогнозы приречного режима грунтовых вод могут составляться так же, как и для других видов режима.

В зонах развития типичного приречного вида режима прогнозы максимальных весенних уровней подземных вод могут основываться либо на связях между уровнями поверхностных и подземных вод, либо на связях между расходами поверхностных вод и уровнями подземных вод. Предпочтительнее первые связи, так как вторые часто нелинейны, хотя и те и другие нередко почти в равной мере характеризуются довольно высокими (0,8—0,9) коэффициентами корреляции.

**ПРОГНОЗЫ СРЕДНЕГОДОВЫХ УРОВНЕЙ И ДЕБИТОВ
ГРУНТОВЫХ ВОД ТЕКУЩЕГО ГОДА**

Прогнозы среднегодовых уровней грунтовых вод могут использоваться для планирования среднегодового отбора воды водозаборами, регулирования потребления воды из источников, мелиоративных и строительных мероприятий, составления гидрологических и агрометеорологических прогнозов и т. д.

В зависимости от практической надобности прогнозы среднегодовых уровней могут выдаваться в середине или начале текущего года, а также с заблаговременностью до полутора — трех и более лет. Естественно, что точность и методы таких прогнозов будут различными. Мы рассмотрим лишь наиболее достоверные сезонные прогнозы среднегодовых уровней подземных вод.

Сравнительно точные факторные прогнозы среднегодового уровня текущего года могут быть даны в июне-июле этого же года. К этому времени уже проявляются почти все основные факторы, определяющие среднегодовой уровень грунтовых вод текущего года. К ним относятся те же факторы, которые определяют размеры максимальных и минимальных уровней грунтовых вод, их соотношение и продолжительность. Учесть все эти факторы в одном прямом расчете практически невозможно, поэтому единственно возможен косвенный учет их суммарного воздействия.

Рассмотрим несколько случаев, для которых составляются прогнозы среднегодовых уровней.

1. В тех случаях, когда основной минимальный уровень в году наступает в летне-осенний период и метеорологические факторы (осадки, испарение) влияют на него незначительно, что наблюдается при сравнительно глубоком залегании грунтовых вод, устанавливается довольно тесная парная корреляционная связь между среднегодовым и максимальным весенним уровнями грунтовых вод этого же года. И это понятно, так как в этих случаях минимальный осенний уровень тесно связан с максимальным весенним (см. главу III), а среднегодовой уровень зависит в основном от соотношения этих двух положений уровня. Указанные зависимости были апробированы Центральной партией прогнозов режима подземных вод ВСЕГИНГЕО, автором и Центральной партией прогнозов гидрорежимной экспедиции Министерства геологии РСФСР для различных районов страны, что подтвердило их приемлемость для прогнозирования в указанных гидрогеологических условиях (рис. 38).

2. В тех случаях, когда основным минимумом в году является предвесенний, более точные прогнозы могут быть получе-

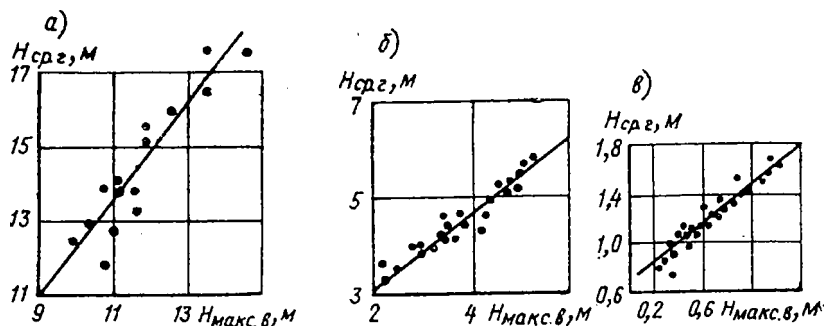


Рис. 38. Графики зависимости среднегодового уровня грунтовых вод $H_{ср.г}$ от максимального весеннего $H_{макс.в}$ по некоторым скважинам Силурийского плато (а), Каменной степи (б) и Северного Казахстана (в)

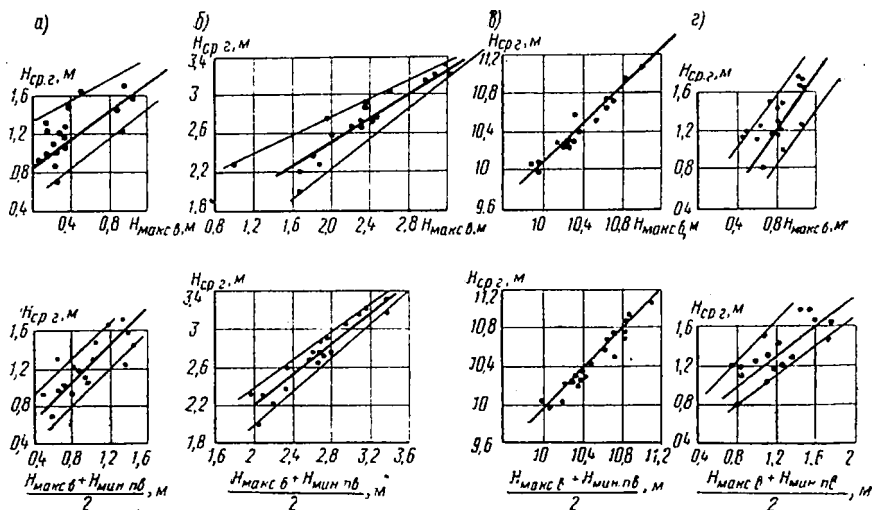


Рис. 39. Графики зависимости среднегодовых уровней грунтовых вод $H_{ср.г}$ от максимальных весенних $H_{макс.в}$ и полусуммы максимальных весенних и минимальных предвесенних уровней грунтовых вод $\frac{H_{макс.в} + H_{мин.пв}}{2}$

а — скважина 6; б — скважина 26; в — скважина 28; г — скважина 48

ны по зависимостям среднегодового уровня грунтовых вод от полусуммы максимального весеннего и минимального предвесеннего уровня.

На рис. 39 приведены для сравнения графики зависимости среднегодовых уровней грунтовых вод по ряду скважин Подмосковского стационара ВСЕГИНГЕО как только от максимального весеннего, так и от полусуммы максимального весеннего и минимального предвесеннего уровня грунтовых вод. Как

видно из приведенных графиков, последняя связь во всех случаях показала значительно меньший разброс точек. Сопоставимыми оказались лишь графики с самой большой мощностью зоны аэрации (скважина 28). Зависимость среднегодового уровня от полусумм показывает наличие определенной связи даже в тех случаях, когда зависимость среднегодового уровня только от одного максимального уровня практически не устанавливается (скважина 6 и др.).

3. Для районов с резко выраженным муссонным климатом (например, Приморья), где в формировании режима грунтовых вод, а следовательно и среднегодовых уровней, существенную роль играют летние и особенно осенние осадки, парных корреляционных связей с указанными полусуммами становится недостаточно. В этих районах для достоверных прогнозов среднегодовых уровней необходимо учитывать также и осенние максимумы. Наиболее доступной формой одновременного учета всех основных экстремальных годовых уровней грунтовых вод является парная связь среднегодовых уровней с суммой минимальных предвесенних, максимальных весенних и максимальных осенних уровней или с третью этой суммы:

$$H_{\text{ср.г}} = f \frac{(H_{\text{мин.пв}} + H_{\text{макс.в}} + H_{\text{макс.о}})}{3}$$

4. При малых мощностях зоны аэрации (менее 2 м) почти во всех районах не только первая, но и вторая и третья зависимости не дают достаточной для качественных прогнозов тесноты связи. Это объясняется тем, что при малых мощностях зоны аэрации на величину среднегодового уровня грунтовых вод существенно влияют величины минимальных осенних уровней грунтовых вод, на величину которых в свою очередь влияют атмосферные осадки, дефицит влажности и температура воздуха осенне-летнего периода (особенно периода снеготаяния и начального этапа спада уровня). Прогнозы среднегодовых уровней в таких случаях должны быть уже многофакторными.

На рис. 40 показана возможность расчленения полученного разброса точек по скважинам 6, 21 и 48 Шемиловского стационара ВСЕГИНГЕО путем введения третьего фактора x_2 , в качестве которого были приняты либо суммарные среднемесячные температуры воздуха за апрель—июнь включительно, либо суммарные атмосферные осадки за апрель—июнь, либо среднегодовые уровни грунтовых вод за предыдущий год. Первые два фактора позволяют косвенно учесть величину питания и испарения грунтовых вод в период их наиболее близкого залегания от поверхности земли, а третий—общую увлажненность или водность периода прогноза по относительному положению уровней грунтовых вод в многолетнем аспекте, т. е. по их приуроченности к группировкам многоводных или маловодных лет.

Из рис. 40 видно, что, несмотря на выпадение отдельных то-

чек из общего закономерного их расположения, последнее имеет вполне четкую тенденцию и может быть обобщено путем проведения соответствующих изолиний. Помимо указанных выше факторов, для составления аналогичных корреляционных связей могут использоваться и другие: дефицит влажности воздуха, запасы влаги в зоне аэрации и др.

Выпадение отдельных точек из общего закономерного их расположения, а также наличие довольно четких связей про-

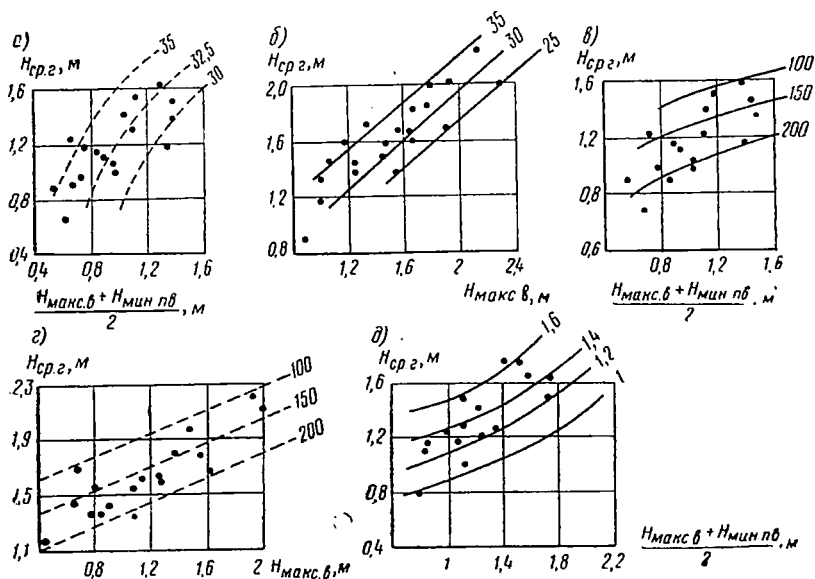


Рис. 40. Графики зависимости среднегодовых уровней грунтовых вод $H_{ср.г}$ от максимальных весенних $H_{макс.в}$, полусуммы максимальных весенних и минимальных предвесенних уровней $\frac{H_{макс.в} + H_{мин.пв}}{2}$, суммарных температур воздуха в °С (а), (б), атмосферных осадков за апрель — июнь (в), (г) в мм, а также от среднегодовых уровней грунтовых вод предыдущего года в м (д)

гнозируемого среднегодового уровня грунтовых вод сразу с несколькими факторами свидетельствуют о возможности установления более многофакторных связей.

Проведенные массовые расчеты прогнозов методом множественной корреляции показали, что наиболее тесные корреляционные связи устанавливаются с полусуммами максимальных весенних и минимальных предвесенних уровней, суммарными весенними (апрель-май) осадками и суммарным весенним дефицитом влажности воздуха, менее тесные — с суммарной среднемесячной температурой весеннего периода. Так же как и в предыдущих прогнозах максимальных и минимальных уров-

ней грунтовых вод, весовая роль каждого из этих факторов далеко не одинакова. Во всех районах в большинстве случаев основное значение в формировании среднегодовых уровней грунтовых вод имеют либо максимальные весенние уровни, либо полусуммы максимальных весенних и минимальных предвесенних уровней (табл. 13).

Как видно из табл. 13, в 82% случаев коэффициенты корреляции среднегодовых уровней с уровнями предшествовавшего периода превышают 0,7 (достигая иногда даже 0,99) и в 95% случаев являются основным фактором, определяющим величину среднегодового уровня. Значительно меньшую, но довольно весомую роль играют атмосферные осадки весеннего периода.

Таблица 13

Факторы x_i	Коэффициенты корреляции			Значение факторов по весу в %				
	в абсолютных значениях	в процентах случаев в зависимости от их абсолютных значений			1-е место	2-е место	3-е место	4-е место
		>0,7	0,4—0,7	<0,4				
$x_1 \left(\frac{H_{\text{макс}} + H_{\text{мин}}}{2} \right)$	0,4—0,99	82	17	1	95	5	—	—
x_2 (осадки за IV—V)	0,06—0,91	32	34	34	4	55	26	15
x_3 (Σt за IV—V)	0,02—0,73	7	16	77	—	22	27	51
x_4 (Σd за IV—V)	0,01—0,88	4	36	60	3	19	43	35

Роль температур и дефицита влажности воздуха за весенний период, как видно из табл. 13, оказалась существенной лишь соответственно в 7 и 4% случаев. В большинстве же случаев значение этих факторов невелико. Наиболее высокие значения коэффициентов корреляции уровней с дефицитом влажности воздуха отмечаются в Прибалтике, на Дальнем Востоке и Сахалине, т. е. на прилегающих к морям территориях. Значение температур воздуха наиболее четко проявляется в зонах переменного увлажнения (Среднее Поволжье, Кулунда и юг Западной Сибири, Приморье и юг Хабаровского края), т. е. там, где весенне-летние осадки и испарение играют существенную роль в питании грунтовых вод.

Несмотря на то, что в 82% всех рассмотренных случаев для прогнозов среднегодового уровня можно использовать только парную корреляционную связь (с полусуммой весеннего максимума и предвесеннего минимума или с весенним максимумом) введение дополнительных факторов (особенно весенних осадков) в 71% случаев усиливало корреляционные связи и качество прогнозов. В остальных случаях теснота связей либо практически не изменялась, либо даже несколько ухудшалась (т. е. ко-

эффиценты множественной корреляции становились меньше парных с x_1). Лишь в 4% случаев (в Приморье и на Колыме) даже учет всех факторов не дал удовлетворительных связей ($R > 0,74$), что объясняется трудностью учета летних осадков в первом районе и закономерностей сезонного оттаивания и промерзания почвы во втором. В целом достоверность прогнозов возрастает с увеличением аридности климата. В направлении с севера на юг возрастает роль первого фактора (предшествующих уровней) и уменьшается роль остальных. Наиболее тесная связь коэффициентов корреляции среднегодовых уровней с атмосферными осадками и дефицитом влажности весенне-летнего периода отмечается в известняках, менее тесная — в супесях и совсем низкая — в песках.

Коэффициенты корреляции парных связей среднегодовых уровней с экстремальными уровнями в большинстве случаев возрастают с увеличением глубины и при глубинах залегания грунтовых вод до 3—4 м в рыхлых осадках составляют 0,7—0,8 (редко 0,95), а свыше 4 м, как правило, более 0,8. Коэффициенты корреляции среднегодовых уровней с метеорологическими факторами (x_2 , x_3 и x_4) чаще всего с увеличением глубины, наоборот, затухают. Лишь в зоне аэрации водоносных горизонтов, приуроченных к известнякам с открытой трещиноватостью, ни по одному из проанализированных факторов не удалось установить какой-либо зависимости тесноты корреляционных связей от глубины залегания грунтовых вод.

Вскрытые закономерности показывают, что прогнозы среднегодовых уровней подземных вод могут составляться с различной заблаговременностью дважды в год.

Предварительные прогнозы с использованием только парных корреляционных связей могут выдаваться уже в январе-феврале текущего года. При этом в качестве предвесеннего минимума и весеннего максимума берутся их прогнозные значения. Точность таких прогнозов среднегодовых уровней, естественно, зависит от точности прогнозов минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней. Однако проверка достоверности подобных прогнозов показала их удовлетворительность по большинству районов РСФСР.

Более достоверные прогнозы среднегодовых уровней подземных вод по большинству районов СССР (за исключением Крайнего Севера, Якутии и Дальнего Востока) могут выдаваться в мае — июле, т. е. после того как станут известными минимальные предвесенние и максимальные весенние уровни, а также осадки и дефицит влажности (или температура) воздуха за период наиболее высокого весеннего подъема уровней грунтовых вод.

В районах Крайнего Севера и Дальнего Востока достоверные прогнозы среднегодовых уровней можно дать чаще всего лишь в августе-сентябре.

**ДОЛГОСРОЧНЫЕ И СВЕРХДОЛГОСРОЧНЫЕ
МНОГОЛЕТНИЕ ПРОГНОЗЫ
УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Из приведенных в предыдущих главах примеров и закономерностей формирования режима подземных вод можно установить, что с увеличением заблаговременности прогнозов всех основных параметров режима уровней подземных вод (минимальных, максимальных и среднегодовых) значение метеорологических факторов текущего года для всех климатических зон и гидрогеологических условий довольно быстро снижается и их использование теряет целесообразность при заблаговременности прогнозов свыше трех—шести месяцев. При этом значение уровней предшествующего периода как фактора во всех прогнозах уменьшается значительно медленнее и высокие коэффициенты корреляции, обеспечивающие достаточное качество прогнозов, сохраняются иногда до 10 месяцев и более. В результате значение предшествующих уровней, отражающих историю формирования ресурсов подземных вод, с увеличением заблаговременности прогнозов постепенно растет (по сравнению с другими факторами) и при долгосрочных многолетних прогнозах становится уже доминирующим.

Основываясь на этом выводе, мы провели автокорреляцию 155 наиболее длинных рядов наблюдений за режимом подземных вод по скважинам, родникам и колодцам, расположенным в различных (как в климатическом, так и в геологическом отношении) районах СССР. Одной из основных задач автокорреляции явилось установление взаимосвязи уровней подземных вод соседних лет [10, 92 и др.].

Расчет автокорреляционных функций был проведен отдельно для среднегодовых, минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней подземных вод. Результаты расчетов показаны в табл. 14.

Таблица 14

Анализируемые уровни	Процент случаев высоких значений коэффициентов автокорреляции R_{τ} при сдвиге τ в годах								
	$\tau=1$			$\tau=2$			$\tau=3$		
	>0,8	0,6—0,8	0,4—0,6	>0,8	0,6—0,8	0,4—0,6	>0,8	0,6—0,8	0,4—0,6
Среднегодовые	24	29	21	6,5	20	18	6,5	10	9
Минимальные предвесенние	12	23	22	5,5	11	16	3	3	6,4
Максимальные весенние	15	19	24	7	14	11	4	11	10

Как видно из табл. 14, высокая степень достоверности прогнозов (с коэффициентом корреляции свыше 0,8) при заблаговременности в один год может быть достигнута по среднегодовым уровням в 24% случаев, по минимальным предвесенним — в 12% случаев и по максимальным весенним в 15% случаев при использовании для прогнозов только парных корреляционных зависимостей прогнозного среднегодового, минимального или максимального уровня от соответствующих уровней предыдущего года.

С увеличением заблаговременности до двух-трех лет возможность получения прогнозов высокой достоверности тем же методом постепенно уменьшается до 7—3%.

Однако, если снизить требования к точности прогнозов и принять в качестве критерия тесноты связи $R_r = 0,6$, то возможность составления прогнозов, удовлетворяющих этому требованию, резко возрастет. Так, при заблаговременности в один год качественные прогнозы среднегодовых уровней могут быть получены в 53% случаев, при заблаговременности в два года — в 26,5% случаев и в три года — в 16,5% случаев. Аналогичным образом могут быть получены прогнозы минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней с заблаговременностью до трех лет соответственно в 35, 16,5, 6% и 34, 21, 15% случаев.

Апробация прогнозов среднегодовых уровней подземных вод с использованием автокорреляции [по уравнению (61)] с заблаговременностью в один год показала высокую сходимость фактических и расчетных значений уровней. При этом ошибки не выходят за пределы допустимых и не превышают ошибки прогнозов, основанных на факторных корреляционных связях с заблаговременностью шесть-семь месяцев.

Эти расчеты показали также, что при продолжительных рядах наблюдений (свыше 20 лет) отношение $\sigma_{h_{n-1}}/\sigma_{h_{n-1}}$ мало отличается от единицы, что упрощает расчеты прогнозов. При коротких же рядах это отношение изменяется иногда в довольно широких пределах — от 0,4 до 1,2, что обязывает проводить его расчеты для каждого прогноза, т. е. уточнять ежегодно.

Зависимость последующих уровней от предыдущих, выражаемая коэффициентом автокорреляции, отражает усредненную зависимость каждого последующего уровня от предыдущего независимо от наличия цикличности в анализируемом многолетнем ряду. Вскрытие же аналогичных связей отдельно для периодов подъема и спада уровней в многолетнем разрезе показывает, что коэффициенты корреляции связей уровней соседних лет, находящихся на ветви многолетнего спада, всегда выше таких коэффициентов, располагающихся на ветви многолетнего подъема. Последнее обстоятельство показывает, что при наличии достаточно длинных рядов наблюдений целесообразно состав-

лять два или даже три уравнения регрессии: для ветви спада, для ветви подъема и суммарное, которым можно пользоваться в годы предполагаемых перегибов в многолетних колебаниях уровней.

Автокорреляционные функции достаточно перспективны для составления долгосрочных многолетних прогнозов.

Анализ взаимосвязи уровней и расходов подземных вод соседних лет показывает, что наиболее низкие коэффициенты автокорреляции наблюдаются в хорошо фильтрующих породах в районах с интенсивной дренированностью подземных вод (Силурийское плато, Грузия, Армения), а наиболее высокие — в слабофильтрующих породах и в слабодренированных водоносных горизонтах с большой протяженностью пути фильтрации подземных вод. Другими словами, взаимосвязь уровней подземных вод соседних лет определяется степенью инерционности водоносного горизонта и регулирующей ролью водовмещающей среды, в которой формируются подземные воды.

Перераспределение давлений или напоров в водоносном горизонте, вызываемое неравномерностью питания подземных вод по площади, на несколько порядков выше скоростей фильтрации подземных вод. В результате амплитуды колебаний уровней подземных вод, связанные с сезонным восполнением их ресурсов, довольно быстро выравниваются до какой-то определенной по водоносному горизонту величины. Разгрузка же водоносного горизонта сильно рассредоточена во времени, и поэтому уровни подземных вод (и особенно минимальные их значения) отражают во многом интегральную характеристику увлажненности иногда ряда предыдущих лет. Этим объясняется тот факт, что с атмосферными осадками каждого года (в качестве которых учитываются главным образом эффективные осадки зимнего периода) хорошо коррелируются лишь амплитуды весеннего подъема уровней подземных вод. Абсолютные же значения среднегодовых уровней подземных вод лучше коррелируются с интегральными осадками за многолетие.

Установить интегрирующую роль водоносного горизонта можно, например, путем последовательной корреляции уровней подземных вод с суммарными годовыми или эффективными зимними атмосферными осадками, сглаженными по 3, 5, 7 и 10-летиям с соответствующим увеличением длины ряда наблюдений за осадками на два, четыре, шесть, девять лет. Таким образом, с увеличением числа сглаживаемых лет увеличивается суммарная характеристика осадков предыдущих лет, определяющих величину уровня подземных вод каждого конкретного года. Так, например, при подобной корреляции среднегодовых уровней грунтовых вод по скважине 6 (Москва, ряд наблюдений с 1934 по 1970 г.) с суммарными годовыми осадками нами были получены результаты, показанные в табл. 15.

Как видно из табл. 15, с увеличением данных об осадках

Число сглаживаемых лет	Период осадков, учитываемых при корреляции	Коэффициент корреляции $H=f(\Sigma_{oc})$
—	1934—1970	0,26
5	1930—1970	0,35
10	1925—1970	0,5
15	1920—1970	0,8
20	1915—1970	0,13

предшествующих лет коэффициенты корреляции постепенно возрастают и достигают 0,8 при сглаживании по 15-леткам. Дальнейшее увеличение заблаговременности уменьшает связь коррелируемых характеристик. Следовательно, интегрирующая способность водоносного горизонта, или скорость его водообмена на данном участке, равна примерно 15 годам.

Подобные расчеты, проведенные по многим скважинам, показали, что уровни подземных вод часто зависят от суммарных осадков за три—семь предыдущих лет. Наиболее тесной подобная связь была при коррелировании среднегодовых уровней грунтовых вод с учетом разности суммарных осадков ряда лет и суммарных испарений того же периода. При этом в качестве годовых осадков использовались как суммарные годовые, так и только эффективные осадки холодного периода (октябрь—май), а в качестве годового испарения — испарение теплого (май—октябрь) периода.

Проведенные расчеты показывают, что предшествующая прогнозируемому периоду история формирования подземных вод находит отражение как в уровнях, суммирующих питание водоносного горизонта за предыдущие годы, так и в суммарных (полученных методом сглаживания или интегрирования) осадках. Период сглаживания или интегрирования для каждого конкретных гидрогеологических условий должен подбираться отдельно, так как скорости водообмена различных водоносных горизонтов и даже отдельных их частей далеко не одинаковы.

Интегрирующая «память» водоносных горизонтов зависит от ряда причин: степени расчлененности рельефа, определяющей длину пути фильтрации, соотношения площадей питания и распространения водоносного горизонта в пределах водосборного бассейна, а также от фильтрационных свойств водовмещающей толщи, определяющих соотношение скоростей перераспределения давления и фильтрации подземных вод. Лишь при малых площадях водосбора и высоких фильтрационных свойствах пород полный водообмен (т. е. фильтрация частицы воды от области питания и до области разгрузки горизонта) осуществляется за один-два года. Это чаще всего наблюдается в горных районах, в сильно закарстованных или трещиноватых лавовых

породах при сильной расчлененности рельефа (около 1 км/км² или более) и в горизонтах верховодки. В большинстве же случаев полный водообмен подземных вод осуществляется для грунтовых вод в течение десятка или даже нескольких десятков лет, а для напорных вод — сотен и даже тысяч лет. При этом само понятие «полного водообмена водоносного горизонта» также несколько условно, так как даже в пределах грунтовых вод, особенно в случае неоднородного строения водоносной толщи и большой ее мощности, отдельные прослои (верхние или нижние) могут обмениваться значительно быстрее остальных. Отмеченная особенность подземных вод позволяет сделать ряд методических выводов, которые в той или иной мере следует учитывать при выборе оптимальных вариантов прогнозов режима подземных вод.

1. Чем больше площадь водосбора подземных вод (т. е. чем больше длина пути их фильтрации) и меньше скорость их фильтрации, тем больший объем «памяти» несет водоносный горизонт, а следовательно, тем больший период предыстории необходимо учитывать при анализе и прогнозах режима подземных вод. Особенно важно это иметь в виду при составлении уравнений регрессии или расчетах, проводимых для палеогноза режима подземных вод с использованием в качестве прогностических факторов только метеорологических данных. В таких расчетах предыстория формирования подземных вод не может быть даже косвенно учтена в уровнях подземных вод.

2. Водность каждого года наиболее четко отражается лишь в годовых амплитудах колебаний уровней подземных вод. Многолетние же тенденции в изменениях водности лучше всего должны отражаться в колебаниях минимальных годовых значений уровней подземных вод и несколько хуже среднегодовых. Поэтому анализ многолетних колебаний уровней подземных вод, и в частности выделение в них цикличности, лучше всего осуществлять по минимальным годовым значениям уровней, являющимся результатом изменений баланса грунтовых вод за гидрологический год.

3. Инерционность подземных вод определяет невозможность случайного наступления минимальных или максимальных за многолетие их уровней. Другими словами, максимальные и минимальные в многолетнем ряду уровни подземных вод не могут явиться какой-то неожиданностью. Более того, проведенный нами обзор массового фактического материала показал, что ни по одной из сотен скважин за весь период наблюдений, имеющих место в СССР, США и других странах, не было отмечено минимального за многолетие уровня подземных вод, наступившего сразу после многолетнего максимального, и наоборот. Как минимальные, так и максимальные в многолетнем ряду уровни подземных вод фиксировались, как правило, после серии лет соответственно пониженной или повышенной относительно нормы

водности. Исключением здесь могут явиться горные районы и верховодка, где, как уже указывалось, период водообмена может измеряться лишь месяцами.

4. Регулирующая роль водовмещающей среды, рассредоточивающей разгрузку подземных вод во времени, предопределяет повышенную по сравнению с другими частями гидросферы взаимосвязь уровней и дебитов подземных вод смежных лет. Коэффициенты автокорреляции по среднегодовым и минимальным годовым уровням подземных вод для отдельных скважин имеют

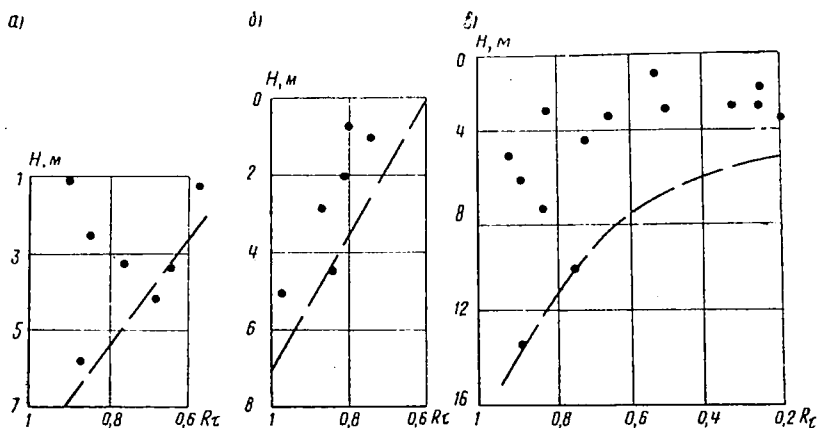


Рис. 41. Графики зависимости коэффициентов автокорреляции от глубины залегания грунтовых вод H в супесях (а), суглинках (б) и песках (в)

довольно высокий уровень значимости ($R_\tau > 0,6$), иногда даже до шестого года. Чем больше «память» водоносного горизонта, тем больше R_τ и тем с большей заблаговременностью могут выдаваться прогнозы, учитывающие лишь характер режима подземных вод предыдущих лет.

5. Анализ зависимости степени взаимосвязи уровней соседних лет с глубиной залегания подземных вод не вскрыл каких-либо четких закономерностей, особенно в трещиноватых и закарстованных породах. Лишь в водоносных горизонтах, представленных суглинками и супесями (значительно хуже песками), намечается некоторая тенденция к возрастанию коэффициентов автокорреляции с увеличением глубины (рис. 41).

Помимо взаимосвязи уровней и дебитов соседних лет, разделенных интервалами в один—три года, автокорреляционный анализ длинных рядов наблюдений за режимом подземных вод вскрыл взаимосвязь уровней и дебитов для лет, разделенных значительно большими интервалами времени, т. е. подтвердил наличие цикличности в режиме подземных вод. Как уже отмеча-

лось выше, цикличность в режиме подземных вод вскрывалась различными авторами и ранее. Однако в большинстве случаев периоды циклов определялись визуально, а следовательно, нередко и весьма субъективно. Субъективность выделения циклов объяснялась тем, что большинство авторов стремилось увязать цикличность режима подземных вод с 11-летними циклами солнечной активности, выраженной числами Вольфа, и, кроме того, ограниченностью анализируемого материала.

Однако даже визуальный анализ хронологических графиков многолетних колебаний уровней подземных вод по большому числу наблюдательных скважин в СССР (155 рядов) и США (85 рядов) показывает наличие широкой гаммы различных по продолжительности циклов — от 2 до 34 лет (рис. 42, а). Этим можно объяснить разнообразие утверждений различных авторов о длине периодов циклов, анализировавших цикличность в режиме подземных вод по единичным скважинам или их ограниченному числу, а также в пределах каких-либо локальных участков.

Как видно из данной гистограммы, наиболее часто встречаются циклы с длиной периода в 2, 5, 6, 11—12, 19 и 30—35 лет. При этом уменьшение числа случаев с циклами продолжительностью свыше 10 лет объясняется не уменьшением вероятности такой цикличности в режиме подземных вод, а резким сокращением числа имеющихся скважин с длинными периодами наблюдений.

Периодограммный и спектральный анализ наиболее длинных рядов наблюдений за режимом подземных вод подтверждает выделение 2, 5, 6 и 11-летних циклов.

Автокорреляция отдельно значений среднегодовых, минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней подземных вод показала несколько отличающиеся характеристики цикличности (рис. 42, б). Так, по среднегодовым уровням наиболее часто встречающимися оказались циклы с периодами 4, 5, 9, 13, 15, 18, 27 и 33 года; минимальным предвесенним — 4, 6, 10, 13, 22 и 24 года; максимальным весенним — 2, 4, 5, 9, 11, 13, 15 и 22 года. Суммируя эти три гистограммы, видимо, можно выделить в режиме подземных вод следующие циклы: 2, 4, 5, 6, 9—11, 15, 18, 22, 27—31 год.

Достоверность выделенных с помощью автокорреляции циклов, естественно, далеко не одинакова. Наиболее достоверными в коротких рядах наблюдений за режимом подземных вод можно считать лишь короткопериодные циклы, которые встретились в наблюдаемом ряду несколько раз, и менее достоверными — длиннопериодные.

К сожалению, до настоящего времени нет установившихся критериев оценки достоверности выделенных автокорреляционным методом периодов. Одни авторы считают достоверными лишь периоды, составляющие по длине до трети наблюдаемого ряда, другие — до половины. Однако четкие всплески на корреля-

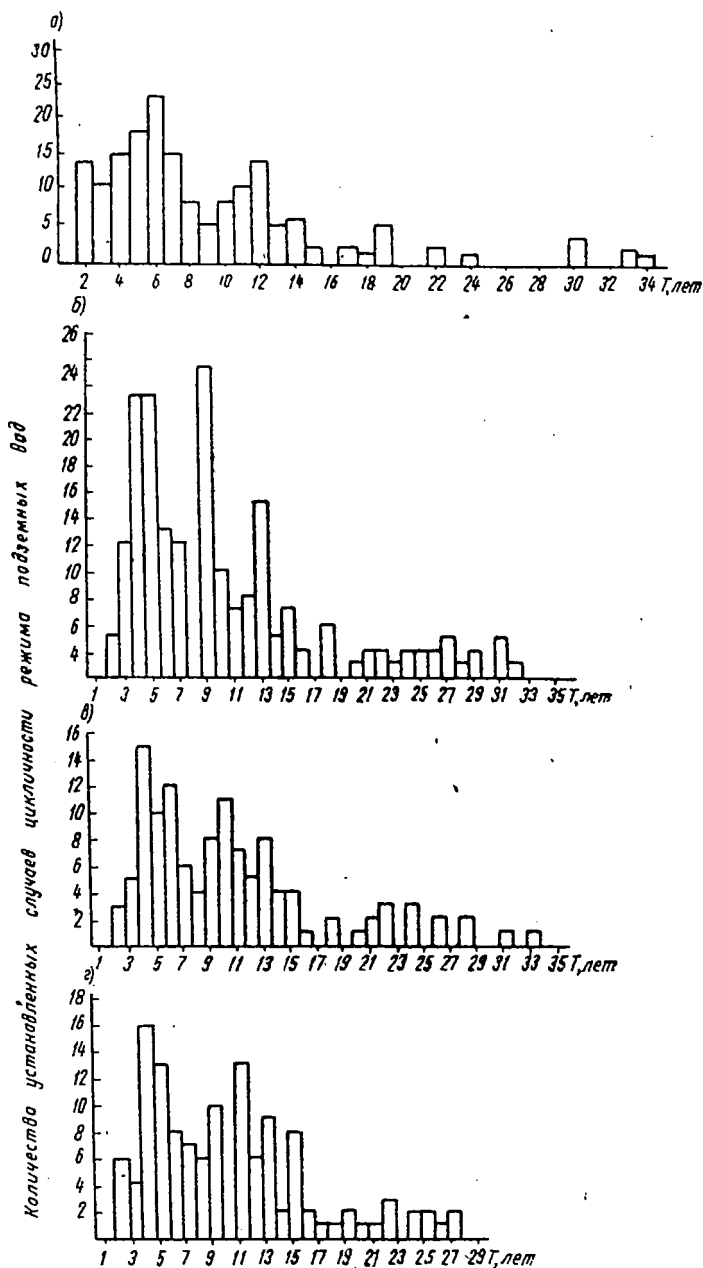


Рис. 42. Гистограммы цикличности режима подземных вод T , построенные по хронологическим графикам (а) и по данным автокорреляции наиболее длинных рядов наблюдений, по среднегодовым уровням (б), по минимальным предвесенним уровням (в) и по максимальным весенним уровням (г)

Длина периода цикла в годах	Коэффициенты автокорреляций R_t уровней		
	среднегодовых	минимальных предвесенних	максимальных весенних
2	<u>0,18—0,84*</u>	<u>0,13—0,58</u>	<u>0,14—0,77</u>
	0,58	0,33	0,35
3	<u>0,13—0,80</u>	<u>0,07—0,70</u>	<u>0,04—0,42</u>
	0,50	0,29	0,29
4	<u>0,15—0,94</u>	<u>0,00—0,80</u>	<u>0,04—0,92</u>
	0,51	0,28	0,43
5	<u>0,04—0,93</u>	<u>0,22—0,94</u>	<u>0,23—0,86</u>
	0,50	0,50	0,50
6	<u>0,06—0,86</u>	<u>0,12—0,91</u>	<u>0,07—0,73</u>
	0,52	0,49	0,33
7	<u>0,22—0,90</u>	<u>0,06—0,80</u>	<u>0,10—0,95</u>
	0,50	0,57	0,45
8	<u>0,22—0,70</u>	<u>0,15—0,76</u>	<u>0,13—0,81</u>
	0,40	0,38	0,41
9	<u>0,06—0,86</u>	<u>0,09—0,82</u>	<u>0,04—0,88</u>
	0,52	0,36	0,40
10	<u>0,07—0,72</u>	<u>0,20—0,96</u>	<u>0,10—0,95</u>
	0,39	0,62	0,55
11	<u>0,06—0,80</u>	<u>0,16—0,74</u>	<u>0,04—0,88</u>
	0,62	0,40	0,42
12	<u>0,16—0,82</u>	<u>0,30—0,74</u>	<u>0,13—0,76</u>
	0,46	0,47	0,43
13	<u>0,10—0,98</u>	<u>0,28—0,82</u>	<u>0,06—0,80</u>
	0,55	0,56	0,42
14	<u>0,20—0,98</u>	<u>0,45—0,72</u>	<u>0,32—0,94</u>
	0,55	0,56	0,64
15	<u>0,08—0,99</u>	<u>0,06—0,83</u>	<u>0,04—0,99</u>
	0,55	0,41	0,63

* В числителе приведен размах значений коэффициентов автокорреляции, в знаменателе — их средняя величина.

лограммах при τ , превышающих эти пределы, также можно рассматривать лишь как тенденцию к соответствующей продолжительности цикла, имея в виду малую достоверность связей уровней, разделенных соответствующим интервалом времени, несмотря на то, что R_τ при этом может быть и существенным. Более строгое выделение длиннопериодных циклов ($\tau > 12-15$ лет) практически невозможно, так как для использования существующих на данный момент статистических (включая гармонический анализ) методов имеющиеся ряды наблюдений за режимом подземных вод являются слишком короткими. Учитывая низкую достоверность корреляционных функций при больших сдвигах, концы коррелограмм мы не строили.

Коэффициенты автокорреляции на участках всплесков иногда достигают довольно высоких значений, как правило, превышающих аналогичные характеристики, наблюдаемые при анализе цикличности речного стока и различных метеорологических факторов. В табл. 16 приведены значения коэффициентов автокорреляции по наиболее достоверным циклам с периодом до 15 лет, выявленным по сравнительно большому числу скважин.

Следует также отметить, что по Евджевичу (США) средняя взаимосвязь рядов атмосферных осадков при $\tau=1$ близка к нулю, а гидрологических рядов — 0,18, а по С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю (по стоку рек СССР) — 0,25. Средние коэффициенты автокорреляции уровней грунтовых вод при $\tau=1$ составляют 0,52, а напорных вод — 0,71.

Все это свидетельствует о повышенной взаимосвязи и о более четком проявлении природной цикличности в подземных водах по сравнению с гидрометеорологическими процессами, что связано с отмеченной ранее повышенной инерционностью подземных вод.

Для изучения цикличности, которая иногда может встречаться и в чисто случайных процессах, нами была проведена автокорреляция серии различных по продолжительности (10, 20, 40, и 80) рядов чисел, выбранных произвольно из таблиц случайных чисел. Продолжительность рядов была выбрана аналогичной продолжительности имеющихся рядов наблюдений за режимом подземных вод. Автокорреляция таких рядов также показала наличие цикличности, но менее закономерной и с меньшими по величине всплесками R_τ . Наиболее опасными, т. е. близкими к природным, оказались ряды случайных чисел, состоящие из 20 членов. Данное обстоятельство требует тщательной оценки достоверности выделяемых на коррелограммах циклов. Для этой цели достоверность выделяемых по коррелограммам периодов циклов определялась путем оценки случайности их появления ε по уравнению

$$\varepsilon \% = [1 - \Phi_{(x)}] 100, \quad (80)$$

где $\Phi_{(x)}$ — функция принимаемого нормальным распределения анализируемой случайной переменной x , определяемая по таблицам [98 и др.].

Значение x рассчитывается по формуле

$$x = \frac{R_\tau}{\sigma_{R_\tau}}, \quad (81)$$

где R_τ — коэффициент автокорреляции в момент максимума положительного всплеска;

$$\sigma_{R_\tau} = \frac{1}{\sqrt{n - \tau}},$$

здесь n — длина всего анализируемого ряда;

τ — сдвиг, соответствующий максимуму положительного всплеска.

При составлении гистограмм цикличности использовались только те циклы, случайность появления которых была менее 10%, а следовательно, вероятность свыше 90%. Большинство же короткопериодных циклов характеризуется величинами случайности порядка 0,5—3%, т. е. вероятность их реального существования весьма высока.

Аналогичной, но более наглядной оценкой достоверности автокорреляционных функций является построение доверительных интервалов 90- или 95%-ного уровня значимости. Расчет их проводился по формуле

$$ДП = \pm t_\alpha \sigma_{R_\tau}, \quad (82)$$

где t_α — распределение Стьюдента, определяемое по табл. 6.

Данная оценка учитывает уменьшение достоверности коэффициентов автокорреляции при увеличении сдвига τ , определяемое постепенным уменьшением длины коррелируемых рядов, что следует из уравнения (82). Доверительные пределы в этом случае с увеличением τ растут, и достоверными при этом могут быть лишь весьма большие R_τ . Корреляционные функции рядов случайных величин в отличие от корреляционных функций рядов уровней подземных вод, как правило, не выходят за пределы доверительных интервалов, рассчитанных таким путем.

Таким образом, цикличность режима подземных вод, подтвержденная данным объективным (а не визуальным) путем, может быть признана действительно существующей. Более сложен вопрос о непосредственном использовании выявленной цикличности для составления многолетних прогнозов режима подземных вод.

Одним из путей учета цикличности режима подземных вод в прогнозах является простая экстраполяция колебаний уровней подземных вод в соответствии с выделенными для каждой сква-

жины или источника циклами. При такой экстраполяции допускается, что характер цикличности в будущем останется таким же, как и в период наблюдений. Подобная экстраполяция может осуществляться даже без учета наблюдающихся изменений в причинах, определяющих данную цикличность. Естественно, достоверность таких прогнозов не может считаться удовлетворительной, хотя для приближенных оценок такой метод прогноза можно рекомендовать.

Если установить причинно-следственную связь между режимом подземных вод и определяющими его режимообразующими факторами, то такие прогнозы могут стать более достоверными.

Произвольность выбора продолжительности периодов цикличности в режиме подземных вод объясняется не только ограниченностью фактического материала, но и отсутствием четких представлений о причинных связях, определяющих эту цикличность. Возможности же составления долгосрочных прогнозов режима подземных вод во многом зависят от наличия установленных связей с режимообразующими факторами, ясности генетической природы колебаний и возможности получения прогнозов соответствующих факторов. В связи с этим кратко охарактеризуем основные выделенные циклические колебания уровней подземных вод и представляющиеся нам наиболее вероятными генетические связи этих колебаний с геологофизическими процессами.

Двухлетняя цикличность проявляется в режиме подземных вод по-разному. В одних случаях она четко отмечается на графиках, построенных по среднегодовым уровням, когда после сравнительно многоводного года следует маловодный. График в таких случаях имеет пилообразный характер. В других случаях двухлетняя цикличность прослеживается лишь по графикам, построенным по срочным или среднемесячным значениям уровней, и проявляется либо в чередовании более и менее высоких подъемов уровней подземных вод в весенние периоды, либо в чередовании лет с различной продолжительностью весеннего питания грунтовых вод, которое в свою очередь выражается в чередовании лет с резкими пикообразными подъемами уровней и с рассредоточенными по времени «многовершинными» колебаниями уровней подземных вод, либо в чередовании лет с наличием и отсутствием питания подземных вод (рис. 43).

Двухлетняя цикличность уровней подземных вод увязывается нами с квазидвухлетней цикличностью зональных стратосферных ветров (открыта в 1955—1957 гг.) вдоль экватора на высотах около 20 км и выше, имеющей среднюю периодичность в 26 месяцев [11]. Наличие такой неровной двухлетней цикличности ветров приводит к тому, что максимальные значения скоростей ветров, чередующихся западных и восточных направлений не приурочены к каким-то определенным месяцам в году, постепенно сдвигаются в среднем на 2,5 месяца за двухлетний

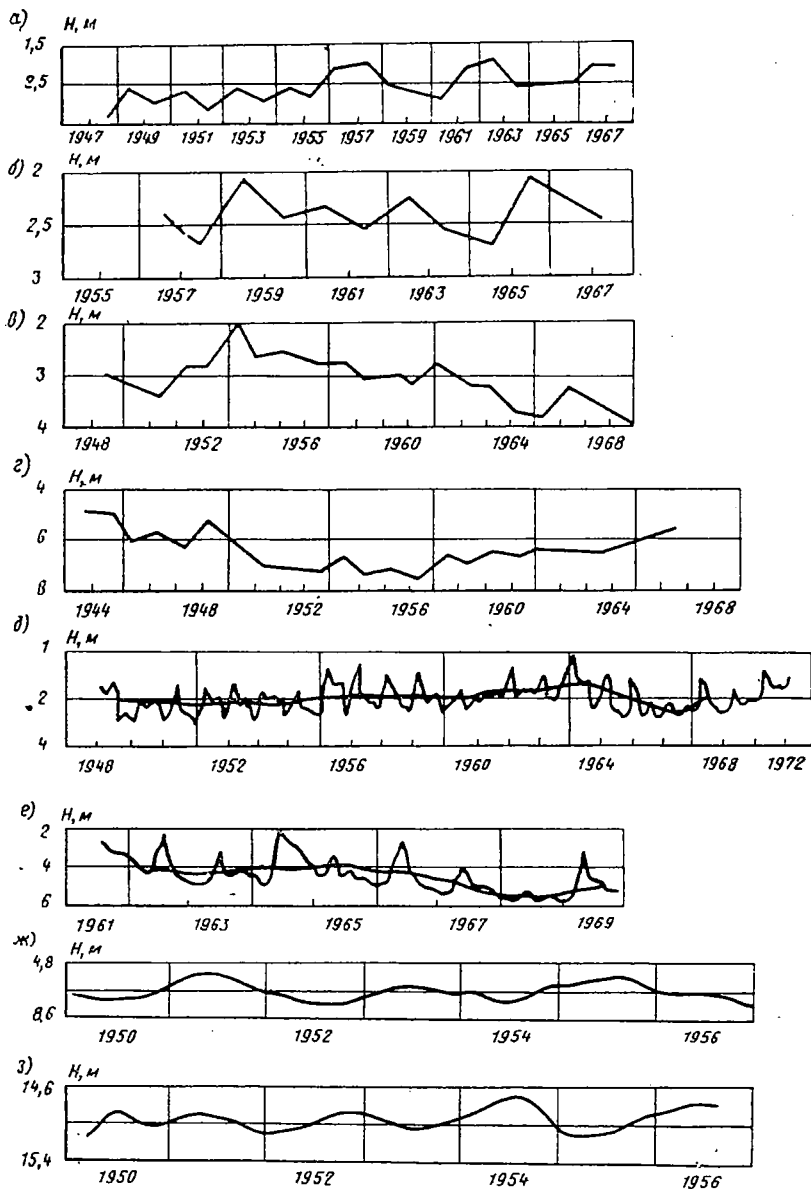


Рис. 43. Графики режима подземных вод с выраженной тенденцией к двухлетней цикличности

а — скважина 23 (Эстония); б — скважина 108 (Белоруссия); в — скважина 19 (Московская обл.); г — скважина 1 (Каменная степь); д — скважина 39 (Башкирия); е — скважина 30 (Новосибирск); ж и з — скважины в Вильнюсе

цикл и приходится то на один, то на другой сезон года. В результате совпадение, например, минимальных уровней грунтовых вод с четными годами через 10—11 лет сменяется совпадением с нечетными. Так, на территории европейской части СССР за период с 1944 г. можно выделить следующие периоды фаз двухлетней цикличности: с 1944 по 1949 г. максимальные уровни подземных вод приурочивались к четным годам, с 1952 по 1962 г. — к нечетным, с 1962 по 1970 г. — снова к четным годам и с 1971 г. — вновь к нечетным.

Данная закономерность довольно часто нарушается неравномерностью циклонической деятельности в атмосфере, и поэтому квазидвухлетняя цикличность в режиме подземных вод проявляется далеко не повсеместно и не регулярно. Кроме того, амплитуды двухлетних колебаний не велики и составляют не более 20% общей многолетней амплитуды колебаний уровней.

Природа двухлетней цикличности еще не изучена и, возможно, связана с солнечной деятельностью, где также отмечены двухлетние циклы [106].

Наряду с двухлетними циклами на коррелограммах довольно часто выделяются трехлетние циклы в режиме различных природных процессов: ритмике климата, колебаниях уровня мирового океана, типах атмосферной циркуляции и т. д. Причина этих колебаний еще не выявлена. Возможно, трехлетние циклы в режиме подземных вод являются следствием растянутых квазидвухлетних циклов, имеющих многолетние вариации периодов от 22 до 30 месяцев.

Наличие четырехлетних циклов нам представляется проявлением удвоенных двухлетних циклов. Однако в природе отмечались и другие четырехлетние циклы, например в ритмичности изменений скорости вращения Земли с периодом 4,1 года.

Пяти—семилетние, в среднем шестилетние, циклы в режиме подземных вод встречаются значительно чаще и выражаются более существенными амплитудами колебаний уровней подземных вод (до 50%). Природа этих колебаний сложная. Шестилетние циклы отмечались М. С. Эйгенсоном [115] в солнечной активности, а также И. В. Максимовым и Н. П. Смирновым [83] в ритмах движения полюса вращения Земли, приводящих к изменениям скоростей океанических течений, особенно направленных по меридиану, и в том числе Гольфстрима, определяющего режим температур северных морей и тепловой баланс прилегающих территорий суши. В связи с этим пяти—шестилетние циклы довольно четко выделяются в режиме подземных вод Прибалтики, находящейся в зоне тепляющего эффекта Гольфстрима. Вместе с тем шестилетние циклы наблюдаются и в других районах СССР (Прикаспий, Дальний Восток и др.), где их появление, возможно, связывается уже с соответствующими циклами солнечной активности, находящими отражение в аналогичной (в среднем с периодом 6,6 лет) цикличности атмосферной цир-

куляции. Об этом свидетельствует довольно тесная связь режима уровней подземных вод с атмосферной циркуляцией.

Проведенная нами массовая парная корреляция атмосферной циркуляции различных форм с уровнями грунтовых вод по территории СССР показала, что в 54% случаев коэффициенты корреляции $r \geq 0,6$ и в отдельных случаях достигают 0,89.

Наиболее тесными являются связи режима уровней с атмосферной циркуляцией типов C_{X-III} , M_2 , W_3 , E_{M_2} , C_3 и C_{M_2} по Вангенгейму, где индекс C_{X-III} означает преобладание атмосфер-

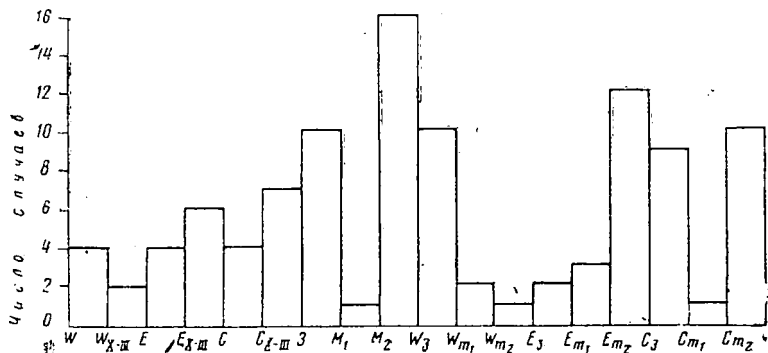


Рис. 44. Гистограмма числа установленных связей режима подземных вод с атмосферной циркуляцией различных типов, по Вангенгейму и Гирсу

ной циркуляции соответствующего типа в холодный период года (рис. 44). Интересным является и тот факт, что довольно частыми оказались высокие коэффициенты корреляции уровней грунтовых вод европейской части СССР и типов атмосферной циркуляции Тихоокеанского сектора. Это свидетельствует о глобальности причин, вызывающих многолетние изменения в атмосферной циркуляции и в режиме подземных вод. Зимний влагоперенос при циркуляции восточного E_{X-III} и меридионального C_{X-III} типов, как показывает корреляция, воздействует на режим подземных вод в большей мере, чем суммарные годовые значения влагопереноса (E и C).

Как показала корреляция, не менее тесными являются связи режима уровней подземных вод с группами атмосферной циркуляции по Б. Л. Дзержевскому [22, 23], а по отдельным районам (Москва, Горький, Среднее Поволжье) они даже более тесные, чем с группами атмосферной циркуляции по Вангенгейму. При этом тесные связи устанавливаются не только со среднегодовыми уровнями, но и с минимальными предвесенними и максимальными весенними. Также нередко отмечаются тесные связи уровней подземных вод европейской части СССР с группами

атмосферной циркуляции Сибирского и Дальневосточного секторов. Типизация форм атмосферной циркуляции у Вангенгейма и Дзерdzeевского различна по своим основам, и корреляционные связи между ними, как показали наши расчеты, практически отсутствуют. Поэтому в каждом конкретном случае для составления прогнозов режима подземных вод могут быть подобраны формы той типизации атмосферной циркуляции, которая дает наилучшие результаты (т. е. характеризуются наиболее тесными корреляционными связями) как по одному, так и по нескольким факторам.

Достаточно четких зависимостей тесноты связи режима подземных вод с атмосферной циркуляцией от литологического состава водовмещающих пород и глубин залегания подземных вод не установлено. Однако наблюдаются определенные тенденции к уменьшению коэффициентов корреляции данных связей с увеличением глубины (рис. 45).

Цикличность, выявленная И. В. Максимовым и П. П. Смирновым в атмосферной циркуляции по Вангенгейму, хорошо сопоставляется с выявленной нами цикличностью в режиме подземных вод.

11-летние циклы в режиме подземных вод отмечаются уже давно [5, 110, 114 и др.] и связываются с соответствующими широко известными циклами солнечной активности, имеющей ритмичность от 8 до 14 лет, в среднем 11,3—11,4 года. Однако попытки установить стабильные корреляционные связи между этими явлениями пока не увенчались успехом. Это связано с тем, что по наиболее длинному ряду наблюдений по шурфу № 1 в Каменной степи до 30-х годов нашего столетия прослеживалась тенденция к наличию прямой связи колебаний уровней грунтовых вод и солнечной активности. После 30-х годов эта связь сменилась на обратную, а в середине 50-х годов — снова на прямую (рис. 46). Автокорреляционный анализ показал, что как по шурфу № 1, так и по шурфу № 2 четких 11-летних циклов нет вообще, а наблюдаются 16-летние циклы, являющиеся, видимо, результатом сложения 5,5- и 11-летних солнечных циклов, чем и объясняется подобная инверсия знаков связи в данном случае (рис. 47). Однако знакопеременные связи между солнечной активностью и другими природными процессами отмечались неоднократно, например в более четко выраженных 11-летних циклах колебаний уровня озера Виктория и других явлениях.

Удовлетворительных объяснений таким инверсиям пока нет. Одной из гипотез наличия такой знакопеременной связи может служить выдвинутое М. С. Эйгенсоном предположение о наложении в указанные переломные моменты двух разных по фазе солнечных циклов — 11- и 6-летних. Последнее обстоятельство обязывает при прогнозах режима подземных вод с использованием прогнозов 11-летнего солнечного цикла учитывать возможные инверсии этих связей.

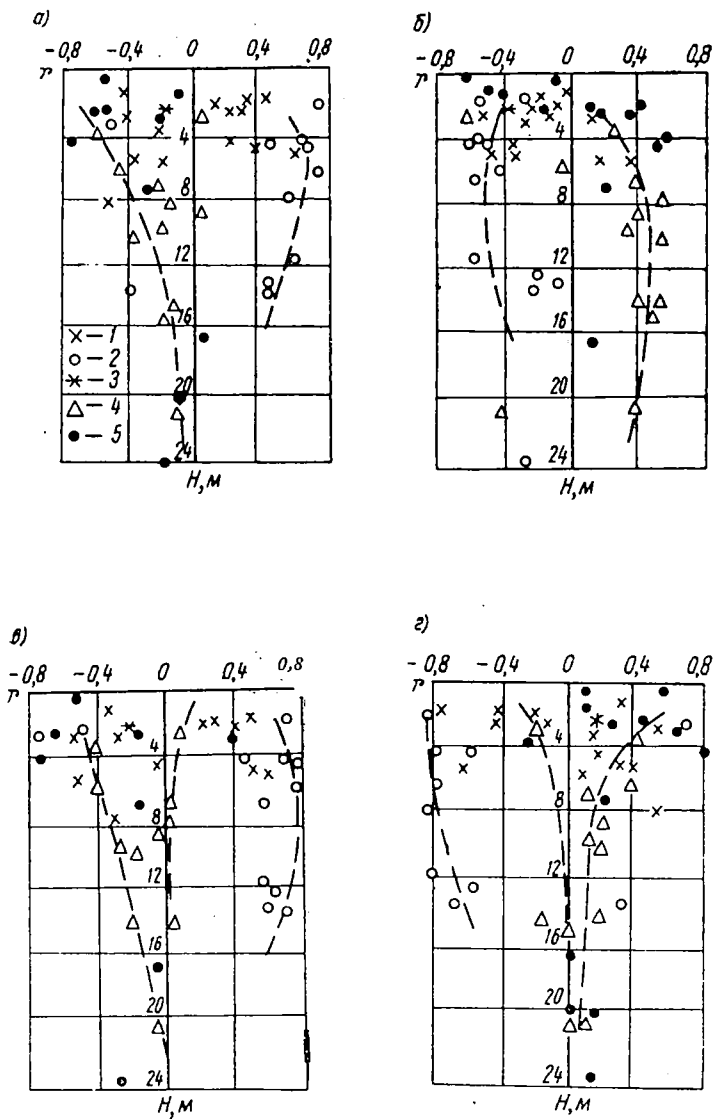


Рис. 45. Графики зависимости тесноты корреляционных связей уровней грунтовых вод r с некоторыми типами атмосферной циркуляции ($a - W_3$; $б - C_{X-III}$; $в - 3$; $г - M_2$) от глубины залегания грунтовых вод H

1 — песок, супесь; 2 — суглинок; 3 — глина; 4 — мел, базальты; 5 — о литологии точных сведений нет

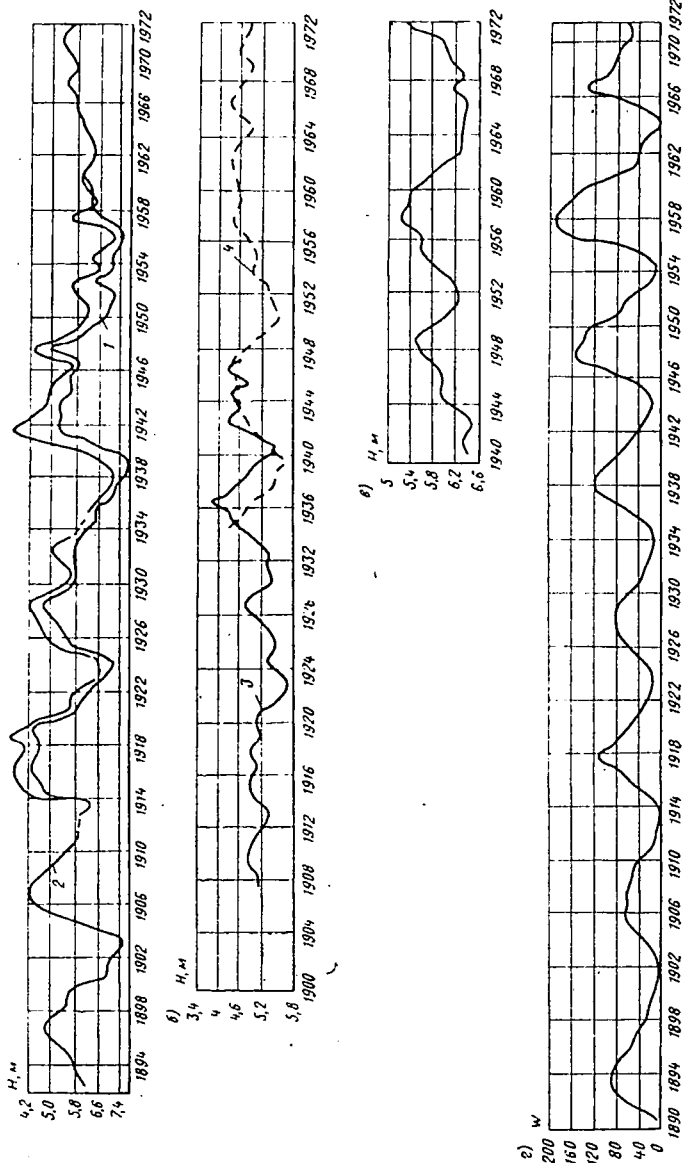


Рис. 46. Графики колебаний уровней грунтовых вод по шурфу № 1 Каменная степь (а); скважинам 2 и б, Москва (б); скважине 13, Тоншаево (в) и солнечной активности в числах Вольфа (г)
 1 — среднегодовой уровень; 2 — уровень на 1. IX; 3 — скважина 2 (ТСХА); 4 — скважина б (Москва)

Массовая парная корреляция уровней подземных вод с солнечной активностью, выраженной в числах Вольфа, не показала удовлетворительных связей. Коэффициенты корреляции этих связей редко оказывались выше 0,4, достигая лишь иногда 0,69, несмотря на наличие по визуальным сопоставлениям тенденций к наличию подобных связей (см. рис. 46).

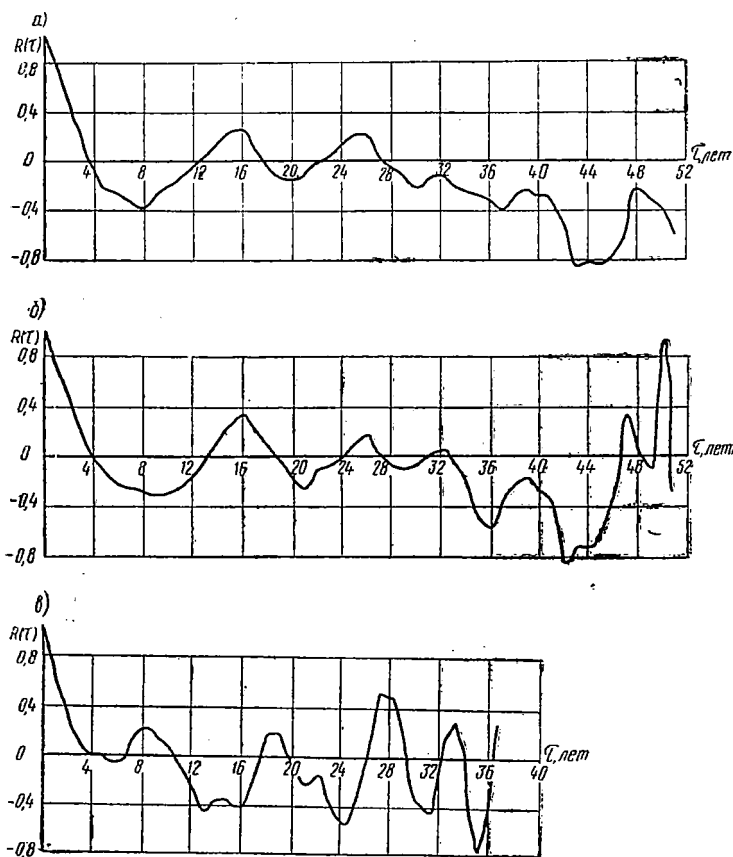


Рис. 47. Коррелограммы по шурфу № 1 (а); шурфу № 2; Каменная степь (б) и скважине 2, Москва (в)

Более четкими иногда являются связи 11-летних циклов в режиме подземных вод с близкими по периоду циклами геомагнитной возмущенности Земли, имеющей суммарные черты как 11-, так и 6-летних солнечных циклов (рис. 48).

Автокорреляция индексов K_p (геомагнитной возмущенности), а также других показателей солнечной активности (индексов Капецкого и Бартельса) выявила преобладание в солнечной деятельности четких 11-летних циклов, несмотря на значительно

большую изменчивость хронологических значений этих индексов по сравнению с изменчивостью чисел Вольфа (рис. 49).

Природа 15-, иногда 16-летних циклов пока еще не ясна. Одна из гипотез предполагает возможность их появления в результате воздействия на земную атмосферу приливных сил Марса. Как известно, наикратчайшие расстояния между Землей и Марсом, равные 55 млн. км, наступают в периоды великих противостояний через каждые 15—17 лет. В

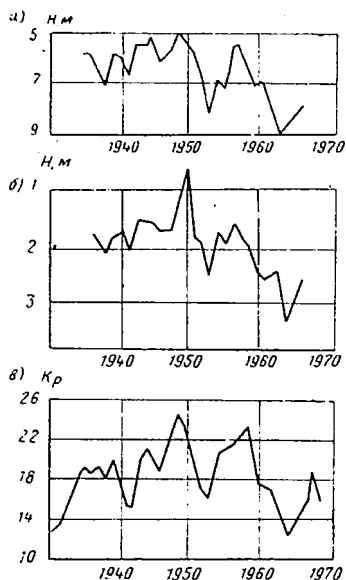


Рис. 48. Графики колебаний уровней грунтовых вод H по двум скважинам США (а), (б) и геомагнитной возмущенности K_p (в)

нашем столетии такие периоды были в 1909, 1924, 1939, 1956 и 1971 гг. Интересно отметить, что минимальные за многолетие уровни грунтовых вод по шурфу № 1 были отмечены именно в 1924, 1939 и 1956 гг.

19-летние колебания в режиме подземных вод аналогичны соответствующим колебаниям сил лунного прилива, имеющего средний период 18,6 лет при многолетних колебаниях от 17 до 21 года. 19-летний деклинационный цикл лунного прилива в режиме мирового океана был установлен И. В. Максимовым [81—83]. Приливные силы периодически изменяют ритмику в переносе тепла океаническими течениями и передачу его в атмосферу, что в свою очередь отражается на количестве переносимой атмосферной влаги и величинах питания подземных вод. Примеров четких 19-летних колебаний в режиме подземных вод, к сожалению, немного, но тем не менее они, видимо, имеются.

22-летние циклы иногда рассматриваются не как самостоятельные, а как удвоенные 11-летние. О самостоятельности этих циклов свидетельствует отмечавшееся гелиофизиками чередование более высоких и более сглаженных 11-летних циклов солнечной активности, выраженной в числах Вольфа. Кроме того, 22-летние циклы проявляются в смене полярности магнитных полей солнечных пятен при переходе от одного 11-летнего цикла к другому [91]. Однако автокорреляция сглаженных нами по 11-леткам чисел Вольфа полностью сгладивала все циклы, кратные 11, четко выделяемые при автокорреляции хронологических данных по солнечной активности (рис. 50, а), и вскрыла 104-летний (вековой) цикл (рис. 50, б). Аналогичная закономерность отмечается и в подземных водах: 22—24-летние циклы отмечаются четко на тех корреллограммах, на которых также четко выделяются

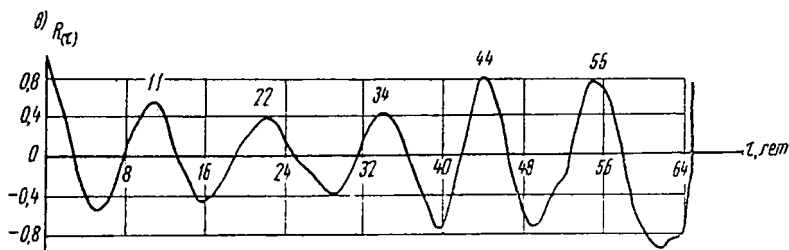
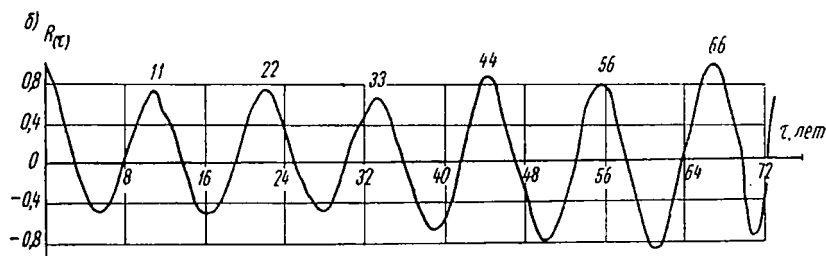
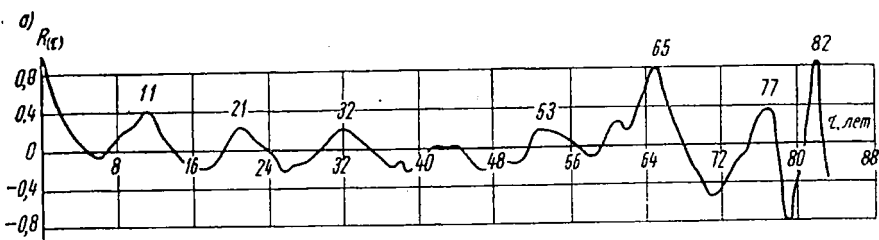


Рис. 49. Correlogramмы геомагнитной возмущенности (а) и индексов Капечского (б) и Бартелса (в) солнечной активности

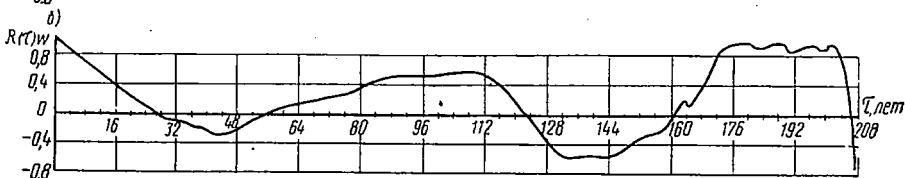
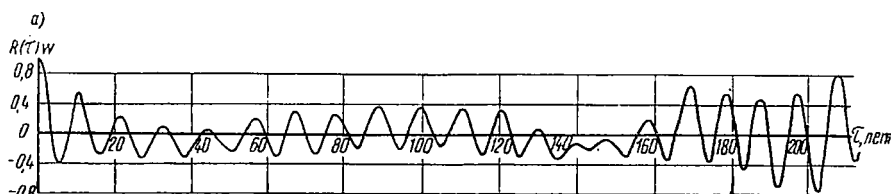


Рис. 50. Correlogramмы хронологических (а) и сглаженных по 11-леткам (б) чисел Вольфа

ся соответственно 11- и 12-летние циклы (рис. 51). Поэтому наличие самостоятельных 22-летних циклов в режиме подземных вод следует еще подтвердить.

Совсем редко в режиме подземных вод отмечаются 30-летние (31—33 года) так называемые брикнеровские циклы. Связано это, как уже отмечалось ранее, в основном с недостаточной продолжительностью наших массовых наблюдений за режимом подземных вод. Однако, наряду с единичными скважинами, где эти циклы видны отчетливо, нередко тенденции к 30-летним

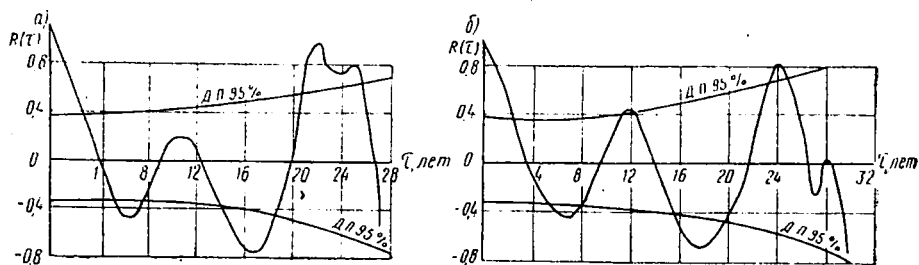


Рис. 51. Коррелограммы среднегодовых уровней грунтовых вод по скважине 13 (а) и скважине 486 (б) Горьковской гидрогеологической станции
ДП — доверительные пределы 95%-ной значимости

циклам прослеживаются по сглаженным по n -летиям рядам и интегральным графикам.

Отмечавшиеся в ряде природных процессов (в отложениях ленточных глин, в количестве годовых колец секвой, в солнечной активности и др.) вековые (80—100 лет) циклы в режиме подземных вод непосредственными наблюдениями зафиксированы не были. Однако вековой цикл прослеживается в виде тенденций по скважинам с наиболее длинными и увеличенными различными методами рядами, и особенно по интегральным и сглаженным по n -летиям графикам. Таким образом, встречающиеся в режиме подземных вод циклы, как правило, имеют аналоги в других природных явлениях, и прежде всего в гелиогеофизических факторах, обуславливающих изменения многолетних характеристик климата, которые уже в свою очередь прямо определяют баланс подземных вод в отдельные группы лет.

В результате рассмотрения закономерностей цикличности режима подземных вод можно сделать следующие выводы.

1. Многолетние циклические колебания уровней подземных вод, как было видно из краткой характеристики циклов, не имеют строгой периодичности во времени, и названия циклов (6-летие, 11-летие и др.) являются условными, так как в каждом случае подразумевается их средняя за многолетие продолжительность. Неустойчивость во времени таких квазициклов в колебаниях уровней подземных вод как по длине периодов, так и по их амплитудам определяется интерференцией различных

по длине и фазам колебаний указанных ранее гелиогеофизических факторов, колебания каждого из которых в свою очередь не являются строго периодическими. Таким образом, колебания уровней подземных вод являются по своей природе полициклическими и могут быть разложены на колебания низких порядков (в качестве таковых может быть принят вековой цикл) и колебания более высоких порядков (30, 19, 11, 6 и 2-летних), осложняющих вековой цикл и накладывающихся друг на друга. Следовательно, прогнозы многолетних колебаний уровней подземных вод должны базироваться на учете комплекса различных факторов, определяющих отдельные периодические составляющие этих сложных по своей природе колебаний.

Все это затрудняет составление прогнозов режима подземных вод, особенно в периодах, близких к экстремальным значениям уровней. Тем не менее вскрытые закономерности в многолетних колебаниях уровней подземных вод (даже средние характеристики их цикличности) могут помочь наметить основные периоды переломов и оценить тенденции дальнейшего поведения подземных вод, что также немаловажно.

2. Существенным для прогнозов является установленное наличие четких группировок следующих друг за другом маловодных и многоводных лет, прослеживаемых почти во всех районах СССР, что, с одной стороны, позволяет составить уравнения регрессии отдельно для периодов спада и подъемов уровней и использовать эти уравнения для прогнозов режима подземных вод с заблаговременностью до двух-пяти лет и более, в зависимости от преобладающей для каждой территории или скважины: длины периодов колебаний уровней или дебитов подземных вод, а с другой стороны, дает определенную гарантию, что водность прогнозного периода последующего года резко не изменится по сравнению с предыдущим.

Выявление периодов многолетних подъемов и спадов уровней может помочь также прогнозировать не только годовые амплитуды и минимальные годовые значения уровней грунтовых вод, но и характер всех внутригодовых колебаний уровней, отличающихся для этих периодов. Так, на ветвях многолетнего подъема величина весеннего подъема уровня грунтовых вод обычно соответствует всей годовой амплитуде колебаний уровня, в то время как на ветвях многолетнего спада уровней амплитуда весеннего подъема составляет лишь часть годовой амплитуды, так как в это время величины летнего снижения уровней превосходят величину амплитуды весеннего его подъема.

3. Соотношение сезонных годовых и многолетних среднегодовых амплитуд колебаний уровней грунтовых вод меняется в зависимости от мощности зоны аэрации. При малых глубинах до воды годовые амплитуды часто в 1,5—2 раза больше многолетних. При больших глубинах это соотношение меняется на обратное.

4. Амплитуды многолетних колебаний уровней подземных вод чаще всего прямо зависят от длины периода циклов, т. е. чем больше продолжительность цикла, тем больше его многолетняя амплитуда. Так, например, для района Каменной степи центрально-черноземной полосы 2-летние циклы имеют амплитуду до 1 м, 5—6-летние — до 1,7 м, 11-летние — до 3,6 м.

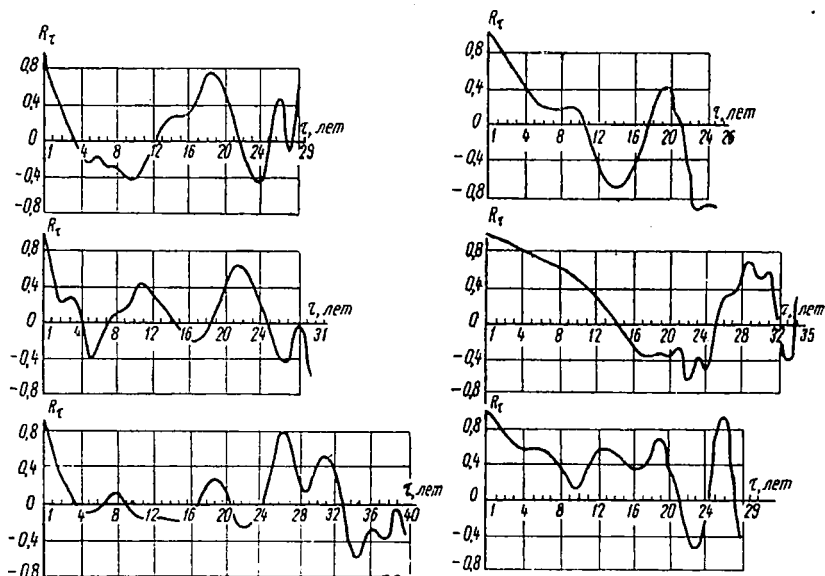


Рис. 52. Автокорреляционные функции среднегодовых уровней напорных вод по ряду скважин США

5. Малые (2—3- и даже 5—7-летние) циклы прослеживаются в рыхлых осадках чаще всего при небольших глубинах до воды или независимо от глубины при хороших условиях для инфильтрации атмосферных осадков через зону аэрации, как, например, в сильнотрещиноватых или закарстованных породах, а также на участках сосредоточенной фильтрации (в районе лиманов, подов и других понижениях микрорельефа), где наряду с площадной наблюдается струйчатая инфильтрация. С увеличением глубины залегания грунтовых вод, а также с ухудшением условий инфильтрации атмосферных осадков малые циклы в режиме подземных вод прослеживаются хуже. В этих условиях отмечены главным образом циклы с большими периодами (11-летними и более продолжительными).

Самые продолжительные циклы (30-летний и вековой) могут быть четко отмечены лишь в глубокозалегających грунтовых водах на участках с большой площадью водосбора и на участках с сильно зарегулированными условиями инфильтрации атмосферных осадков, т. е. в условиях с максимальной интегрирующей «памятью» бассейна подземных вод.

Этот вывод подтверждается повышенной инерционностью глубокозалегающих грунтовых, и особенно напорных вод. Коэффициенты автокорреляции в напорных водах с увеличением времени сдвига затухают очень медленно, что свидетельствует о наличии длиннопериодной цикличности. Обзор коррелограмм уровней напорных вод, рассчитанных нами для наиболее длинных (свыше 30 лет) рядов наблюдений по скважинам США, показывает, что в режиме последних выделяются, как правило, циклы больших периодов (от 18 лет и более). Циклы с периодами 8, 9, 11 и 12 лет встречаются в напорных водах в единичных случаях, а более короткопериодные (2, 3, 5 лет) проявляются лишь в виде тенденции — небольших всплесков на фоне общего спада автокорреляционной функции (рис. 52). Чаще всего выделяются периоды; равные 10—12, 22—23, 26—27 и 36—38 годам, т. е. многолетние тенденции в напорных водах проявляются более четко, чем в грунтовых. Следует отметить, что данная закономерность не является строго выраженной и проявляется скорее в виде общей тенденции. При этом на малых глубинах могут встретиться любые циклы, а на больших — лишь циклы со сравнительно большими периодами (рис. 53). В карстовых районах такой тенденции не отмечается.

Таким образом, в зависимости от степени изолированности водоносного горизонта от поверхности земли происходит как бы постепенное нивелирование малых циклов в режиме подземных вод. Теоретически можно также предположить, что чем больше длина пути фильтрации подземных вод (от водораздела до реки), тем более сглаженными должны быть малые циклы и более четкими большие, так как интегрирующая «память» водоносного горизонта с увеличением его протяженности возрастает.

6. Учитывая постепенное по территории СССР увеличение средних в региональном плане глубин залегания подземных вод от поверхности земли в направлении с севера на юг, можно отметить в целом уменьшение в этом же направлении роли малых циклов и возрастание роли больших, а следовательно, в направлении с севера на юг происходит постепенное уменьшение амплитуд сезонных колебаний уровней грунтовых вод и увеличение амплитуд многолетних колебаний. Однако в отдельных районах эта закономерность может и нарушаться вследствие неоднородности строения зоны аэрации и разнообразия условий восполнения запасов подземных вод (особенно в горных районах).

7. Закономерности цикличности режима уровней подземных вод, анализируемые по различным их значениям (среднегодовым, минимальным предвесенним, максимальным весенним, минимальным летне-осенним или по годовым амплитудам), как правило, различны.

Часто эти различия не являются кардинальными, и циклы, вскрытые с помощью автокорреляции значений среднегодовых

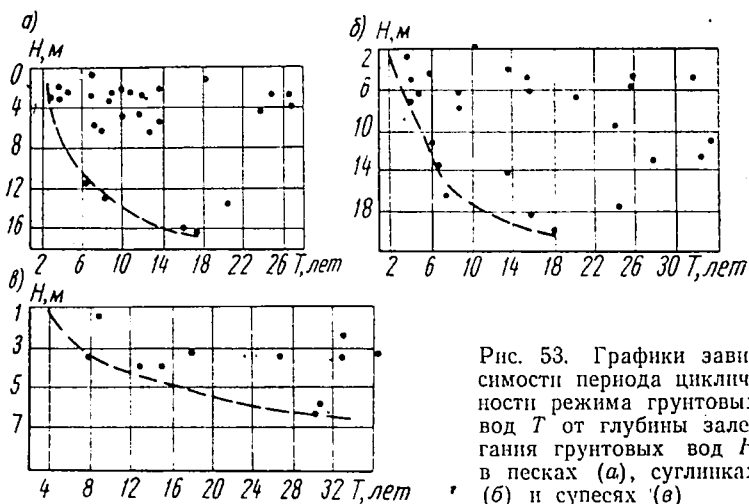


Рис. 53. Графики зависимости периода цикличности режима грунтовых вод T от глубины залегания грунтовых вод H в песках (а), суглинках (б) и супесях (в)

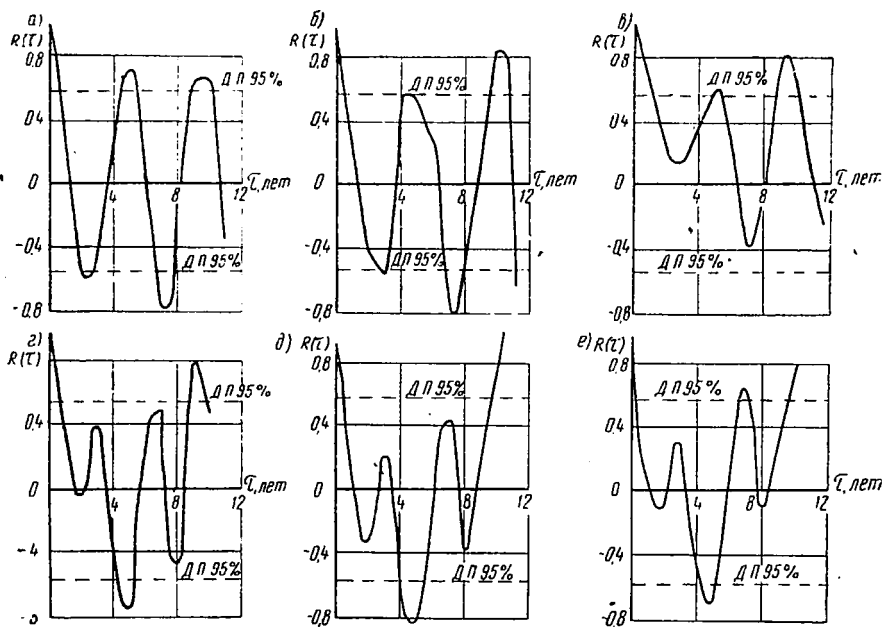


Рис. 54. Автокорреляционные функции: а, б и в — соответственно среднегодовых, предвесенних минимальных и весенних максимальных уровней грунтовых вод по скважине 4 (Ленинград); г, д и е — среднегодовых, предвесенних минимальных и летних максимальных уровней по скважине 3 (Хабаровский край)

ДП — доверительные пределы 95%-ной значимости

уровней, отличаются от циклов, вскрытых по минимальным предвесенним и максимальным весенним уровням, всего лишь на ± 1 год при сохранении общего характера автокорреляционной функции (рис. 54, *a—в*). Иногда автокорреляционные функции среднегодовых, минимальных и максимальных уровней практически идентичны (рис. 54, *г—е*). Однако нередко эти различия бывают и довольно значительными. При этом более динамичными бывают автокорреляционные функции годовых амплитуд, вскрывающих большее число циклов, чем остальные, и менее динамичными — коррелограммы максимальных весенних, минимальных предвесенних и среднегодовых значений уровней или дебитов подземных вод (рис. 55).

Все это свидетельствует о целесообразности раздельного анализа цикличности по каждому из этих параметров, что будет способствовать составлению их долгосрочных прогнозов на основе вскрытых многолетних закономерностей в режиме подземных вод.

8. Синхронности в наступлении экстремальных в многолетнем разрезе значений уровней подземных вод по всей территории СССР не отмечается. Наоборот, при минимальных уровнях подземных вод в Прибалтике уровни подземных вод на Урале и в Западной Сибири приближаются к своему максимуму, а на Дальнем Востоке и в центральных районах европейской части СССР находятся около своих средне многолетних норм. Это объясняется постоянством запасов влаги на Земле, увеличение которых на одной части территории неизбежно приводит к их уменьшению на другой. В частности, отмечалось [65], что увеличение атмосферных осадков в Северной Америке увязывается с уменьшением осадков в Европе, что не может не отразиться на асинхронности многолетних колебаний уровней подземных вод этих континентов.

Опыт составления карт обеспеченностей минимальных, максимальных и среднегодовых уровней грунтовых вод территории РСФСР показывает значительную пестроту вероятностных характеристик этих уровней по площади (рис. 56), что, с одной стороны, определяет необходимость и возможность составления и картирования прогнозов режима подземных вод, а с другой — свидетельствует о перераспределении по площади сроков восполнения запасов подземных вод в многолетнем разрезе. На картах такого типа можно отметить довольно обширные территории, характеризующиеся синхронными сезонными колебаниями уровней подземных вод.

Асинхронность в режиме подземных вод проявляется в особенностях их внутригодового режима не только на различных территориях, но и в многолетнем разрезе. Так, анализ многолетних тенденций колебаний уровней подземных вод США показал, что наряду с обширными регионами, в которых отмечается общая тенденция к подъему уровней, имеются регионы, в которых

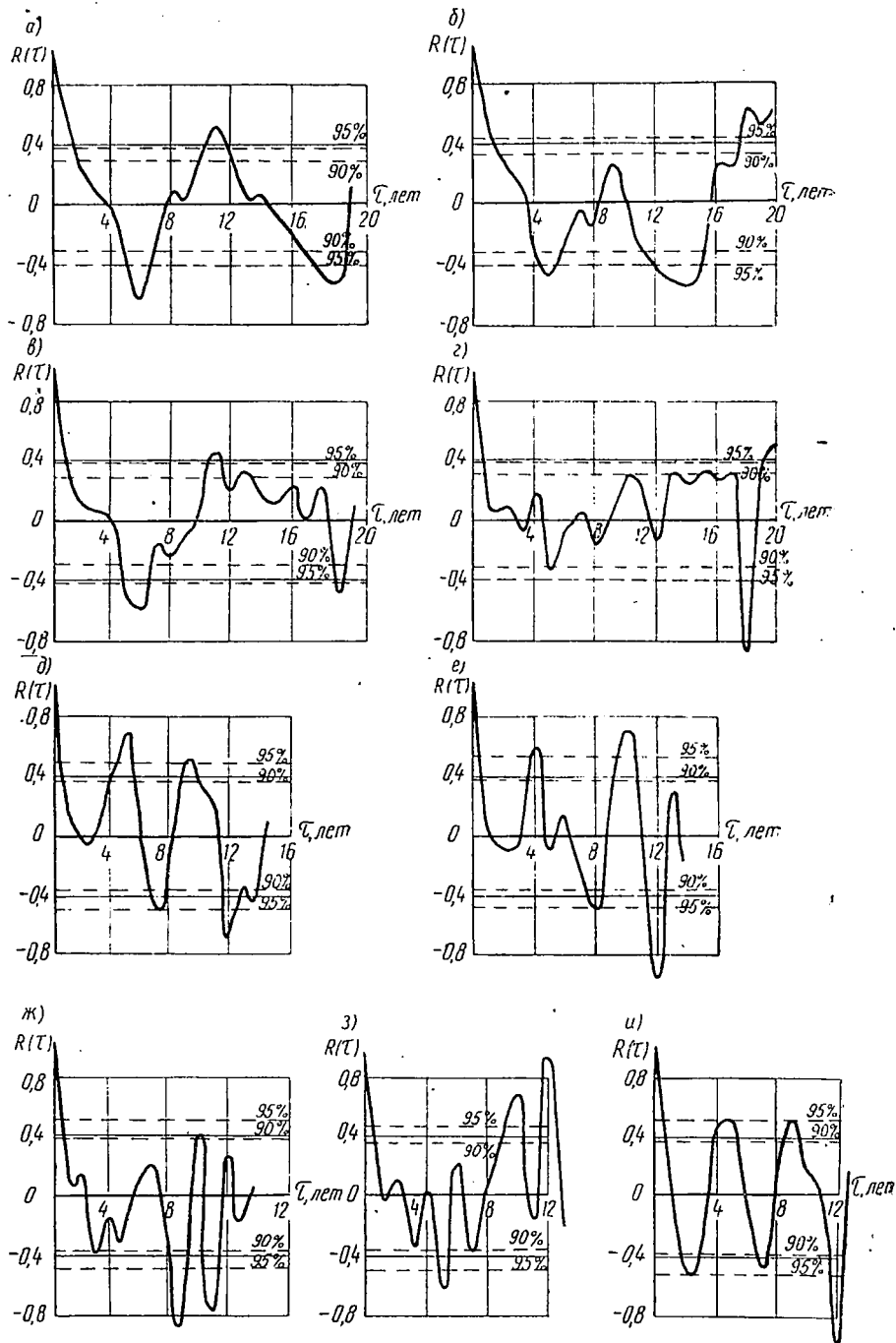


Рис. 55. Автокорреляционные функции: а, б, в и г — соответственно среднегодовых, минимальных предвесенних, максимальных весенних и годовых амплитуд дебита родника 129 (Армения); д, е, ж, з, и — среднегодовых, минимальных предвесенних, максимальных весенних, годовых амплитуд и минимальных летне-осенних уровней грунтовых вод по скважине 11/9-9 (Ленинград); 95% и 90% — ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДЕЛЫ 95 и 90%-НОЙ ЗНАЧИМОСТИ

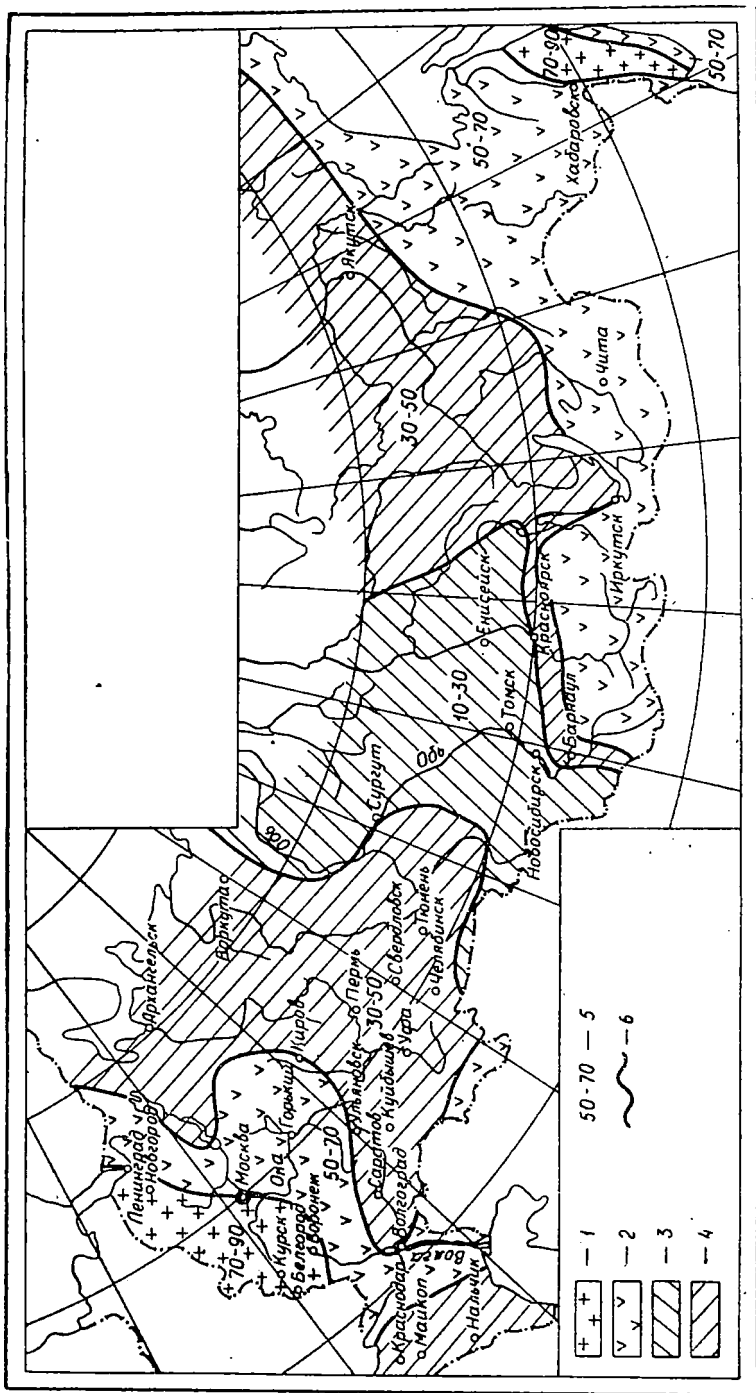


Рис. 56. Карта обеспеченности среднегодовых уровней грунтовых вод территории РСФСР на 1973 г.

1 — 70—90%; 2 — 50—70%; 3 — 30—50%; 4 — 10—30%; 5 — 30—50%; 6 — границы районов с синхронным режимом

отмечается общая тенденция к многолетнему спаду. Не исключая возможности усиления этих тенденций искусственным путем, можно все же предположить их естественную природу, о чем говорит наличие указанных трендов на больших площадях, а также длительность их проявления (с начала века или с 30-х годов нашего столетия, т. е. с периодов, когда искусственные воздействия на подземные воды не были столь интенсивны, как сейчас).

Отсюда можно сделать вывод, что повышенное питание подземных вод в одних регионах компенсируется в какой-то мере недостаточным их питанием в других.

Выявление асинхронности режима подземных вод отдельных территорий важно не только для планирования рационального использования подземных вод, включая переброску воды из более обеспеченных водой районов в менее обеспеченные, но и для прогнозов режима подземных вод, о чем будет сказано далее.

9. Рассмотренные закономерности позволяют сделать вывод о наличии значительной региональной неравномерности естественного восполнения ресурсов подземных вод в многолетнем разрезе, что неизбежно должно проявиться в питании рек и общем водном балансе территорий.

Различные скорости водообмена отдельных частей водоносных горизонтов, а также различия по этой причине цикличности режима подземных вод, определяемые разнообразием геологического строения и гидрогеологических условий отдельных водовмещающих толщ, приводят к тому, что многолетние характеристики меженного (минимального) стока рек или подземного стока, фиксирующие в каком-то замыкающем створе суммарную характеристику всего этого разнообразия по бассейну в целом, становятся очень сложными и как будто даже не закономерными, а случайными. При этом можно предположить, что чем сложнее геологическое строение территории (различные глубины залегания грунтовых вод, различные водовмещающие породы, разная степень дренированности и инерционности водоносных горизонтов, дренированность рекой ряда горизонтов с различным режимом подземных вод и т. п.), тем менее закономерен будет режим подземного или меженного речного стока. Следовательно, для анализа временных закономерностей подземного и минимального речного стока, позволяющих давать прогнозы режима подземных вод по площади, следует использовать водосборы малых рек с однородными гидрогеологическими условиями. Результаты прогнозов, полученных на таких бассейнах, затем можно экстраполировать на большие площади.

10. Попытка составить карту цикличности режима подземных вод на территории СССР не увенчалась успехом по нескольким причинам:

а) территория СССР охарактеризована длинными рядами наблюдений за режимом подземных вод крайне неравномерно.

На значительной части СССР сведения о многолетнем режиме подземных вод вообще отсутствуют;

б) короткие ряды наблюдений позволили выделить соответственно только циклы с малыми периодами. Длиннопериодные циклы вскрыты лишь на единичных участках;

в) разнообразие гидрогеологических условий (резкие изменения глубин залегания подземных вод, состава водовмещающих пород, степени расчлененности рельефа и т. п.) приводит к тому, что даже на сравнительно ограниченных по площади территориях отмечаются циклы с различной длиной периодов.

В результате какой-то четкой закономерности в распределении цикличности режима подземных вод по территории СССР установить не удается. В качестве доказательства можно привести карту, на которую нанесены установленные автокорреляционным методом циклы, наблюдавшиеся в режиме уровней грунтовых вод в пределах данной локальной территории не менее 2 раз (рис. 57).

Как видно из приведенной карты, достоверного фактического материала для картирования цикличности режима подземных вод явно недостаточно. Можно лишь отметить некоторые тенденции к 4-, 5- и 9-летней цикличности на западе СССР, 10—13-летней цикличности в центральных и южных районах европейской части СССР, 4-, 6- и 8-летней цикличности в Прикаспии, а также 3- и 6-летней цикличности в Сибири и на Дальнем Востоке. Единичные значения 15 — 17-летней цикличности отмечены в Каменной степи и Среднем Поволжье. Следовательно, говорить о какой-либо региональной закономерности в цикличности режима подземных вод пока преждевременно.

Подводя итоги всему сказанному выше, можно отметить, что использование вскрытой автокорреляцией цикличности режима подземных вод для долгосрочных прогнозов связано с рядом трудностей.

1. Коэффициенты автокорреляции максимальных всплесков, соответствующих длине периода цикличности, часто бывают очень низкими, не обеспечивающими достоверность прогнозов.

2. Увеличение R_{τ} при больших τ не связано с увеличением тесноты связей между уровнями, разделенными промежутком времени τ , а определено сопоставимостью интервала сдвига с длиной ряда. Поэтому, учитывая короткие ряды наблюдений за режимом подземных вод, для прогнозов можно использовать данные автокорреляции лишь по короткопериодным циклам (до 10—11 лет), естественно, лишь в тех случаях, где коэффициенты автокорреляции достигают существенных величин (не менее 0,6) и выходят за пределы выбранных доверительных интервалов.

3. Отсутствие четкой ритмичности по всем циклам не дает гарантий в том, что каждый последующий цикл будет идентичным предыдущему (или среднему из нескольких уже наблюдавшихся

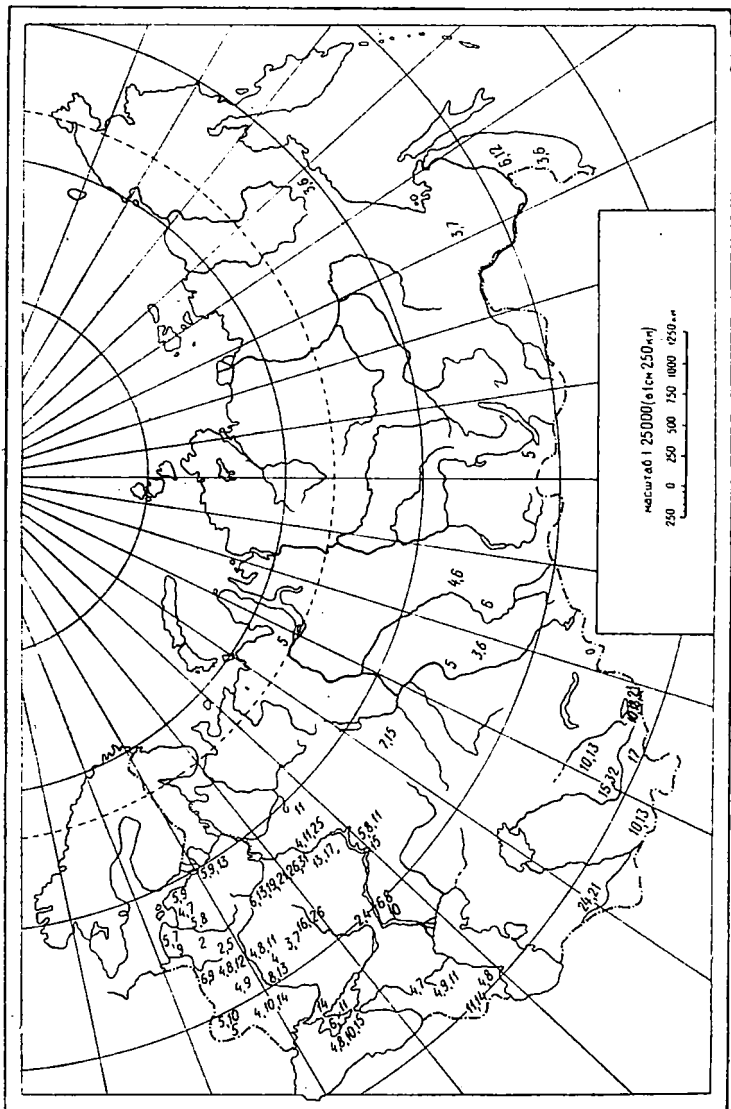


Рис. 57. Карта районов с установленной цикличностью в режиме подземных вод (цифры на карте обозначают установленную цикличность в годах)

ранее), что вносит значительный элемент случайности и субъективности в простую экстраполяцию циклов на будущее.

4. Установленные причинные связи, определяющие ту или иную продолжительность цикла, характеризуются низкой теснотой (малыми коэффициентами корреляции), что связано с отсутствием строгой ритмичности и в многолетних изменениях самих гелиогеофизических факторов. Последнее обстоятельство объясняет отсутствие долгосрочных прогнозов большинства гелиогеофизических факторов. В настоящее время долгосрочные и сверхдолгосрочные прогнозы (до 10 лет и более) составляются лишь для солнечной активности в числах Вольфа, атмосферной циркуляции по Вангенгейму и суммарных индексов нутационных колебаний полюса Земли и лунных приливов. Достоверность этих прогнозов, так же как и прогнозов режима подземных вод, составленных на их основе, все еще недостаточна.

5. Существует немало скважин и источников, в режиме которых вообще не вскрывается никакой цикличности и в которых связи режима с гелиогеофизическими факторами практически отсутствуют. Достоверность вскрываемых с помощью автокорреляции циклов с учетом наличия коротких рядов наблюдений часто не высока. Следовательно, прогнозы, базирующиеся на анализе цикличности режима подземных вод и связях с гелиогеофизическими факторами, не могут пока рассматриваться как вполне достоверные и рекомендоваться в качестве универсальных для всех случаев.

Однако, несмотря на трудности составления долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов, возможно несколько путей их использования.

1. По каждому региону может быть подобрано несколько скважин или источников, режим которых достаточно хорошо увязывается с режимом тех или иных прогнозируемых гелиогеофизических факторов. Составив прогноз режима подземных вод по таким скважинам (используя прогнозы выбранных факторов) и определив обеспеченность значений прогнозных уровней подземных вод для каждого года, можно экстраполировать значения этих обеспеченностей на территории, характеризующейся относительно синхронным режимом подземных вод. Зная же наиболее вероятную обеспеченность уровней подземных вод на данной территории на интересующий период времени в будущем, можно определить по графикам обеспеченности значения конкретных уровней для каждой скважины в отдельности, прогноз по которой не составлялся.

Опорные скважины для прогнозов можно выбрать с учетом критерия тесноты связи режима подземных вод и факторов $r \geq 0,6$, обеспечивающего достаточную для перспективных прогнозов достоверность.

2. Вскрытая цикличность в режиме подземных вод может служить обоснованием для составления уравнений регрессии за-

зависимостей последующих уровней от предыдущих отдельно для периодов спада и подъема. Эти уравнения могут успешно использоваться для прогнозов, когда периоды спада или подъема уже определены. Зависимости последующих уровней от предыдущих могут устанавливаться и графически (см. главу III).

3. Коэффициенты автокорреляции, соответствующие максимальным положительным всплескам на коррелограмме и превышающие заданный уровень значимости (например, $R_\tau \geq 0,5 \div 0,6$), могут быть использованы для составления прогностических уравнений регрессии парных связей (как это было рассмотрено в главе II). Подобные уравнения служат основой для прогнозов режима подземных вод с заблаговременностью, равной τ лет, т. е. сдвигу, соответствующему максимальному положительному всплеску с $R_\tau \geq 0,5 \div 0,6$. По существу, данный способ прогнозов является экстраполяцией цикличности в будущее. Однако эта экстраполяция отражает усредненные характеристики цикличности, вскрытые за период предыдущих наблюдений.

4. Рассмотренная ранее зависимость степени инерционности водоносного горизонта от интенсивности водообмена подземных вод позволяет использовать для составления прогнозов связи между суммарными за многолетие или сглаженными по n -летиям атмосферным осадками (или разностями между осадками и испарением) и уровнями подземных вод. Для этой цели методом последовательных приближений необходимо определить период водообмена водоносного горизонта по наиболее высоким значениям коэффициентов корреляции уровней подземных вод с осадками, суммируемыми за период с постепенно увеличивающимся числом лет. Прогностическое уравнение представляет собой уравнение регрессии парной корреляционной связи между уровнем (среднегодовым, минимальным годовым или максимальным) подземных вод и сглаженными по n -летиям атмосферными осадками предшествующего периода, равного времени водообмена водоносного горизонта. Здесь можно отметить, что чем больше период водообмена (инерционность) водоносного горизонта, тем точнее могут быть прогнозы уровней подземных вод, так как тем меньше весовая доля неизвестных осадков прогнозного периода по сравнению с суммой осадков известного периода.

В данном способе долгосрочного прогноза могут быть использованы следующие варианты учета осадков предыдущего и прогнозного периодов: 1) учет суммарных или сглаженных по n -летиям атмосферных осадков, известных на момент составления прогноза; 2) учет тех же осадков, но с прибавлением осадков, которые, возможно, выпадут в период, определяемый заблаговременностью прогноза (средне многолетние значения осадков либо их прогнозные величины, соответствующие водности прогнозного периода).

Заблаговременность таких прогнозов зависит от степени

инерционности водоносного горизонта и может достигать двух лет и более.

Установленная зависимость уровней подземных вод от суммарных осадков предыдущего периода может также использоваться и для наращивания коротких рядов наблюдений по имеющимся длинным рядам наблюдений за метеорологическими факторами, а также для восстановления пропусков в наблюдениях и для отделения естественных колебаний уровней от колебаний, вызванных хозяйственной деятельностью человека.

5. Недостаточно тесные корреляционные связи режима подземных вод с отдельными гелиогеофизическими факторами, а также наличие тенденций к существованию таких связей с рядом различных гелиогеофизических факторов свидетельствуют о том, что режим подземных вод формируется, как уже отмечалось ранее, при одновременном воздействии большого количества различных режимообразующих факторов, и резкое преобладание воздействия одного из них над другими (высокие коэффициенты парных корреляционных связей) является скорее исключением, чем правилом.

Поэтому так же, как и сезонные прогнозы, долгосрочные и сверхдолгосрочные многолетние прогнозы режима подземных вод должны основываться на методе множественной корреляции. В качестве факторов множественной корреляции могут использоваться солнечная активность в числах Вольфа, атмосферная циркуляция, нутационные колебания полюса Земли и лунных приливных сил.

В настоящее время ведутся исследования по долгосрочному прогнозированию геомагнитной возмущенности Земли и других гелиогеофизических факторов, которые в будущем, по-видимому, также могут быть использованы для прогнозов режима подземных вод.

При вскрытии как парных, так и множественных связей режима подземных вод с гелиогеофизическими факторами важно выявить сдвиг во времени (запаздывание) воздействия того или иного фактора на подземные воды и тем более на подземный сток, оцениваемый по расчленению гидрографа реки. Визуальное сопоставление графиков колебаний уровней подземных вод и определяющих их факторов показывает иногда наличие сдвигов многолетних максимумов и минимумов уровней подземных вод от соответствующих минимумов и максимумов гелиогеофизических факторов на один — три года, что связывается со степенью изолированности водоносного горизонта от поверхности Земли или удаленности точки проведения наблюдений от областей питания водоносного горизонта или от реки.

Величину временного сдвига зависимой переменной y от независимой x определяют расчетом кросскорреляционной функции $R_{xy}(\tau)$ по следующему уравнению [32]:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} T^{-1} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt, \quad (83)$$

где T — период колебаний;

τ — сдвиг фаз колебаний зависимой переменной y от независимой x в течение периода наблюдений t .

Всплеск на кросскоррелограмме свидетельствует об увеличении тесноты связи двух анализируемых рядов наблюдений при их сдвиге во времени на τ лет.

Проведя кросскорреляцию прогнозируемого ряда уровней подземных вод с каждым из используемых для прогнозов фактором и установив объективно (а не визуально) величину сдвига

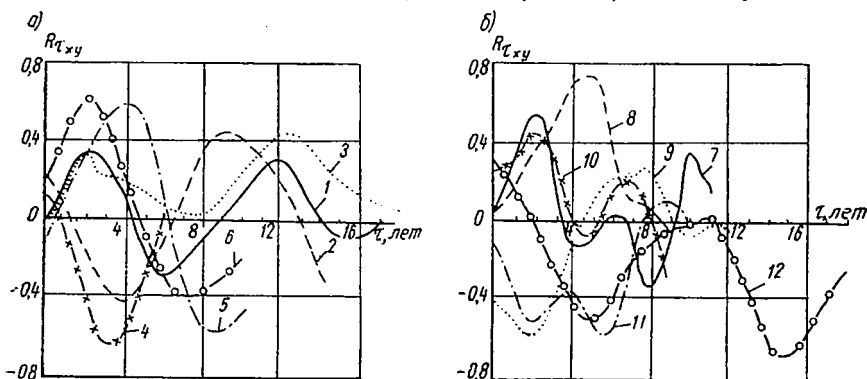


Рис. 58. Кросскорреляционные функции среднегодовых уровней грунтовых вод и солнечной активности в числах Вольфа (а) и среднегодовых уровней и геомагнитной возмущенности (б)

1 — скважина 459 (Горьковская станция); 2 — скважина 44/55 (Московская станция); 3 — скважина 7/41 (Московская станция); 4 — скважина 3 (Амуро-Уссурийская станция); 5 — скважина 207 (Крымская степная станция); 6 — скважина 33 (Южно-Украинская станция); 7 — скважина 177 (Белорусская станция); 8 — скважина 9-103 (Сев.-Украинская станция); 9 — источник 129 (Армянская станция); 10 — скважина 221 (Нижне-Волжская станция); 11 — скважина 11 (Северо-Западная станция); 12 — скважина 6 (Московская станция)

воздействий каждого фактора на режим подземных вод, можно более обоснованно выбрать факторы и провести расчеты как парной, так и множественной корреляции уже с учетом вскрытых сдвигов.

На рис. 58 приведены примеры кросскоррелограмм связей среднегодовых уровней грунтовых вод по ряду скважин территории СССР с солнечной активностью и геомагнитной возмущенностью, из которых видно, что недостаточно тесные парные корреляционные связи (при сдвиге, равном нулю) могут быть иногда значительно усилены за счет учета существующего запаздывания в проявлении той или иной связи. Принимая во внимание наличие длинных рядов наблюдений за режимобразующими факторами, превышающих ряды наблюдений за режимом подземных вод, программу расчета кросскорреляции составили так, что короткий ряд сдвигался относительно длинного ряда без

уменьшения первого, чем была достигнута равноценность по достоверности всех значений $R_{xy}(\tau)$.

Подобная кросскорреляция была проведена с различными режимообразующими факторами, а также между скважинами, расположенными в различных регионах. В результате установлено, что как между уровнями подземных вод и различными режимообразующими факторами, так и в режиме подземных вод различных регионов нередко существует явная асинхронность со сдвигами, равными одному — трем, а иногда и пяти-шести годам.

Выявленные зависимости позволяют в таких случаях составлять прогнозы режима подземных вод соответственно на один — шесть лет вперед по известным на сегодня данным о метеорологических факторах, атмосферной циркуляции, солнечной активности или режиме подземных вод по определенным опорным скважинам. Задача в данном случае заключается в выборе для каждого анализируемого района либо какого-то «района предиктора», режим подземных вод в котором предшествует режиму подземных вод в анализируемом районе, либо какого-то фактора, изменения которого проявляются в анализируемом районе с соответствующим запаздыванием.

6. Выявление цикличности в режиме подземных вод, и особенно длиннопериодных циклов, позволяет выделить цикличность в виде тренда или детерминированной составляющей из имеющегося ряда наблюдений в целях отдельного прогнозирования детерминированной и случайной стохастической компоненты. Разделение наблюдений на детерминированную и случайную компоненту может быть использовано при составлении как сезонных, так и долгосрочных многолетних прогнозов режима подземных вод как случайного стационарного процесса [105].

7. Наличие четко выраженной и достоверной цикличности в режиме подземных вод позволяет также разложить колебания уровней подземных вод на серию синусоид или косинусоид с различными периодами и амплитудами, составляя прогнозы по полученному уравнению и задаваясь лишь временем заблаговременности t . Возможности применения данного метода, так же как и предыдущего, рассмотрены нами в главе II.

Рассмотренные в данной главе закономерности цикличности режима подземных вод, взаимосвязи многолетних колебаний уровней подземных вод с гелиогеофизическими факторами, а также инерционность и асинхронность наблюдающихся связей показывают принципиальную возможность составления долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов режима подземных вод. Невысокая достоверность таких прогнозов не может служить основанием для отказа от их составления, так как и такие прогнозы имеют большое практическое значение для перспективного планирования использования водных ресурсов и других целей.

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПРОГНОЗЫ-ОЦЕНКИ
ВОЗМОЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Помимо рассмотренных в предыдущих главах временных или календарных прогнозов режима подземных вод, на основе которых определяются максимальные, минимальные или среднегодовые значения уровней подземных вод конкретного года или на ряд лет вперед и даже рассчитываются более детально сроки наступления минимальных и максимальных уровней в течение года или в многолетнем разрезе, нередко необходимо оценить максимально возможные колебания уровней или расходов подземных вод без указания конкретных сроков их наступления. В частности, одним из сложных вопросов анализа режима подземных вод является оценка возможных многолетних изменений уровней или дебитов подземных вод при наличии коротких рядов наблюдений. Необходимость такой оценки возникает при определении многолетней изменчивости естественного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод, при прогнозных оценках возможных колебаний уровней грунтовых вод на участках строительства, при сопоставлении результатов наблюдений за режимом подземных вод для его картирования и т. п. Во многих из перечисленных выше случаев обычно располагают крайне ограниченными рядами наблюдений — от нескольких месяцев до двух-трех лет. Даже массовая стационарная сеть наблюдательных скважин гидрогеологических станций имеет период наблюдений всего 10—15 лет, что для анализа случайных процессов недостаточно.

При анализе режима подземных вод в связи с необходимостью получения многолетних характеристик колебаний уровней или дебитов подземных вод приходится сталкиваться с проблемой приведения коротких рядов наблюдений к длинным, отыскания путей сравнения разнородных материалов наблюдений и оценки их репрезентативности в многолетнем аспекте. Эта проблема решается различными методами и может быть отнесена к категории вероятностно-статистических невременных прогнозов режима подземных вод, поскольку она требует по ограниченному ряду наблюдений дать обоснованные представления о возможных за многолетие колебаниях уровней или дебитов подземных вод. В отличие от временных прогнозов, в данном случае не указывается лишь конкретное время наступления того или иного максимального или минимального уровня либо какого-то заданного уровня соответствующей обеспеченности.

Кроме того, причинно-следственные связи режима подземных вод могут быть установлены далеко не всегда. Даже в тех случаях, когда в анализируемом ряду наблюдений прослежива-

ются какие-либо детерминированные составляющие (тренд или цикличность), значительная роль в наблюдающихся колебаниях принадлежит случайным компонентам. Проводя анализ временных рядов гидрологических данных, Ч. Кайсл, ссылаясь на Бунге, пишет: «Совершенная случайность, по-видимому, является такой же абстракцией, как совершенная причинность, и все же ни та, ни другая не мыслится по отдельности...» [32].

Количество факторов, участвующих в формировании природных процессов, включая режим подземных вод, так велико, что учесть их все в прогнозах невозможно. Поэтому в любой модели ставится лишь задача наиболее полно отразить влияние основных процессов и проанализировать возможную ошибку, определяемую пренебрежением учета остальных факторов. В результате составление временных прогнозов, основывающихся либо на однозначных связях режима подземных вод с какими-то факторами, либо на экстраполяции детерминированных составляющих во времени, возможно лишь, когда прогностическая (математическая) модель с достаточной для практики точностью отражает фактические изменения анализируемого ряда. В тех же случаях, когда подобрать такую модель не удастся или когда в анализируемом ряду случайная компонента преобладает над детерминированной, единственно возможным остается составление невременных или вероятностных прогнозов.

Вероятностные прогнозы, позволяющие оценить минимальные или максимальные за многолетие уровни или дебиты подземных вод без указания конкретного срока их наступления, нередко вполне пригодны для практики и в первую очередь для долговременного строительства (гражданского, промышленного, гидротехнического и др.).

Основой составления вероятностных прогнозов является расчет графиков обеспеченности заданных значений уровней или дебитов подземных вод, который чаще всего проводится по формуле

$$P_m = \frac{m}{n+1} 100, \quad (84)$$

где P_m — вероятность превышения члена выборки, занимающего в порядке убывания m -е место в выборке из n членов,

Иногда для расчетов используют формулу

$$P_m = \frac{m - 0,3}{n + 0,4}. \quad (85)$$

Обеспеченность выражается обычно в процентах и характеризует гарантированность существования соответствующих уровней за многолетие. Например, 5%-ная обеспеченность уровня свидетельствует о том, что на меньших глубинах он может

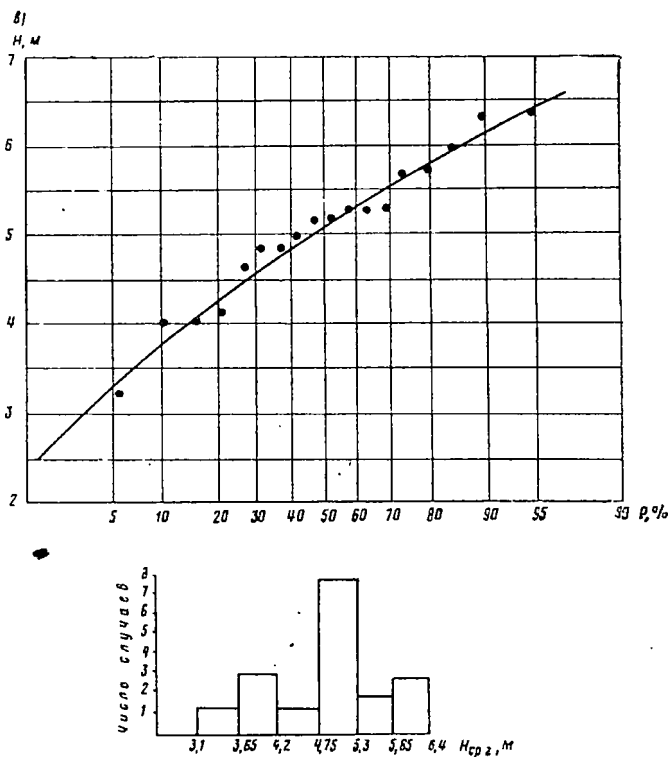
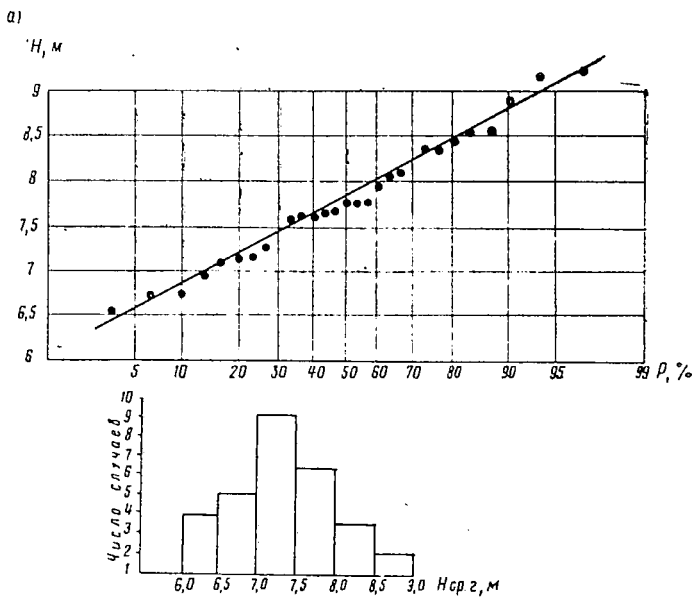
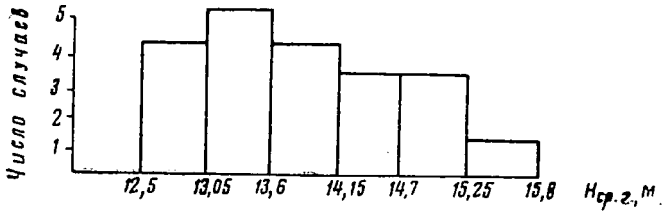
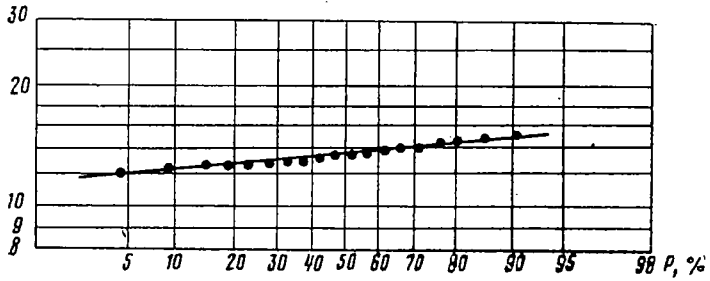
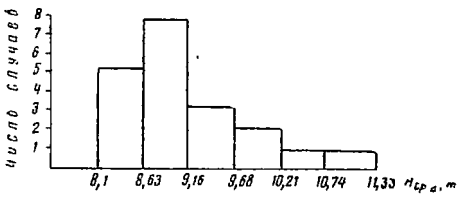
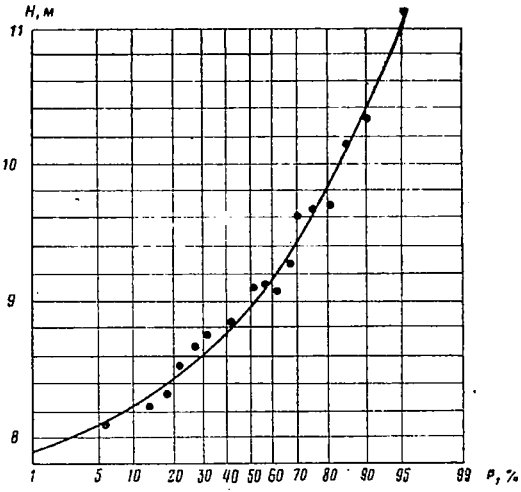


Рис. 59. Типы кривых распределения вероятностей и частот глубин залегания
160

б)
 $\langle \lg H, \text{м} \rangle$



в)



уровней и дебитов подземных вод (продолжение рис. 59 см. на стр. 162)

11—950

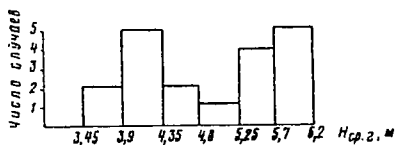
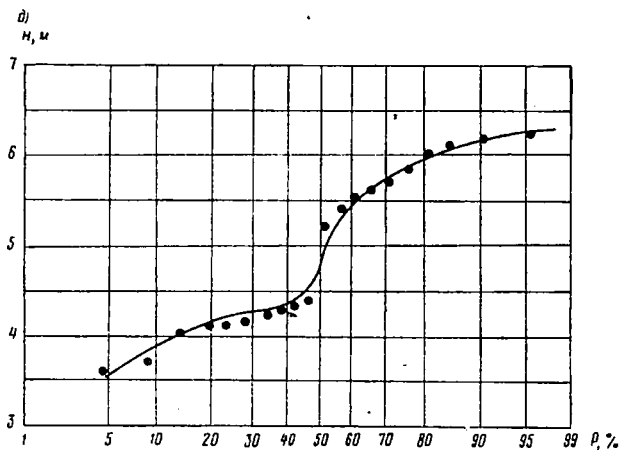


Рис. 59, д. Типы кривых распределения вероятностей и частот глубин залегания уровней и дебитов подземных вод

быть встречен лишь в течение 5 лет из 100, а в остальные 95 лет он будет находиться глубже.

Поскольку для практических целей чаще всего необходимо знать максимальные, минимальные и среднегодовые уровни подземных вод, целесообразнее всего определить обеспеченность именно этих трех характеристик. Одновременно с этим оцениваются и возможные изменения амплитуд колебаний уровней подземных вод в многолетнем разрезе. Чаще всего требуется знать значения уровней и дебитов подземных вод 1, 5, 50, 95 и 99%-ной обеспеченности.

При вероятностном анализе возможных колебаний уровней подземных вод принимаются следующие допущения.

1. Анализируемая выборка (ряд значений уровней или расходов подземных вод) должна быть однородной по условиям формирования режима подземных вод, а именно: все значения должны отражать только естественный режим, формироваться только под воздействием инфильтрации и испарения или только в результате подпора грунтовых вод и быть фазово-однородными, т. е. среднегодовыми, максимальными весенними, минимальными предвесенними или минимальными летне-осенними.

2. Предполагается наличие устойчивого среднеегодового

значения анализируемых уровней, независимо от длины ряда, т. е. исключается наличие какого-либо тренда.

3. Изменения анализируемых значений уровней, помимо закономерного годового цикла, являются случайными, независимыми друга от друга. Те или иные отклонения от этих допущений должны быть учтены при проведении статистического анализа данных.

Особенно важным для анализа распределения уровней или дебитов подземных вод является правильный выбор из имеющегося ряда наблюдений соответствующих генетических или фазово-однородных значений уровней.

Учитывая практическую направленность рассматриваемого анализа, для построения графиков обеспеченности целесообразнее всего использовать срочные (суточные) значения максимальных и минимальных годовых уровней, а также среднегодовых уровней подземных вод.

Возможные амплитуды колебаний уровней подземных вод определяются как разность между максимально возможными максимальными и минимально возможными минимальными уровнями заданной обеспеченности.

Рассмотрение графиков обеспеченностей и гистограмм распределения частот минимальных предвесенних, максимальных весенних и среднегодовых уровней подземных вод, построенных по материалам массовых наблюдений за режимом подземных вод в различных гидрогеологических и климатических условиях территории СССР, позволяет выделить пять основных типов распределений (рис. 59).

I. С нормальным законом распределения уровней, последовательное суммирование ранжированного ряда которых образует на простой вероятностной бумаге (клетчатке Хазена) прямую линию (рис. 59, а).

II. С логарифмически нормальным законом распределения уровней, образующих прямую линию на логарифмической вероятностной бумаге (рис. 59, б).

III. С левоасимметричным распределением уровней, образующих выпуклую кривую как на простой, так и на логарифмической клетчатке (рис. 59, в).

IV. С правоасимметричным распределением уровней, образующих вогнутую кривую как на простой, так и на логарифмической клетчатке (рис. 59, г).

V. Со сложным законом распределения уровней, образующих вогнуто-выпуклую кривую как на простой, так и на логарифмической клетчатке (рис. 59, д).

Частота появления распределения различных типов неодинакова. Результаты анализа указанных типов распределения по 155 рядам среднегодовых уровней, 130 рядам минимальных предвесенних уровней и 129 рядам максимальных весенних уровней показаны в табл. 17.

Таблица 17

Тип распределения	Частота появления различных типов распределения уровней		
	среднегодовых	минимальных предвесенних	максимальных весенних
I	18*	17	9
	12	13	8
II	37	38	21
	23	29	16
III	20	15	16
	13	12	12
IV	26	25	31
	17	19	24
V	54	35	52
	35	27	40

* В числителе приведено общее число встреченных случаев, в знаменателе — число случаев в процентах.

Как видно из табл. 17, наиболее часто в режиме подземных вод встречаются распределения V типа.

Значительной является также доля распределений IV типа.

Кривые распределения среднегодовых, минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней или дебитов подземных вод по одной и той же скважине или источнику чаще всего бывают одинаковыми при некоторой тенденции к увеличению числа асимметричных кривых распределения по максимальным весенним уровням по сравнению со среднегодовыми и минимальными предвесенними уровнями.

Асимметричные типы распределения (II—V) характерны для условий, где связь подземных вод с поверхностью земли слаба, и поэтому наблюдаются при сравнительно глубоком (свыше 4 м) залегании грунтовых вод. В связи с тем, что такие условия встречаются в различных районах, говорить о каких-либо региональных закономерностях в проявлениях того или иного типа распределения по территории СССР не приходится. При неглубоком (менее 3—4 м) залегании грунтовых вод и при проницаемой зоне аэрации, не регулирующей процессы питания и разгрузки подземных вод, чаще всего наблюдаются I и V, реже II типы распределения.

Значительную роль в определении достоверности типов распределения играет продолжительность анализируемых наблюдений за режимом подземных вод. Для выяснения этого вопроса нами по ряду скважин с наиболее длинными рядами наблюдений было построено несколько графиков обеспеченности с ис-

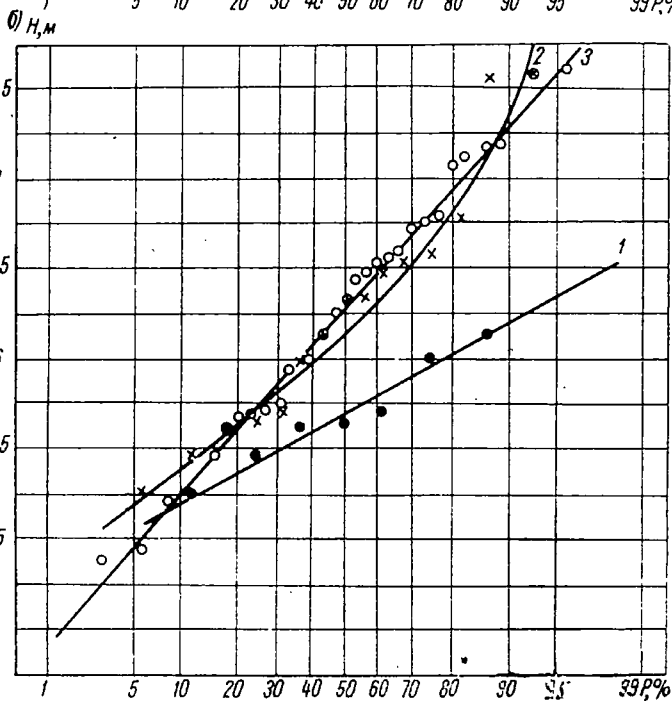
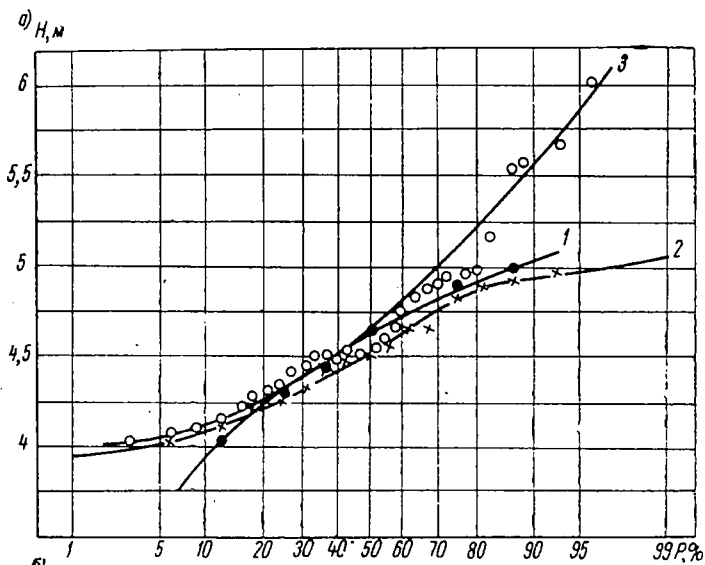


Рис. 60. Графики обеспеченности среднегодовых значений уровней грунтовых вод по скважине 6, Тушино, Москва (а) и шурфу № 1, Каменная степь (б), построенные по рядам продолжительностью 7 (кривая 1), 15 (кривая 2) и 30 (кривая 3) лет.

пользованием данных только последних 7, 15 и 30 лет. Получились следующие результаты: по скважине 6, Тушино (Москва), для 7-летнего периода кривая обеспеченности была аналогичной кривой III типа, для 15-летнего она превратилась в кривую V типа, а для 30-летнего — в кривую IV типа (рис. 60, а). Аналогичные изменения типов распределения наблюдались по скважине 13, Тоншаево (Горьковская станция) и скважине 343, ТСХА (Москва), где при 7- и 15-летних рядах наблюдались кривые распределения сложных форм (близкие к кривой V типа), а при увеличении продолжительности ряда до 30 лет кривые обеспеченности выпрямлялись до слабо правоасимметричных (кривая IV типа) или почти нормальных (близких к кривой I типа). По шурфу № 1 в Каменной степи 7-летний ряд дал почти прямую (I типа), 15-летний — слабоогнутую (кривая IV типа), а 30-летний — вновь почти такую же прямую, как и построенную по 55-летнему ряду (рис. 60, б).

Во всех случаях графики обеспеченности, построенные по коротким (семь лет) рядам наблюдений, располагались либо выше, либо ниже кривых, построенных по полным рядам, имели иной уклон, чем последние, и характеризовали обеспеченности высоких и низких значений с существенными отклонениями от тех, которые получались по длинным рядам. 15-летние ряды уже во многом отражают основные тенденции в распределении уровней за многолетие, а 30-летние почти полностью соответствуют (по характеру закона распределения) многолетним (50 лет и более).

Таким образом, достоверность вероятностных характеристик режима во многом зависит от длины исходного ряда. Поэтому приведенные в табл. 17 цифры в какой-то мере являются условными, так как отражают характер распределения уровней и дебитов подземных вод разнородных по продолжительности рядов наблюдений. Данные о типах распределения для ряда длиной минимум 25 лет приведены в табл. 18.

Таблица 18

Тип распределения	Число случаев различных типов распределения уровней		
	среднегодовых	минимальных предвесенних	максимальных весенних
I	4	4	2
II	6	2	3
III	1	—	—
IV	2	1	2
V	6	1	1

Таким образом, при длинных рядах наблюдений (свыше 25 лет) правоасимметричные кривые практически отсутствуют

(т. е. появление кривых этого типа является, видимо, случайным), а доминируют нормальный, логарифмически нормальный и сложный законы распределения. Однако число длинных рядов в СССР, как видно из табл. 18, весьма ограничено, и поэтому вывод о наблюдаемых законах распределения уровней подземных вод не может считаться окончательным.

Графики обеспеченности, построенные по фактическим наблюдениям, являются основой для снятия с них характеристик уровней с заданной для практических целей обеспеченностью. Экстраполяция этих графиков на высокие и низкие значения обеспеченностей является своеобразным прогнозом, позволяющим по коротким рядам наблюдений получить представления о возможных колебаниях анализируемых уровней. Так, например, наиболее часто используемые для расчетов запасов подземных вод значения уровней 95%-ной обеспеченности могут быть зафиксированы (исходя из принципа расчета графиков обеспеченности) фактическими наблюдениями продолжительностью не менее 20 лет. Построив же график обеспеченности по более короткому ряду и экстраполировав полученную кривую до вертикальной прямой, соответствующей 95%-ной обеспеченности, можно прямо с графика снять соответствующее значение уровней или дебитов подземных вод. Аналогичным образом могут быть экстраполированы кривые фактических распределений уровней в область малых значений обеспеченностей (5- и 1%-ной), необходимых для выявления максимально высоких уровней грунтовых вод, которые могут привести к подтоплению территории строительства, затоплению подвалов и т. п.

Наиболее надежная графическая экстраполяция наблюдавшихся уровней подземных вод будет, естественно, при I и II типах распределения. В этом случае уже 10- и 15-летние ряды позволяют достаточно точно оценить уровни 1, 5, 95 и 99%-ной обеспеченностей простой экстраполяцией прямых на графиках до соответствующих значений обеспеченностей. Во многих случаях и при асимметричных типах распределения кривизна графиков, особенно построенных в логарифмическом масштабе, невелика и также позволяет определить указанные значения уровней графически с достаточной для практики точностью. Естественно, наиболее надежной подобная экстраполяция может быть при наличии длинных рядов наблюдений (не менее 20 лет).

Экстраполяция графиков обеспеченности, как известно, может производиться как по кривым, проведенным усредненно по фактическим точкам (см. рис. 59), так и по рассчитанным по имеющимся фактическим данным теоретическим кривым. Основы расчетов последних изложены в специальной литературе [4, 29, 34, 69 и др.] и поэтому нами не рассматриваются.

Расчеты основных статистических параметров, необходимых для построения теоретических кривых, показали довольно вы-

сокую пестроту этих характеристик. Основными статистическими параметрами являются следующие:

\bar{H} — среднемноголетняя норма прогнозируемого уровня;
 σ — среднеквадратическое отклонение, определяемое по уравнению (28);

C_v — коэффициент вариации, рассчитываемый по уравнению (49);

C_s — коэффициент асимметрии, рассчитываемый по уравнению

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (H_i - \bar{H})^3}{\sigma^3} \cdot \frac{n}{(n-1)(n-2)}. \quad (86)$$

Таблица 19

Тип распределения	C_v	C_s	σ	$\frac{C_s}{C_v}$	$\frac{C_{s\text{ср}}}{C_{v\text{ср}}}$
<i>Среднегодовые уровни</i>					
I	0,13—0,45*	(-0,56)—0,56	0,13—0,83	(-1,8)—1,4	0,45
	0,21	0,1	0,32	0,46	
II	0,0—0,16	(-0,86)—0,54	0,13—1,4	(-16,8)—13,5	-1,57
	0,07	-0,11	-1,42	-1,42	
III	0,01—0,26	(-1,79)—0,59	0,15—0,98	(-46,0)—5,4	-5,8
	0,09	-0,52	0,42	-6,1	
IV	0,04—0,44	(-0,60)—1,09	0,11—1,41	(-4,0)—9,8	2,55
	0,2	0,51	0,45	3,41	
V	0,08—0,44	(-1,32)—1	0,14—1,16	(-9,4)—11,1	-0,8
	0,16	-0,13	0,42	-0,55	
<i>Весенний максимум</i>					
I	0,08—0,52	(-0,79)—1,01	0,17—1,03	(-3,6)—2	-0,2
	0,26	-0,05	0,4	-1	
II	0,01—0,35	(-0,32)—1,3	0,13—1,63	(-10,7)—13	2,18
	0,11	0,24	0,59	-1,64	
III	0,08—0,37	(-0,94)—(0,49)	0,24—1,14	(-11,8)—(-2)	-4,1
	0,16	-0,66	0,79	-7	
IV	0,08—1,7	(-1,07)—1,86	0,06—1,28	(-6,6)—5	+1,5
	0,3	0,45	0,49	0,46	
V	0,06—0,74	(-1,61)—0,74	0,23—1,76	(-6,9)—8,6	-0,67
	0,3	-0,2	0,76	-0,8	

* В числителе дан размах значений параметров, в знаменателе — их средние величины.

Значения этих параметров в зависимости от выделенных ранее пяти типов распределения показаны в табл. 19. Как видно из данной таблицы, разброс рассчитанных параметров для всех типов распределения довольно высок и не всегда согласуется с теоретическими представлениями. Так, для нормального закона распределения¹ иногда встречаются существенные значения коэффициентов асимметрии, хотя средние значения и близки к нулю. Подобные отклонения от теоретических значений вызваны как ограниченностью выборочных данных (короткость рядов наблюдений), так и отклонениями от сформулированных выше допущений, принятых для вероятностного анализа. Вместе с тем построенные теоретические кривые для I и II типов распределения чаще всего хорошо сопоставляются с эмпирическими. Во многих случаях эмпирические кривые III и IV типов удовлетворительно совмещаются и с кривыми Пирсона III типа, и с кривыми модификации гамма-распределения, предложенной С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем [69]. При этом для построения теоретических кривых III типа при $C_s < 0$ нами использовалась формула

$$x_p = -z\sigma + \bar{x}, \quad (87)$$

а для построения кривых IV типа при $C_s > 0$ —

$$x_p = z\sigma + \bar{x}, \quad (88)$$

где x_p — расчетное значение уровня или дебита грунтовых вод заданной обеспеченности;

\bar{x} — среднемноголетнее значение уровня или дебита;

σ — среднеквадратичное отклонение уровня или дебита;

z — табличное значение нормированных отклонений уровней от их средней для различных значений вероятностей функции распределения.

Значения уровней подземных вод могут быть выражены в абсолютных величинах или в глубинах от поверхности земли; в зависимости от этого берутся либо табличные значения z для соответствующих значений вероятностей P , либо их обратные ($100 - P\%$) значения, т. е., например, для нахождения уровня 5%-ной обеспеченности во втором случае брались табличные значения z для 95%-ной обеспеченности.

Аппроксимация наблюдаемых асимметричных кривых распределения уровней и дебитов подземных вод наиболее распространенными и чаще всего используемыми в гидрологии законами распределения не всегда дает удовлетворительные результаты. При сравнительно хорошей сопоставимости эмпирических

¹ Отнесение графиков к нормальному закону распределения делалось визуально, когда разброс точек на клетчатке Хазена относительно прямой линии был несущественным.

и теоретических кривых в центральных их частях концы кривых иногда расходятся довольно существенно. Проверка в этих случаях сопоставимости кривых с помощью критерия χ^2 подтверждает их низкую сходимость. Причины низкой сходимости эмпирических и теоретических кривых в разных случаях различны, и чаще всего ими являются, видимо, следующие.

1. Условия формирования режима подземных вод при различных глубинах их залегания существенно меняются. Так, при малых глубинах до воды значительную роль в балансе подземных вод играет испарение, при больших глубинах стабилизирующим фактором нередко становится базис дренированности подземных вод. Влияет на характер изменений уровней и неоднородность водовмещающей среды по вертикали. Таким образом, колебания уровней подземных вод относительно своих максимальных и минимальных значений по сравнению с колебаниями уровней вблизи их среднесуточных норм могут осуществляться под влиянием различных граничных условий. Поэтому законы распределения уровней подземных вод различной обеспеченности могут быть различными, так как значения анализируемых уровней далеко не всегда однородны по своему генезису. В частности, нам представляется, что кривые V типа обеспеченности отражают именно неоднородные выборки.

Разделение имеющейся выборки фактических наблюдений на части с генетически однородными условиями формирования режима и построение графиков обеспеченности для каждой из частей отдельно возможны лишь при достаточно длинных рядах наблюдений, какими мы сейчас практически не располагаем. Приближенные результаты может дать анализ удлиненных тем или иным способом рядов наблюдений или построение совмещенных графиков обеспеченностей сразу по нескольким скважинам, находящимся в одинаковых гидрогеологических условиях (со сходными глубинами залегания грунтовых вод и литологией водовмещающих пород, характером поверхности земли и т. д.).

2. Все применяемые в математической статистике законы распределения предусматривают наличие независимых случайных последовательностей. Ряды же уровней и дебитов подземных вод, как было показано ранее, не являются таковыми. Наоборот, почти во всех рядах последующие уровни в той или иной мере зависят от предыдущих. Наименее взаимосвязанными являются ряды, характеризующиеся нормальным законом распределения, но и здесь средний коэффициент автокорреляции при $\tau=1$ равен 0,46. Уровни, имеющие II—IV типы распределения, обладают средней автокоррелированностью 0,53—0,57, а уровни, имеющие V тип распределения, — 0,66. В условиях такой взаимосвязанности параметры распределения должны рассчитываться по другим зависимостям. Возможно, другими должны быть и законы распределения для характеристик режима подземных вод. Поэтому на данном этапе для определения ми-

нимально и максимально возможных значений уровней подземных вод лучше всего использовать графический способ.

3. Существенные искажения характера кривой обеспеченности, как уже было показано ранее, возникают за счет ограниченности ряда наблюдений.

Суммируя отмеченные трудности, можно сказать, что вопрос теории экстраполяции кривых распределения уровней подземных вод является предметом будущих исследований.

Представляет интерес и выявление зависимостей наблюдаемых типов распределения и основных статистических параметров от геологических и гидрогеологических условий территории. В частности, устанавливаются четкие взаимосвязи величин среднеквадратичных отклонений и коэффициентов вариации многолетних значений среднегодовых, минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней от глубин залегания подземных вод в водовмещающих породах всех типов, кроме трещиноватых и закарстованных известняков. Слабо зависит от глубины значение коэффициента асимметрии. Интересно отметить и тот факт, что значения коэффициентов вариации и среднеквадратичных отклонений уровней подземных вод значительно меньше, чем поверхностных. Это свидетельствует о большей инерционности первых.

Таким образом, графики обеспеченностей позволяют приводить различные ряды наблюдений к сравнимым характеристикам, определять среднееголетние нормы соответствующих значений уровней (равные 50%-ной обеспеченности) независимо от длины ряда наблюдений, определять возможные за многолетние амплитуды колебаний уровней подземных вод, а также максимально и минимально возможные глубины залегания подземных вод.

При наличии коротких рядов наблюдений (менее 10 лет) подобная экстраполяция не может обеспечить необходимую достоверность прогноза. В таких случаях требуется наращивание короткого ряда, для чего могут быть применены различные методы.

1. Метод парной корреляции между уровнями подземных вод в анализируемой скважине с коротким рядом наблюдений и уровнями подземных вод скважины-аналога, располагающейся в сходных гидрогеологических условиях и имеющей длинный ряд наблюдений. Идентичность режима подземных вод по скважинам-аналогам должна быть доказана не только высокими корреляционными связями между их уровнями за период совместных наблюдений, но и идентичностью законов распределения уровней за тот же период. Кроме того, для наращивания могут быть использованы связи с режимом рек или эффективных атмосферных осадков.

2. Метод множественной корреляции, позволяющий установить взаимосвязь колебаний уровней подземных вод в анализи-

руемой скважине с метеорологическими и гидрологическими факторами, по которым имеются длинные ряды наблюдений. Составив уравнение регрессии за период совместных наблюдений за режимом подземных вод и гидрометеорологическими факторами и зная последние за более длительный промежуток времени, можно рассчитать уровни подземных вод в прошлом (т. е. составить палеогноз режима уровней подземных вод за период, когда наблюдений за режимом не велось).

Оба эти приема позволяют удлинить хронологические ряды наблюдений, но содержат систематические ошибки, занижающие размах колебаний уровней подземных вод. Связано это с тем, что в расчетном уравнении регрессии каждому значению x_i соответствует несколько значений y , а в расчет принимается лишь значение $y_{иср}$.

Компенсация подобного нивелирования размаха колебаний для первого метода достигается устранением из уравнения регрессии коэффициента корреляции (с сохранением его знака), т. е. расчет палеогнозных значений ведется по уравнению

$$y_i = \bar{y} \pm \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (x_i - \bar{x}), \quad (89)$$

где y_i, \bar{y}, σ_y — значения уровней подземных вод наращиваемого короткого ряда, их среднеголетняя норма и среднеквадратичное отклонение;

x_i, \bar{x}, σ_x — аналогичные значения параметров длинного ряда наблюдений, используемых для наращивания.

Учесть степень нивелирования размаха колебаний для второго метода трудно. Тем не менее по удлиненным данным методами рядам наблюдений строятся графики обеспеченности, позволяющие составлять вероятностные прогнозы с много большей достоверностью.

3. Метод парной корреляции между статистическими параметрами короткого и длинного рядов [69]. Этот прием позволяет исключить систематические ошибки, но не дает представлений о календарных колебаниях уровней подземных вод. В данном случае по новым более достоверным статистическим параметрам $y; \sigma_y; C_v$ короткие ряды наблюдений приводятся к длинным и строятся более достоверные кривые обеспеченности.

Имеются и другие пути удлинения коротких рядов наблюдений — применение весовых функций, метода Монте-Карло и др.

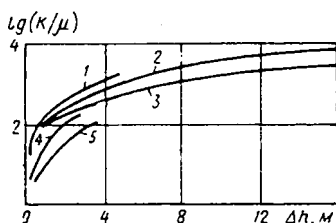
Во всех случаях для надежного наращивания коротких рядов необходимо иметь минимум шесть-семь лет наблюдений. При более коротких рядах наблюдений оценка возможных многолетних колебаний уровней подземных вод становится более сложной и менее достоверной. Основой такой оценки могут служить лишь вскрытые региональные закономерности режима подземных вод для данной территории.

Наличие коротких рядов наблюдений (менее 8—15 лет), которые невозможно удлинить, не может служить поводом для отказа от составления вероятностных прогнозов. Было бы неправильным вообще говорить о необходимости наличия какой-то определенной минимальной продолжительности ряда наблюдений, ниже которой прогнозы уже невозможны. Однако всегда следует иметь в виду, что короткие ряды наблюдений дают менее точные прогнозы, и поэтому необходимо показывать их достоверность, зависящую от продолжительности наблюдений.

В частности, при совсем коротких сроках наблюдения за режимом подземных вод, например в течение трех—пяти месяцев, необходимо приурочивать эти наблюдения к зимне-весеннему

Рис. 61. График зависимости амплитуд колебаний уровней грунтовых вод Δh от соотношения K/μ

1 — галечники; 2 — известняки; 3 — изверженные породы; 4 — пески; 5 — суглинки



или весенне-осеннему периоду с тем, чтобы иметь возможность зафиксировать периоды предвесеннего минимума, весеннего максимума и летне-осеннего минимума. Установив таким образом характерные для данной климатической зоны экстремальные годовые значения уровней подземных вод и основные гидрогеологические параметры водоносного горизонта K и μ (K — коэффициент вертикальной фильтрации и μ — водоотдача пород), определяющие размеры амплитуды колебаний уровней подземных вод, можно подобрать скважину-аналог с длинным рядом наблюдений, располагающуюся в сходных гидрогеологических условиях и характеризующуюся сходным режимом подземных вод.

Установив по скважине-аналогу обеспеченность наблюдавшейся в данном году амплитуды весеннего подъема или летнего спада уровня грунтовых вод по графику, аналогичному показанному на рис. 11, определяют значения возможных амплитуд или уровней 1- или 99%-ной обеспеченности в искомой скважине, внося необходимые коррективы в амплитуды из-за различия глубин залегания грунтовых вод в скважине-аналоге и анализируемой скважине. Аналогично могут быть оценены и возможные многолетние колебания абсолютных значений уровней подземных вод. При наличии двух-трех лет наблюдений подобный анализ может быть выполнен с удовлетворительной достоверностью.

При отсутствии наблюдений за режимом подземных вод, но при известных параметрах водоносного пласта K/μ амплитуды колебаний уровней грунтовых вод могут быть оценены примерно по обобщенным графикам $\Delta h = fK/\mu$ (рис. 61), составленным

по опорной наблюдательной сети гидрогеологических станций. Необходимые корректуры в зависимости от глубин залегания грунтовых вод также могут быть примерно оценены по графикам, подобным изображенным на рис. 11. Однако такие прикидочные оценки могут быть рекомендованы лишь на стадиях перспективного планирования различных мероприятий.

Вероятностные прогнозы в будущем, возможно, найдут не менее широкое применение, чем временные, и поэтому для качественного их составления и теоретического обоснования необходимо накапливание длинных рядов наблюдений по опорной наблюдательной сети.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОГНОЗОВ И НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ СОСТАВЛЕНИЮ

Гидрогеологические прогнозы естественного режима грунтовых вод в массовых масштабах только начали составляться, и поэтому пока еще отсутствуют четко установленные критерии оценки их точности. В связи с этим в основу таковых нами взяты критерии, принятые в гидрологии [96], так как между гидрогеологическими и гидрологическими процессами имеется много общего. Некоторые из этих вопросов рассматривались также А. А. Коноплянцевым [57] и С. М. Семеновым [104].

Оценка качества прогнозов должна производиться с целью: а) оценки качества принятой методики прогноза и б) определения вероятных ошибок выдаваемых прогнозов, т. е. показа возможных отклонений (в процентах, в сантиметрах или других условных показателях) от прогнозируемой величины уровня грунтовых вод или дебита источника.

В связи с тем, что основные методы прогноза являются корреляционными, одним из основных критериев качества методики прогноза служат коэффициенты корреляции или корреляционные отношения, которые отражают тесноту выбранных прогнозных связей.

Величины коэффициентов корреляции парных или множественных связей, определяемые по формуле (27), (34) или (40), для различных прогнозов могут считаться удовлетворительными по-разному. Так, для сезонных прогнозов удовлетворительными мы принимаем коэффициенты корреляции выше 0,74, так как массовая обработка материалов показывает, что именно при таких коэффициентах корреляции выдерживаются остальные критерии качества методики прогноза. Для долгосрочных и сверхдолгосрочных многолетних прогнозов используются коэффициенты корреляции, равные 0,6 и даже 0,55, так как точность этих прогнозов не может быть аналогична точности сезонных прогнозов.

Сопоставление качества методов прогнозов по коэффициентам корреляции или корреляционным отношениям, с одной стороны, должно производиться с учетом того, что малые коэффициенты корреляции вовсе не означают отсутствие связи. Более того, в главах III и IV было показано, что взаимосвязи отдельных факторов с прогнозируемыми уровнями подземных вод, характеризовавшиеся низкими коэффициентами корреляции (0,3—0,4), в действительности показывают весьма значительную роль этих факторов. Учет последних необходим наряду с учетом дру-

гих факторов, связи с которыми характеризовались более высокими коэффициентами корреляции.

С другой стороны, следует иметь в виду, что высокие корреляционные отношения могут быть преувеличены из-за ограниченности рядов наблюдений. Считается, что корреляционные отношения не будут преувеличены, если $\frac{n-N}{N} \geq 20$, где n — число лет наблюдений, а N — число режимобразующих факторов, учитываемых в прогнозе.

При несоблюдении данного условия для получения сопоставимых значений корреляционные отношения корректируются по формуле

$$R_k = \sqrt{1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-N}}, \quad (90)$$

где R_k — скорректированное значение корреляционного отношения;

R — коэффициент множественной корреляции.

Значимость связи при небольшом объеме выборки (n менее 30) оценивается с помощью критерия Романовского μ :

$$\mu = |r| \sqrt{n-1} \geq 3. \quad (91)$$

При соблюдении данного неравенства оценка коэффициента корреляции считается существенной, значительно отличающейся от нуля.

Для более продолжительных выборок реальность связи устанавливается также по соотношению абсолютной величины коэффициентов корреляции или корреляционного отношения и его среднего квадратичного отклонения $|R|/\sigma_R$, где

$$\sigma_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (92)$$

Надежными могут считаться корреляционные отношения при $\mu \geq 3$, где

$$\mu = \frac{|R|}{\sigma_R} = \frac{|R| \sqrt{n-1}}{1 - R^2}. \quad (93)$$

Значения величин коэффициентов корреляции как парных, так и множественных связей могут также оцениваться по известным в математической статистике таблицам в зависимости от длины ряда и числа учитываемых факторов для любого заданного уровня обеспеченности. В приложении 2 приведена одна из таких таблиц, из которой, например, можно установить, что при 5%-ном уровне значимости, длине ряда в 10 лет и учете двух факторов реально значимыми могут быть лишь коэффициенты $R \geq 0,758$, а для четырех факторов — лишь $R \geq 0,898$.

Оценка качества прогноза только по коэффициентам корреляции и корреляционным отношениям недостаточна. Необходи-

мо также знать и размеры возможной ошибки прогноза $\pm S_y$, которая рассчитывается по уравнению (41). При этом критерием достоверности прогнозов служит допустимая ошибка $\Delta_{\text{доп}}$. Достоверными считаются те прогнозы, ошибки которых, рассчитанные по уравнению (41), меньше допустимой ошибки или равны ей, т. е. $S_y \leq \Delta_{\text{доп}}$. В качестве допустимой ошибки в гидрологии считают $\Delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_y$, где σ_y — среднеквадратичное отклонение прогнозируемого параметра режима, определяемое по уравнению (28).

Таким образом, прогнозы режима подземных вод выдаются в вероятностной форме, т. е. помимо математического ожидания (наиболее вероятного среднего) прогнозируемого уровня или расхода приводятся возможные отклонения от этого среднего $\pm S_y$.

Учитывая неизбежные допущения, обусловленные применением аппарата математической статистики для прогнозов режима подземных вод, основным наиболее объективным критерием качества прогноза считают сопоставление фактических и прогнозных значений уровней или расходов подземных вод.

Проверка достоверности (оправдываемости) прогнозов проводится двумя путями по зависимому и независимому фактическому материалу. Проверка по зависимому материалу, т. е. наблюдаемому на момент составления прогноза и учтенному в расчете прогностического уравнения, проводится путем сопоставления рассчитанных по данному уравнению уровней подземных вод за прошедший период с фактически наблюдавшимися уровнями. Сопоставление осуществляется как в виде графиков (рис. 62), так и в виде таблиц. Прогнозное уравнение считается удовлетворительным, если в 80% случаев отклонения расчетных значений уровней от фактических не превысили допустимой ошибки.

Проверка достоверности прогнозов по независимому материалу, т. е. отсутствующему на момент составления прогноза, проводится ежегодно (после составления прогноза) путем сопоставления прогнозных значений уровней с фактически установленными. Критерием достоверности этих прогнозов также служит сопоставление их результатов с допустимой ошибкой. Причины недостоверности прогнозов может быть много. Главными и наиболее часто встречаемыми из них являются:

а) неудовлетворительность составленного прогнозного уравнения, недостаточно полно отражающего условия формирования прогнозируемого элемента режима подземных вод;

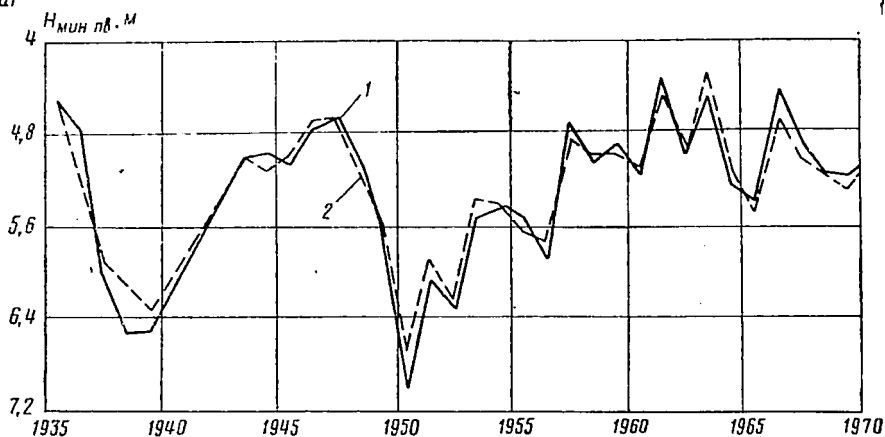
б) аномальность года по водности, не учтенная при составлении прогнозного уравнения или не выявленная на момент составления прогноза в использованных для расчетов факторах;

в) искусственные воздействия человека на режим подземных вод в районе анализируемой скважины (вывоз или, наоборот, сброс снега, производство откачек, строительных работ и т. п.).

Неудовлетворительность прогнозного уравнения, приводящая к недостаточно тесным корреляционным связям, может быть вызвана следующими причинами.

1. Заблаговременность прогноза слишком велика, так как к моменту его составления еще не выявились основные факторы,

а)



б) $H_{\max. в. м}$

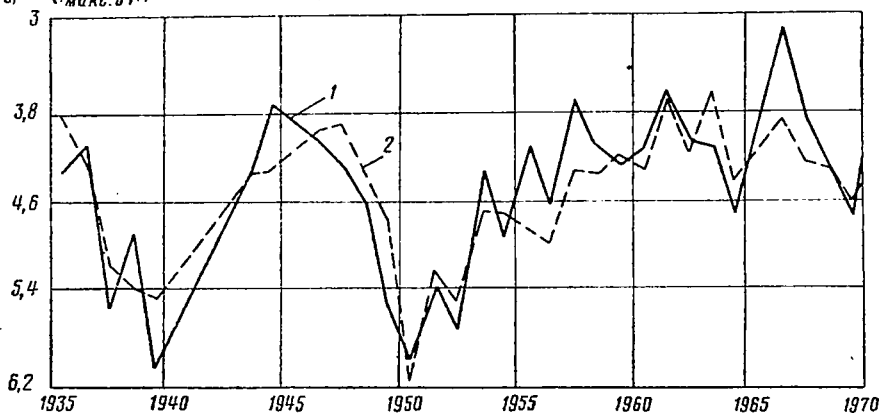


Рис. 62. График фактических 1 и расчетных 2 значений минимальных предвесенних (а) и максимальных весенних (б) уровней подземных вод по скважине 6, Москва (расчет проведен Е. И. Дачаевой)

определяющие прогнозируемый параметр режима подземных вод.

2. Метеорологический пост, по которому взяты метеорологические факторы для прогноза, удален слишком далеко или расположен в других ландшафтных условиях, не типичных для

района размещения анализируемой наблюдательной скважины или источника.

3. Учтены не все факторы, участвующие в формировании прогнозируемого уровня.

4. Законы распределения прогнозируемого параметра и факторов резко различны, и связи между ними нелинейны, что не нашло отражения в расчетном аппарате.

5. Ряды наблюдений слишком коротки для установления устойчивых связей.

6. Анализируемый ряд наблюдений не является однородным по фазе и генезису (нечетко выделены минимальные или максимальные уровни), имеются технические ошибки в замерах.

7. Взаимосвязь использованных для прогнозов факторов тесна между собой.

Вносит осложнения в расчеты и внутренняя взаимосвязь рядов, а также воздействие границ пласта на формирование экстраемальных годовых значений уровней подземных вод.

В связи с этим в каждом конкретном случае неудовлетворительные по показателям уравнения и неоправдавшиеся прогнозы должны быть тщательно проанализированы для установления причин, их обуславливающих, и оценки эффективности методики прогноза. Для такого анализа можно использовать графики (аналогичные изображенным на рис. 61), по которым хорошо вскрываются систематические ошибки, возникающие из-за неправильного ввода в расчетные уравнения фактического материала.

В качестве числовой оценки эффективности методов прогнозов, используемой для их сравнения, в гидрологии принимается также отношение S_y/σ_y , где S_y — средняя квадратичная ошибка проверочных прогнозов, а σ_y — среднее квадратичное отклонение предсказываемой переменной от нормы. Чем меньше это отношение, тем точнее методика прогноза. При $S_y/\sigma_y=0$ имеется функциональная связь, а при $S_y/\sigma_y=1$ зависимость между функцией и аргументом отсутствует.

Четкой связи между отношением S/σ и коэффициентом корреляции нет. Можно лишь отметить следующие характерные их соотношения [86]:

r	0,98	0,92	0,87	0,8	0,72	0,6	0,45
$\frac{S}{\sigma}$	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Прогнозное уравнение считается приемлемым, если $S/\sigma \leq 0,7$ при $n \leq 15$; $S/\sigma \leq 0,75$ при $15 < n < 25$; $S/\sigma \leq 0,8$ при $n \geq 25$.

К хорошей методике прогнозов при $n \geq 25$ относят такую, для которой $S/\sigma \leq 0,5$ и $r \geq 0,87$, к удовлетворительной — $S/\sigma = 0,51 \div 0,81$ и $r = 0,6 \div 0,86$. При $n \leq 15$ приведенные значения должны быть уменьшены на 0,1, а при $15 < n < 25$ — на 0,05.

Влияние заблаговременности прогнозов на их точность оце-

нивается по графикам, аналогичным изображенным на рис. 17 и 34. Линейность и теснота связей с факторами оцениваются или графическим путем (см. рис. 19—21 и др.), или путем составления синхронности кросскорреляционных и дисперсионных функций, как это предлагается А. А. Плетневым.

Точность прогноза в зависимости от практической надобности может задаваться различной. Но для большинства случаев, в том числе для составления региональных прогнозов общего типа, видимо, можно принять точность прогноза с ошибкой, не превышающей 20% многолетних колебаний прогнозируемой величины. Следует иметь в виду, что составление прогнозов режима подземных вод, основанных на прогнозных значениях режимобразующих факторов, приводит к сложению ошибок каждого из прогнозов и увеличению суммарной ошибки результирующего прогноза. Такими прогнозами являются многолетние прогнозы режима подземных вод по связям с гелиогеофизическими факторами. Ранее нами были рассмотрены прогнозы среднегодовых и минимальных осенних уровней по прогнозным минимальным предвесенним и максимальным весенним уровням. Однако, учитывая тот факт, что складываются ошибки с различными знаками, результирующие прогнозы характеризуются довольно высокой достоверностью. Это подтверждается опытом составления последних прогнозов.

Одним из основных приемов проверки достоверности прогностических уравнений является оценка знаков его членов, которая проводится либо по физическому смыслу, либо по предварительно составленным графикам или расчетам связи прогнозируемого параметра с каждым из определяющих его факторов. Так, связи прогнозируемых уровней с предшествующими им уровнями всегда положительны, с атмосферными осадками — отрицательны (если уровни отражают глубины залегания подземных вод от поверхности земли), с летними температурами и дефицитом влажности воздуха всегда положительны, с оттепелями — отрицательны, а с зимними температурами — как отрицательны, так и положительны с преобладанием отрицательных.

Существенным недостатком статистических критериев точности прогноза является их усредненность для всей выборки. Связано это с тем, что статистический аппарат оценки ошибок разрабатывался для случайных процессов. Рассмотренные же примеры прогнозов показывают, что колебания уровней являются далеко не случайными и наблюдающаяся дисперсия точек также имеет весьма закономерные черты. Так, например, во всех прогнозах, в которых используются уровни грунтовых вод или мощности зоны аэрации, разброс точек уменьшается при увеличении мощности зоны аэрации, и наоборот. Чаще всего разброс точек имеет клиновидный характер (рис. 63). Отсюда само собой разумеется, что точность прогнозов, проводимых даже одним и тем

же методом в различные по водности годы, т. е. на разных частях графика, может существенно различаться. Поэтому, пользуясь графическим методом прогноза, можно не только дать прогноз уровня грунтовых вод, но и по разбросу точек в соответствующей части графика определить возможную ошибку прогноза, установив пределы разброса точек $\pm S_y$ в данном месте графика в сантиметрах (как это показано пунктирными линиями на графике рис. 63). Рассчитав затем процент полученной ошибки от величины прогнозируемого элемента, т. е. от максимальной его амплитуды, можно сделать вывод о качестве метода прогноза и самого прогноза. Такой принцип оценки качества прогноза можно применять как для парной, так и для множественной корреляции. В последнем случае отклонения точек отсчитываются от соответствующих по величине изолиний, разбивающих общую совокупность эмпирических точек.

Подобный генетический подход к оценке точности прогнозов нам представляется более правильным, чем формальный статистический. Однако при составлении прогнозов методом множественной корреляции с использованием большого числа факторов, когда все расчеты проводятся аналитически на ЭВМ, единственно возможными критериями оценки качества прогнозов остаются пока чисто статистические.

Точность прогнозов, как видно из изложенного ранее, зависит также и от длины ряда наблюдений, и поэтому все критерии численной оценки качества прогнозов R , S , S/σ и другие, прямо зависящие от длины ряда n , носят в известной мере условный характер. При большом числе точек их разброс может быть очень большим, а следовательно, точность предсказания при одном и том же методе прогноза может быть значительно ниже. Возможный разброс точек на графиках или возможные ошибки при аналитических расчетах могут быть оценены определением доверительных пределов или интервалов рассматриваемой совокупности точек.

Таким образом, качество прогнозов должно оцениваться по комплексу критериев, среди которых для наиболее точных сезонных и краткосрочных прогнозов могут быть приняты основными следующие: $R \geq 0,74$, $\mu \geq 3$, $S/\sigma \leq 0,674$. Опыт составления прогнозов по территории РСФСР показывает, что в тех случаях, когда расчетные уравнения отвечают данным требованиям, достоверность прогнозов хорошая. Наиболее рациональной последовательностью анализа материалов для выявления оп-

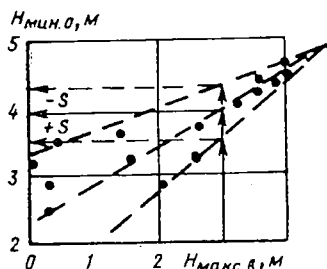


Рис. 63. График зависимости характера разброса точек от глубины залегания уровня грунтовых вод

тимальных прогностических зависимостей является следующая.

1. Расчеты парных корреляционных связей прогнозируемого элемента режима подземных вод с несколькими факторами, вероятность воздействия которых на прогнозируемый элемент генетически обоснована, и сопоставительный анализ коэффициентов корреляции парных связей и возможных ошибок прогноза при использовании только уравнений парной корреляции.

2. Выбор наиболее эффективных и невзаимосвязанных между собой факторов (по величинам коэффициентов корреляции с учетом таблицы приложения 2, обычно с $r > 0,3 \div 0,4$) и расчет уравнений множественной корреляции.

В тех случаях, когда имеется возможность рассчитывать прогнозы на ЭВМ или достаточно оперативная связь с ЭВМ, расчет коэффициентов уравнения и соответствующих им корреляционных отношений R и ошибки S_y лучше всего производить с последовательным наращиванием числа факторов, начиная с парной корреляции. Сопоставление роста корреляционных отношений и уменьшения размеров ошибки в зависимости от увеличения числа воздействующих факторов позволяет выбрать оптимальное их число и своевременно прекратить дальнейшие расчеты.

3. Анализ достоверности прогнозов и при несоответствии качества прогнозов указанным ранее требованиям усиление, тесноты прогностических связей. Оно может быть достигнуто, как правило, двумя путями: а) выбором новых или дополнительных факторов, определяющих режим подземных вод; б) уменьшением заблаговременности прогнозов, что позволяет более полно учесть степень воздействия основных режимобразующих факторов на режим подземных вод.

Метеорологические факторы должны подбираться по ближайшим постам гидрометеослужбы, расположенным в одинаковых природных условиях с анализируемыми скважинами, т. е. примерно на одних и тех же гипсометрических высотах (что особенно важно, так как количество осадков и средние температуры в значительной степени зависят от высоты местности), а также в одинаковых ландшафтных условиях (по приуроченности к крупным водным бассейнам и одинаковой залесенности территории).

Массовый анализ парных корреляционных связей основных прогнозируемых параметров режима подземных вод (минимальных, максимальных и среднегодовых уровней) с определяющими их факторами показал возможность аппроксимации этих связей в большинстве случаев линейными зависимостями. Лишь связи с температурами зимнего периода нередко имеют тенденции к нелинейным связям, но значение этого фактора так мало, что его учет не влияет на показатели качества использованных для прогнозов уравнений. Данный фактор следует учитывать не

прямо, а в виде какой-то его функции, связанной с прогнозируемым параметром линейно (например, $\lg \Sigma t$).

Проверка применимости метода множественной корреляции, проведенная нами совместно с Н. В. Балаевой, для прогнозов режима подземных вод по критерию нормальности распределения ошибок расчета подтвердила соблюдение этого требования.

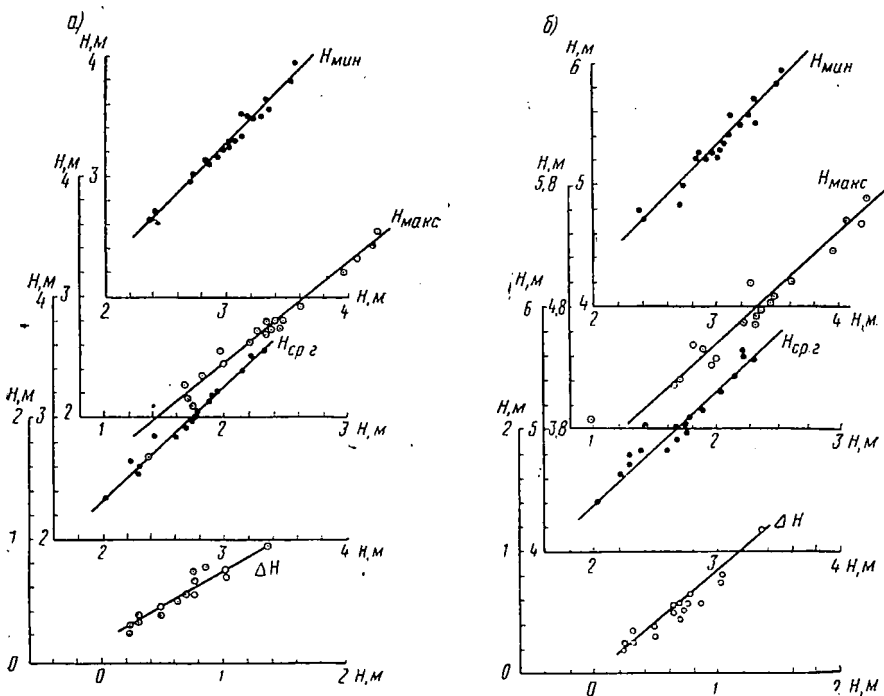


Рис. 64. Графики синхронности основных характеристик режима уровней грунтовых вод

а — по скважинам 26 (ось абсцисс) и 27 (ось ординат); б — по скважинам 26 (ось абсцисс) и 24 (ось ординат)

Учитывая трудоемкость составления прогнозов режима подземных вод, их следует производить лишь для наиболее типичных скважин. Для выбора репрезентативных скважин в каждом гидрогеологическом районе, выделенном при районировании территории по условиям формирования режима грунтовых вод, должна быть установлена синхронность режима подземных вод в различных скважинах. Для этого между всеми скважинами попарно должна быть предварительно рассчитана парная корреляционная связь. Анализ синхронности следует производить по всем основным прогнозируемым элементам режима грунтовых вод, т. е. между минимальными, максимальными и среднегодовыми уровнями (рис. 64). Выделив таким путем в пределах

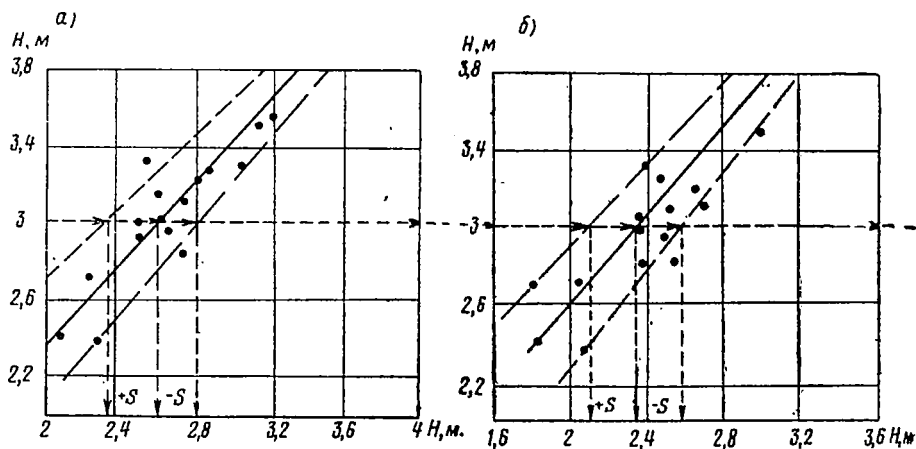


Рис. 65. Графики синхронности минимальных предвесенних уровней грунтовых соответственно на а, б, в и г

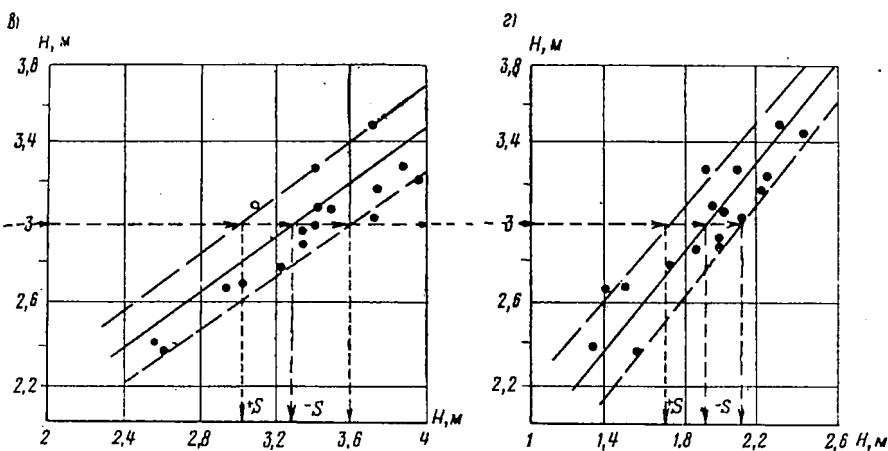
каждого района группы скважин, характеризующихся синхронными изменениями колебаний уровней подземных вод, можно выбрать среди них одну опорную скважину с наиболее длинным рядом наблюдений, по которой и следует проводить рекомендованный ранее анализ закономерностей режима подземных вод для выбора по возможности наиболее простого, но обеспечивающего достаточную достоверность метода прогноза. Для установления степени синхронности режима подземных вод достаточны и ряды наблюдений продолжительностью 10—12 лет.

Данные прогноза (минимальные, максимальные и среднегодовые уровни и др.), полученные по опорной — прогнозной — скважине, трансформируют на синхронные с ней рядовые скважины, используя установленные корреляционные связи между соответствующими прогнозируемыми элементами режима грунтовых вод в этих скважинах. Для картирования результатов прогноза режима подземных вод и выдачи информации о нем заинтересованные организации должны использовать уже все скважины.

Форма экстраполяции результатов прогнозов, полученных по опорным скважинам, на скважины-аналоги может быть различной.

1. По графикам парной корреляции, составленным отдельно для каждой пары скважин, аналогичным изображенным на рис. 65.

2. По совмещенным графикам попарно скоррелированных скважин с одной опорной скважиной. Получив данные о прогнозе соответствующего элемента режима грунтовых вод в опорной скважине, можно (см. пунктирные стрелки на рис. 65) ус-



вод по скважине 26 (ось ординат) и скважинам 22, 23, 19 и 20 (ось абсцисс)

тановить и прогнозные величины этого элемента в других скважинах и возможную ошибку этих прогнозов.

3. По трансформированным разномасштабным графикам синхронизации. Для этой цели параллельно со шкалой прогнозного графика, соответствующей масштабу изменений величин прогнозируемого элемента режима грунтовых вод, наносится серия шкал соответствующих изменений этого элемента в других скважинах-аналогах. Соотношение масштабов шкал устанавливается по графикам синхронизации [50].

Прогнозы максимальных весенних и среднегодовых уровней грунтовых вод по некоторым скважинам, характеризующимся повышенной динамичностью режима во времени, как указывалось ранее, представляют значительные трудности. Заблаговременность таких прогнозов бывает малой. Однако, учитывая наличие примерно равной увлажненности, или равной водности, года для сравнительно больших территорий, можно установить синхронность между режимом уровней подземных вод в скважинах, где не достигается необходимая достоверность прогнозов, и режимом уровней в скважинах, где такие прогнозы возможны. Составив прогноз для последних скважин и определив по графикам обеспеченности водность года для данной территории, можно также по графикам обеспеченности первых скважин определить прогнозные значения уровней подземных вод, соответствующих той же водности.

Описанные ранее методы прогнозов и результаты апробации прогностических связей с различными режимобразующими факторами были рассмотрены с учетом существующей практики составления прогнозов режима подземных вод дважды в год:

в январе-феврале и июне-июле. Опыт составления прогнозов режима подземных вод по территории РСФСР показал, что сроки составления прогнозов, оптимальных по заблаговременности и достоверности, должны быть различными для разных климатических зон. Поэтому, выдавая, например, в январе-феврале достоверные прогнозы весеннего максимума по одним районам (центральным и южным районам европейской части СССР и Западной Сибири), можно составить лишь весьма приближенные прогнозы максимального годового уровня для других районов (севера европейской территории страны, Восточной Сибири, Дальнего Востока). Следовательно, сроки составления достоверных и приближенных прогнозов должны быть дифференцированы для различных районов исходя из конкретных условий формирования режима подземных вод в этих районах.

КАРТИРОВАНИЕ ПРОГНОЗОВ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Из рассмотренного в предыдущих главах видно, что подавляющая часть составляемых в настоящее время прогнозов режима подземных вод относится к категории точечных, т. е. расчеты прогнозов производятся отдельно для каждой скважины, колодца или источника. При решении же различных практических задач требуется знать режим подземных вод на больших территориях, несмотря на то, что наблюдения за этим режимом на данных территориях могут не вестись. Поэтому одной из важнейших проблем, связанных с прогнозами режима подземных вод, является проблема их картирования, т. е. экстраполяции результатов прогнозов по площади.

Трудности картирования режима подземных вод вообще и их прогнозов в частности связаны прежде всего с большой изменчивостью основных характеристик режима подземных вод в пространстве [54]. Среди условий, определяющих прежде всего разнообразие амплитуд колебаний уровней подземных вод, темпы их подъема и спада, сроки появления экстремальных значений уровней подземных вод и т. п., можно отметить следующие:

глубины залегания подземных вод от поверхности земли;

литологический состав водовмещающих пород (их фильтрационные свойства — коэффициенты фильтрации, водоотдача и мощность);

положение участка наблюдений за режимом подземных вод относительно рельефа и особенно различных элементов микро-рельефа;

условия взаимосвязи подземных вод с поверхностными водами, водотоками, заболоченными или переувлажненными территориями;

интенсивность залесенности и сельскохозяйственной освоенности земель;

интенсивность хозяйственной деятельности человека.

Все эти условия, воздействуя на подземные воды, приводят к тому, что даже на сравнительно ограниченных по площади территориях характеристики режима подземных вод могут резко отличаться, так как перечисленные выше условия изменяются от участка к участку часто довольно существенно, что приводит к изменению интенсивности инфильтрации атмосферных осадков и их расходования на подземный сток и испарение, а также к изменению скоростей перераспределения напоров в подземных водах от участков сосредоточенной инфильтрации или питающих границ пластов и т. д.

Учитывая отмеченное, можно определить два основных на-

правления в картировании прогнозов режима подземных вод: 1) по абсолютным значениям прогнозируемых элементов режима подземных вод; 2) по относительным показателям прогнозируемых характеристик режима подземных вод.

Картирование прогнозов режима подземных вод по первому направлению возможно лишь для сравнительно локальных территорий, не отличающихся сложностью гидрогеологических условий, при наличии достаточно разветвленной сети наблюдательных скважин.

В основу такого картирования должно быть положено районирование территории по условиям формирования режима подземных вод, принципы которого рассматривались нами ранее совместно с А. А. Коноплянцевым [53, 55] и на котором поэтому мы здесь не останавливаемся. Имея наблюдательную сеть в пределах каждого участка, характеризующегося определенным режимом, можно экстраполировать данные прогноза режима подземных вод по такой опорной сети на всю площадь участка. Для учета разнообразия глубин залегания грунтовых вод, неизбежного для любого района, и внесения поправок в прогнозные значения уровней, полученные по опорной скважине при их экстраполяции по площади, необходимо установить зависимость амплитуд колебаний уровней подземных вод от мощности зоны аэрации.

Картирование прогнозов режима подземных вод для больших территорий, характеризующихся разнообразными природными (климатическими и гидрогеологическими) условиями, возможно лишь в относительных показателях: в отклонениях прогнозируемых элементов от их нормы в долях единицы или в процентах [102], а также в обеспеченностях вероятностей прогнозируемых элементов режима подземных вод [48, 50]. В этом случае все разнообразие амплитуд колебаний и глубин залегания подземных вод в пределах какого-либо участка сводится к близким по величине относительным изменениям прогнозируемых уровней или дебитов подземных вод, соответствующим водности данного года. Другими словами, амплитуды колебаний уровней грунтовых вод или глубины их залегания на какой-то территории могут быть в течение прогнозируемого периода различными, но процентное их отклонение от многолетних норм будет одинаковым, зависящим от характерных для данного периода условий питания подземных вод. Последнее обстоятельство определяет неэффективность данного способа картирования для локальных территорий, особенности питания подземных вод в пределах которых идентичны, и, следовательно, режим подземных вод характеризуется синхронными колебаниями, хотя и различными по абсолютной величине.

Так же, как и все остальные карты режима подземных вод [48], карты прогнозов режима могут быть синтетическими, аналитическими и комплексными.

Синтетические карты прогнозов могут составляться как для крупных, так и для небольших территорий. На таких картах отражаются обобщенные синтезированные представления об основных тенденциях в режиме подземных вод, главным образом в многолетнем разрезе. В основе таких карт лежит гидрогеологическое районирование территории по условиям формирования режима подземных вод. Предсказываемые тенденции в многолетнем режиме подземных вод для отдельных территорий могут быть отражены в виде текста, таблиц или характерных графиков. На таких картах, помимо естественного режима подземных вод, могут быть указаны тенденции к развитию в отдельных районах нарушенного режима подземных вод. Заблаговременность прогнозов, отражаемых на синтетических картах, может быть любой — от нескольких месяцев до десятков лет, в зависимости от задач, для которых подобные карты составляются.

Под аналитическими картами прогнозов режима подземных вод понимаются карты, дающие представление об изменениях по площади какого-то одного картируемого элемента режима. В соответствии с этим к числу аналитических карт могут быть отнесены следующие различные карты прогнозов отдельных элементов режима подземных вод.

1. Карты прогнозных глубин залегания грунтовых вод на определенную дату, месяц или год в зависимости от их целевого назначения, а также карты прогнозных экстремальных годовых (минимальных предвесенних, максимальных весенних, минимальных осенних) и среднегодовых значений уровней и дебитов подземных вод как текущего года, так и любого другого из последующих лет. Такие карты составляются (как уже указывалось) либо по абсолютным, либо по относительным значениям глубин залегания подземных вод. При этом среди карт относительного положения уровней подземных вод могут быть выделены следующие:

а) карты отклонения (в процентах) картируемого прогнозного уровня от его среднееголетней нормы. Расчет таких отклонений при нормальном законе распределения осуществляется по формуле

$$H_i (\%) = \frac{(\bar{H} - H_i) 200\%}{\Delta H_{\text{мн}}}, \quad (94)$$

а при каком-либо асимметричном законе для случаев, когда картируемый уровень подземных вод располагается выше или ниже его среднееголетней нормы, — соответственно по формулам:

$$H_i (\%) = \frac{(\bar{H} - H_i) 100\%}{(\bar{H} - H_{1\%})}; \quad (95)$$

$$H_i (\%) = \frac{(\bar{H} - H_i) 100\%}{(H_{99\%} - \bar{H})}, \quad (96)$$

где \bar{H} — среднемноголетняя норма картируемого уровня подземных вод (минимального, максимального или среднегодового), равная 50%-ной обеспеченности вероятности данного уровня и определяемая непосредственно по графикам обеспеченности;

H_i — картируемый уровень подземных вод (конкретного года);

$\Delta H_{\text{мин}}$ — многолетняя амплитуда колебаний уровня подземных вод, принимаемая как разность между уровнями 1- и 99%-ной обеспеченности;

$H_{1\%}, H_{99\%}$ — значения уровней подземных вод соответственно 1- и 99%-ной обеспеченности, определяемые также по графикам обеспеченности либо рассчитываемые методом доверительных интервалов при нормальном законе распределения.

В данных уравнениях возможные амплитуды отклонений уровня от нормы вверх или вниз принимаются соответственно за $\pm 100\%$;

б) карты обеспеченности прогнозных уровней подземных вод по территории. Такие карты могут строиться и без учета времени, как карты возможного положения уровней подземных вод соответствующей обеспеченности (например, 1, 3, 5, 50, 95, 97 и 99%-ной). Для этой цели по каждой из скважин, используемых при картировании, строится график обеспеченности соответствующих уровней (по среднегодовым или экстремальным значениям), а затем с него снимаются значения этих уровней. Для локальных участков, имеющих большое практическое значение и достаточное число наблюдательных скважин, могут быть составлены серии карт глубин залегания подземных вод различной обеспеченности (с необходимыми интервалами).

Для больших территорий, имеющих четко выраженную асинхронность режима подземных вод, такие карты составляются в изолиниях обеспеченности уровней подземных вод (см. рис. 56).

Карты указанных выше типов (пп. «а» и «б») позволяют картировать прогнозы режима подземных вод без существующих искажений, которые могут возникнуть при обобщении результатов статистической оценки уровней подземных вод, проведенной по различным по длине рядам фактических наблюдений и с различными типами распределения;

в) карты нормированных значений уровня либо в долях многолетней амплитуды колебаний уровней ($0 < \lambda < 1$) [102], либо в модульных коэффициентах $K = H_i/H$:

$$\lambda = \frac{h_i - h_{\text{мин}}}{A}, \quad (97)$$

где λ — коэффициент относительного положения уровня;
 h_i — прогнозный уровень текущего года;
 $h_{\text{мин}}$ — минимальный за период наблюдений уровень;
 A — амплитуда многолетних колебаний уровня.

Использование при этом способе картирования данных, характеризующихся асимметричными законами распределения прогнозных элементов режима подземных вод, может привести иногда к существенному искажению картируемых показателей. Это связано с тем, что среднеарифметические значения уровней, характеризующие среднеемноголетнюю их норму, при асимметричных законах распределения не совпадают с уровнями 50%-ной обеспеченности (или $\lambda=0,5$), отклоняясь, особенно по максимальным уровням, в ту или иную сторону на 30—50% многолетней амплитуды.

Наиболее достоверным способом картирования относительных показателей уровней подземных вод, обеспечивающих полную их сопоставимость независимо от закона распределения их вероятностей, является картирование обеспеченностей уровней.

2. Карты прогнозных амплитуд колебаний уровней подземных вод, характеризующие изменения их запасов в годовом или многолетнем разрезе и отражающие величину инфильтрационного питания подземных вод.

Для расчета максимально возможной многолетней амплитуды колебаний уровня подземных вод $\Delta H_{\text{ми}}$ предварительно необходимо убедиться, что имеющийся ряд наблюдений охватывает и маловодные, и многоводные годы (обычно длина ряда не менее 10 лет). Водности лет могут быть сопоставлены на основании анализа длинных рядов наблюдений за атмосферными осадками и за поверхностными водами.

3. Карты времени наступления экстремальных значений уровней грунтовых вод по сезонам года и в многолетнем аспекте (предвесеннего минимума или начала весеннего подъема, максимальных весенних, летних или зимних, многолетних максимальных или минимальных уровней подземных вод как среднегодовых значений, так и экстремальных годовых и т. д.).

Аналогичные карты могут также составляться и для отражения химического состава и температуры подземных вод.

Под комплексными понимаются такие карты, на которых одновременно отражается несколько различных прогнозируемых характеристик режима подземных вод (от двух и более). К ним могут быть отнесены карты баланса подземных вод с выделением на них основных элементов баланса: инфильтрационного питания (цветом), испарения (штриховкой) и подземного стока (изолиниями).

Комплексными могут быть и некоторые другие аналитические карты, например карты минимальных глубин залегания грунтовых вод, амплитуд колебаний уровня, режима уровня и химического состава грунтовых вод.

В зарамочном оформлении карт прогнозов в сопровождающем их тексте целесообразно приводить основные графики связи, с одной стороны, раскрывающие характер зависимостей прогнозируемого уровня подземных вод от определяющих его факторов, а с другой, иллюстрирующие использованные методы, многолетние графики колебаний уровней подземных вод с экстраполяцией их на прогнозируемые сроки и расчетные уравнения прогнозов по наиболее характерным опорным точкам. Полезным добавлением к картам и тексту прогнозов служат графики зависимостей амплитуд колебаний уровней подземных вод от глубины их залегания, литологического состава водовмещающих пород, а также удаленности от реки (в процентах отклонений их от нормы для лет различной водности), помогающие экстраполировать данные прогноза режима подземных вод по площади.

В сопровождающем прогнозы тексте целесообразно также давать обобщенную региональную характеристику режима подземных вод на прогнозный период с оценкой положения прогнозных уровней в многолетнем разрезе и в сравнении с предшествовавшим периодом, а также с характеристикой наметившихся тенденций (к спаду или подъему) уровней в будущем.

Одним из наиболее сложных вопросов картирования прогнозов режима подземных вод является обоснование экстраполяции полученных точечных прогнозных данных по территории. Картировать прогнозы режима подземных вод можно различными способами:

а) обычным интерполированием и экстраполированием по площади картируемых значений элементов режима подземных вод по имеющимся наблюдательным пунктам;

б) с помощью электронно-вычислительной техники (аналоговых и цифровых моделирующих машин), позволяющей более полно учесть влияние на режим подземных вод литологического состава водовмещающих пород, залесенности территорий, степени гидравлической связи водоносных горизонтов с реками, глубин залегания подземных вод и других факторов;

в) на основе увязки режима подземных вод с определяющими его метеорологическими факторами с последующим преимущественно мелкомасштабным картированием режима подземных вод или его прогнозов на картах распределения по площади соответствующих аномальных значений метеорологических факторов (атмосферных осадков, температуры воздуха, дефицита влажности воздуха и др.).

Основная сложность картирования заключается в том, что не на всей изучаемой территории имеются наблюдательные пункты. Существующая наблюдательная сеть с длинными рядами наблюдений развита весьма неравномерно и сосредоточена главным образом в районах крупных городов и промышленно ос-

военных территорий. На значительных площадях вообще нет данных по режиму подземных вод. В связи с этим картирование режима подземных вод в целом и прогнозов режима подземных вод в частности сопряжено с трудностями распространения данных режима по площади.

Другой сложностью картирования является неравномерность характеристик режима подземных вод, выраженных даже в относительных показателях, например в обеспеченностях уровней. Иногда даже в рядом расположенных скважинах обеспеченность прогнозных значений уровней бывает резко различной. Причины такого явления могут быть как естественными (сдувание снега ветром с одних мест на другие, неравномерность выпадения осадков по площади и др.), так и искусственными. Поэтому в каждом районе целесообразно иметь несколько опорных скважин или источников, по которым составляются прогнозы режима подземных вод, с тем чтобы иметь возможность определить истинное значение водности года для данного района.

Учитывая довольно тесные корреляционные связи между режимом подземных вод и атмосферными осадками, главным образом зимними, определяющими максимальные весенние, а следовательно, и среднегодовые, и минимальные осенние уровни подземных вод, для картирования прогнозов режима подземных вод целесообразно использовать карты аномалий атмосферных осадков, составляемые ГУГМС по большому числу сравнительно равномерно расположенных по площади постов гидрометеослужбы.

Для того чтобы иметь достаточно данных о режиме подземных вод и его прогнозах, для картирования режима подземных вод необходимо использовать по возможности все опорные наблюдательные скважины и источники, находящиеся в ведении гидрогеологических станций или специально созданные при съемочных или других гидрогеологических работах. Для этих целей должны широко использоваться описанные ранее приемы удлинения рядов наблюдений и установления синхронности в режиме подземных вод отдельных скважин.

Для определения конкретных глубин залегания грунтовых вод по имеющейся карте прогнозных уровней необходимо с графиков обеспеченности опорной скважины, расположенной в гидрогеологических условиях, аналогичных условиям анализируемого участка, снять значение уровня соответствующей обеспеченности, указанной на карте, и внести корректуру в уровни по графикам, аналогичным изображенным на рис. 11, в зависимости от различий в средних глубинах залегания грунтовых вод на анализируемом участке и в скважине-аналоге.

Суммируя все рассмотренные вопросы, связанные с прогнозами режима подземных вод, можно сделать ряд выводов.

1. Прогнозы режима подземных вод имеют большое практическое значение, и их широкое внедрение в жизнь будет способствовать более планомерному и рациональному ведению народного хозяйства, использованию ресурсов подземных вод и позволит предусмотреть более эффективные меры по борьбе с подземными водами. Кроме того, исследования, проводимые при составлении прогнозов режима подземных вод, представляют значительный научный интерес, так как вскрывают роль различных факторов в формировании режима подземных вод, а следовательно, способствуют познанию процессов и условий формирования подземных вод.

2. Наличие вскрытых ранее взаимосвязей режима подземных вод с различными метеорологическими факторами, а также охарактеризованных особенностей инерционности подземных вод позволяет составлять достаточно точные для практических целей прогнозы режима подземных вод. Достоверность таких прогнозов, а также методы их составления зависят от заблаговременности прогнозов. В книге показана принципиальная возможность составления различных типов прогнозов в соответствии с предложенной классификационной схемой прогнозов режима подземных вод.

3. Рассмотренные закономерности режима подземных вод показывают, что наблюдаемые в подземных водах изменения, как качественные, так и количественные, не являются случайными, а имеют совершенно определенные причинно-следственные связи. Сложность анализа последних определяется интерференцией суммарного воздействия режимообразующих факторов, эффект которых проявляется неодинаково в различных гидрогеологических условиях. В результате основными методами анализа и прогноза режима подземных вод становятся такие, которые позволяют учитывать многофакторность процесса, помогают расчленять суммарный эффект на его составляющие и анализировать наблюдавшиеся изменения в режиме подземных вод в комплексе с учетом его предшествовавшей истории. Оптимальное количество факторов и их состав для прогнозов зависят, как показано в работе, от гидрогеологических и климатических условий района.

4. Рассмотренные связи режима подземных вод с различными факторами указывают на его тесную зависимость от режима гидросферы и атмосферы, а следовательно, и на перспективность анализа и составления сверхдолгосрочных прогнозов режима подземных вод по его корреляции с гелиогеофизическими факторами. Сложность и многофакторность таких связей обяза-

вают еще шире внедрять в практику гидрогеологических исследований вычислительную технику и использовать аппарат математической статистики.

5: Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на углубленное изучение процессов, формирующих режим и баланс подземных вод, на разработку на этой основе объективных критериев, позволяющих экстраполировать результаты наблюдений и прогнозы режима подземных вод по площади, на усовершенствование генетических и вероятностно-статистических методов прогнозов режима подземных вод, на повышение заблаговременности и достоверности прогнозов режима подземных вод, на анализ региональной синхронности и асинхронности режима подземных вод, а также на рассмотрение практических аспектов результатов наблюдений за режимом подземных вод и его прогнозов для внедрения в народное хозяйство. В частности, разработка новых и усовершенствование уже существующих и охарактеризованных выше методов прогнозов должна осуществляться в следующих направлениях:

а) усовершенствование и апробация новых вероятностно-статистических методов прогнозов режима подземных вод, а также методов прогнозов, основанных на учете закономерностей гармонических колебаний их уровней или дебитов за предшествующий период;

б) усовершенствование методов множественной корреляции для наиболее широко распространенных в природе нелинейных связей режима грунтовых вод с определяющими его факторами;

в) усовершенствование различных методов прогнозов с целью повышения степени их заблаговременности и достоверности и в первую очередь воднобалансовых методов прогноза режима грунтовых вод, позволяющих учесть происходящие изменения в условиях формирования режима подземных вод;

г) апробация методов прогнозов режима подземных вод в региональном плане, проведение детального районирования территории СССР в зависимости от эффективности воздействия различных режимообразующих факторов на режим подземных вод и выявление наиболее достоверных методов прогнозов режима грунтовых вод. Выявление методами дисперсионного анализа и весовых функций доли участия каждого фактора в формировании режима подземных вод;

д) увеличение числа прогнозируемых элементов режима подземных вод, т. е. разработка методов прогнозов режима межпластовых напорных и безнапорных вод, прогнозов гидрохимического и температурного режимов подземных вод, а также баланса подземных вод и подземного стока;

е) усовершенствование методов ультрадолгосрочных прогнозов режима подземных вод на гелиогеофизической основе. Повышение достоверности вскрытия периодичностей в режиме подземных вод различными методами периодограммного и спек-

трального анализа многолетних колебаний различных элементов режима подземных вод;

ж) разработка и усовершенствование методов картирования прогнозов режима подземных вод как мелко-, так и крупномасштабного;

з) разработка методов одновременного учета естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью человека изменений в режиме подземных вод.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что прогнозы режима подземных вод в целом и естественного режима подземных вод в частности могут и должны стать, так же как и гидрометеорологические прогнозы, неотъемлемой частью при перспективном планировании в сельском и лесном хозяйстве, городском, дорожном и гидротехническом строительстве, мелиорации земель, водоснабжении и т. д.

Квантили χ_p^2/γ распределения (по Диксону и Мессе).

Число степеней свободы	χ_p^2/γ в процентах обеспеченности		
	1	5	10
2	0,010	0,052	0,106
3	0,038	0,117	0,195
4	0,074	0,178	0,266
5	0,111	0,229	0,322
6	0,145	0,272	0,367
7	0,177	0,310	0,405
8	0,206	0,342	0,436
9	0,232	0,369	0,463
10	0,256	0,394	0,487
11	0,278	0,416	0,507
12	0,298	0,436	0,525
13	0,316	0,453	0,542
14	0,333	0,469	0,556
15	0,349	0,484	0,570
16	0,363	0,498	0,582
17	0,377	0,510	0,593
18	0,390	0,522	0,604
19	0,402	0,532	0,613
20	0,413	0,543	0,622
22	0,434	0,561	0,638
24	0,452	0,577	0,652
26	0,469	0,592	0,665
28	0,484	0,605	0,676
30	0,498	0,616	0,687

Величины значимости коэффициента множественной корреляции R
(5%-ный уровень значимости)

Длина ряда в годах	Число факторов				
	1	2	3	4	5
10	0,63	0,758	0,84	0,898	0,97
12	0,576	0,697	0,777	0,838	0,886
14	0,532	0,648	0,726	0,786	0,835
16	0,497	0,608	0,683	0,741	0,79
18	0,468	0,574	0,646	0,703	0,751
20	0,444	0,545	0,615	0,67	0,717
24	0,404	0,498	0,563	0,615	0,66
28	0,373	0,461	0,523	0,572	0,614
30	0,361	0,446	0,506	0,553	0,595
35	0,334	0,414	0,469	0,514	0,552
40	0,312	0,387	0,439	0,482	0,518
50	0,279	0,346	0,394	0,432	0,465
60	0,254	0,316	0,359	0,394	0,452
70	0,235	0,292	0,333	0,366	0,395
80	0,22	0,273	0,312	0,342	0,37
90	0,207	0,258	0,294	0,323	0,349
100	0,197	0,245	0,279	0,307	0,333

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов С. К., Биндеман Н. Н., Бочеввер Ф. М., Веригин Н. Н. Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий. М., Госстройиздат, 1960.
2. Аверьянов С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. В сб.: «Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод», № 1. М., Изд-во АН СССР, 1956.
3. Альтовский М. Е. Метод корреляционных зависимостей. Раздел в книге «Методическое руководство по изучению режима подземных вод» под ред. М. Е. Альтовского и А. А. Коноплянцева. М., Госгеолтехиздат, 1954.
4. Андреев В. Г. Циклические колебания годового стока и их учет при гидрогеологических расчетах. Труды ГГИ. Л., Гидрометеониздат, 1959.
5. Басов Г. Ф. Итоги пятидесятилетнего изучения гидрогеологической роли лесных полос Каменной степи. Почвоведение. М., Изд-во АН СССР, № 8, 1948.
6. Биндеман Н. Н. (при участии К. Т. Апохиной). Определение гидрогеологических параметров по данным наблюдений за режимом грунтовых вод при паводках. Информац. мат. № 10. М., 1957 (ВНИИ ВОДГЕО).
7. Бирюкова А. П. Влияние орошения на водный и солевой режим почв Южного Заволжья. М., Изд-во АН СССР, 1962.
8. Богачев В. Г. Методы прогноза режима подземных вод Силурийского плато. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Труды ВСЕГИНГЕО, новая серия № 10. М., «Недра», 1964.
9. Богомолов Ю. С., Плетнев А. А. Программа получения весовых функций линейной системы. В сб.: «Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях», вып. 6. М., 1968 (ВСЕГИНГЕО).
10. Брукс К. и Карузере Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеониздат, 1963.
11. Бугаев В. А., Каца А. Л. Квазидвухлетняя цикличность и эволюция циркуляции и погоды в Атлантико-Евразийском секторе полушария в 1968—1970 гг. В сб.: «Квазидвухлетняя цикличность и циркуляция в атмосфере и океане». Под ред. А. Л. Каца. Л., Гидрометеониздат, 1971.
12. Вангенгейм Г. Я. Особенности атмосферной циркуляции в различных эпохах и колебания климата. Труды II Всесоюз. географ. съезда, т. 11. М., Географиздат, 1948.
13. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
14. Витинский Ю. И. Прогнозы солнечной активности. М.—Л., 1963.
15. Власко Г. Н. Влияние атмосферной циркуляции на режим и ресурсы подземных вод аллювиальных отложений Актюбинского Приуралья. Региональные гидрогеологические исследования. Алма-Ата, «Наука», 1968.
16. Веригин Н. Н. Неустановившееся движение грунтовых вод вблизи водохранилищ. ДАН СССР, т. 16, № 4. М., Изд-во АН СССР, 1949.
17. Гармонов И. В., Лебедев А. В. Основные задачи по динамике подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1952.
18. Гирс А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л., Гидрометеониздат, 1971.
19. Глухов И. Г. Периодические колебания подземного стока и предсказание расходов источников в летнее время. Труды Лабор. гидрогеологич. проблем им. Ф. П. Саваренского, т. 3, 1948.
20. Деметьев Н. Ф. К расчету подземного питания рек по уровню подземных вод. Труды ЦИП, вып. 130. Л., Гидрометеониздат, 1963.
21. Де Уинст Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. Серия «Наука о земле». М., «Мир», 1969.
22. Дзердзевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов. Труды НИИ ГУГМС, серия II, вып. 21. М.—Л., Гидрометеониздат, 1946.

23. Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии. М., 1968 (Ин-т географии АН СССР).
24. Добровольская Н. Д. Новый метод обработки многолетних данных. Булл. научно-техн. инф. МГиАН СССР, № 1 (25). М., Госгеолтехиздат, 1960.
25. Доброумов Б. М. К вопросу о корреляционных связях подземного стока рек СССР. В сб. работ по гидрологии, № 8. Л., Гидрометеониздат, 1968.
26. Добрышман Е. М., Олевская С. М. Выявление периодических колебаний в зональной составляющей ветра в тропической зоне. «Метеорология и гидрология», 1971, № 7.
27. Дугинов В. И., Коробейников В. А. Многолетние колебания уровня грунтовых вод Каменной степи и их связь с метеорологическими элементами. «Разведка и охрана недр», 1957, № 8.
28. Дугинов В. И., Коробейников В. А. Ритмические колебания уровня грунтовых вод Каменной степи и причины, вызывающие их. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. IX. М., Гидрометеониздат, 1959.
29. Дунин-Барковский И. В., Смирнов Н. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М., Изд-во техн. литературы, 1955.
30. Ефремова Т. Н. Прогноз естественного режима уровня грунтовых вод. «Разведка и охрана недр», 1960, № 8.
31. Зальцберг Э. А., Деч В. Н., Кнорринг Л. Д. Долгосрочные прогнозы уровней подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1970, № 10.
32. Кайсл Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных. Л., Гидрометеониздат, 1972.
33. Калинин Г. П. Об определении подземного питания рек. «Метеорология и гидрология», 1957, № 5.
34. Калинин Г. П. Проблемы глобальной гидрологии. Л., Гидрометеониздат, 1968.
35. Каменский Г. Н., Биндеман Н. Н., Вевировская М. А., Альтовский М. Е. Режим подземных вод. М., ГОНТИ, 1938.
36. Каменский Г. Н. Уравнение неустановившегося движения грунтовых вод в конечных разностях. Отд. техн. наук, № 4, М., Изд-во АН СССР, 1940.
37. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1943.
38. Кац А. Л. Многолетние изменения циркуляции атмосферы и некоторые аспекты долгосрочных прогнозов погоды. Труды I-й научной конф. по общей циркуляции атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1962.
39. Кац Д. М. Основные причины многолетних колебаний грунтовых вод в орошаемых районах. «Разведка и охрана недр», 1960, № 7.
40. Кац Д. М. Режим грунтовых вод в орошаемых районах и его регулирование. М., Сельхозгиз, 1963.
41. Кац Д. М. Контроль режима грунтовых вод на орошаемых землях. М., «Колос», 1967.
42. Кенесарин Н. А. Гидрогеологический прогноз земных проявлений спокойного солнца. Узб. геол. журн. Ташкент, № 2, 1963.
43. Киселев П. А. Исследование баланса грунтовых вод по колебаниям их уровня. Минск, Изд-во АН БССР, 1961.
44. Киселев П. А. Определение параметров напорных водоносных горизонтов по режиму колебаний их пьезометрического уровня. ДАН БССР, № 6, т. X, Минск, Изд-во АН БССР, 1966.
45. Ковалевский В. С. Классификационная схема естественного режима грунтовых вод. «Разведка и охрана недр», 1959, № 9.
46. Ковалевский В. С. Некоторые закономерности влияния климатических факторов на режим подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1960, № 12.
47. Ковалевский В. С. Методическое руководство по изучению режима подземных вод в районах водозаборов. М., 1968 (ВСЕГИНГЕО).
48. Ковалевский В. С. Картирование режима подземных вод. В сб.:

«Проблемы гидрогеологического картирования и районирования», Л., 1971 (Географ. общество СССР).

49. Ковалевский В. С. Прогнозы режима подземных вод. В сб.: «Гидрогеология и инженерная геология». Доклады сов. геологов на XXIV геологич. конгрессе. М., «Наука», 1972.

50. Ковалевский В. С. Долгосрочные прогнозы естественного режима грунтовых вод. М., 1972. (ВСЕГИНГЕО).

51. Ковалевский В. С. Прогнозы сезонного режима грунтовых вод. В сб.: «Подземный сток и методы его исследования». М., «Наука», 1972.

52. Кондрашов С. К. Орошаемое земледелие. М., Сельхозиздат, 1947.

53. Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С. К вопросу о региональных закономерностях режима грунтовых вод. В сб.: «Проблемы гидрогеологии». М., Госгеолтехиздат, 1960.

54. Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С., Семенов С. М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. Труды ВСЕГИНГЕО, новая серия. М., Госгеолтехиздат, 1963.

55. Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С. Принципы размещения наблюдательной сети для изучения естественного режима подземных вод (методические указания). М., 1964. (ВСЕГИНГЕО).

56. Коноплянцев А. А. Некоторые вопросы изучения режима подземных вод на территории СССР. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». М., «Недра», 1964.

57. Коноплянцев А. А. Применение методов математической статистики для анализа и прогноза режима уровня подземных вод (методические указания). Серия № 79. М., 1967. (ВСЕГИНГЕО).

58. Коноплянцев А. А. Прогноз режима подземных вод методом аналогии. «Разведка и охрана недр», 1968, № 2.

59. Коноплянцев А. А. К методике долгосрочного прогноза режима уровня грунтовых вод. Материалы годичной сессии Ученого совета ВСЕГИНГЕО. М., 1968. (ВСЕГИНГЕО).

60. Коноплянцев А. А. Вековые и многолетние колебания уровня грунтовых вод на территории СССР. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Серия № 3, 127, М., 1970. (ВСЕГИНГЕО).

61. Коноплянцев А. А., Маслов Б. С. Вопросы изучения режима грунтовых вод для сельского хозяйства вне аридной зоны. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Серия № 127. М., 1969. (ВСЕГИНГЕО).

62. Корниенко И. М., Лавров А. П. О результатах изучения режима подземных вод Полесской низменности. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». М., «Недра», 1964.

63. Коробейников В. А. Ритмичность в многолетних колебаниях уровня грунтовых вод. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Труды ВСЕГИНГЕО. Новая серия № 10. М., «Недра», 1964.

64. Коробейников В. А. Многолетний режим грунтовых вод Каменной степи и его основные закономерности (автореферат диссертации). М., 1965.

65. Коробейников В. А. Циклические многолетние изменения уровня грунтовых вод и природных процессов. «Разведка и охрана недр», 1965, № 1.

66. Коробейников В. А. Составление сверхдолгосрочных прогнозов режима уровня грунтовых вод. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Серия № 127. М., 1969 (ВСЕГИНГЕО).

67. Костяков А. Н. Основы мелиорации. М., Сельхозгиз, 1933.

68. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. Серия «Наука о земле». М., «Мир», 1969.

69. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.

70. Крылов М. М. К методике изучения водного баланса орошаемых районов. Ташкент, Изд-во научно-техн. и соц.-экон. лит. УзССР, 1939.

71. Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М., изд. МГУ, 1960.

72. Кузнецова Л. П. Колебания годовых величин атмосферных осад-

ков и температуры воздуха материков (Европа и Северная Америка). В сб.: «Формирование ресурсов вод суши». М., «Наука», 1972.

73. Лахтин Л. Кривые распределения и построение интерполяционных формул по способам Пирсона и Брукса, 1922.

74. Лебедев А. В. Изучение режима и баланса грунтовых вод по стационарным наблюдениям. В сб.: «Методы исследований по расчетам при инженерно-геологических и гидрогеологических работах». М., Госгеолтехиздат, 1951.

75. Лебедев А. В. Экспериментальный метод определения испарения грунтовых вод и их питание за счет инфильтрации атмосферных осадков в естественных условиях. В сб.: «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии». М., Госгеолтехиздат, 1953.

76. Лебедев А. В. Об использовании результатов изучения баланса грунтовых вод и влажности в зоне аэрации для прогноза уровня этих вод. В сб.: «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии», № 14. Труды ВСЕГИНГЕО. М., Госгеолтехиздат, 1956.

77. Лебедев А. В. Прогноз изменения уровня грунтовых вод на орошаемых территориях. М., Госгеолтехиздат, 1957.

78. Лебедев А. В. Определение коэффициента уронеупроводности по данным стационарных наблюдений за режимом подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1961, № 7.

79. Лебедев А. В. Опыт статистической обработки результатов многолетних наблюдений за режимом грунтовых вод. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Труды ВСЕГИНГЕО. Новая серия № 10. М., «Недра», 1964.

80. Левин Л. З. Прогноз максимальных водопритоков в рудник в трещиноватых породах с применением геолого-статистических методов (на примере Миргалимсайского месторождения). Информ. сообщ. № 12. Серия «Инженерная геология и гидрогеология». М., ВИЭМС, 1969.

81. Максимов И. В., Смирнов Н. П. Опыт построения долгосрочного прогноза основных форм атмосферной циркуляции в северном полушарии компонентно-гармоническим анализом. Труды ААНИИ, т. 262. Л., «Морской транспорт», 1965.

82. Максимов И. В. Индекс внутригодовых изменений циркуляции вод северной части Атлантического океана. Труды ПИНРО, вып. 17. Л., 1966. (ПИНРО).

83. Максимов И. В., Смирнов Н. П. Генетический метод прогноза многолетних колебаний климатических характеристик в океане. Труды ПИНРО, вып. 20. Л., 1967. (ПИНРО).

84. Методическое руководство по изучению режима подземных вод (под ред. М. Е. Альтовского и А. А. Коноплянцева). М., Госгеолтехиздат, 1954.

85. Миллер Р. Л., Дж. С. Кан. Статистический анализ в геологических науках. М., «Мир», 1965.

86. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Служба гидрологических прогнозов. Ч. 1. Прогнозы режима вод суши. Л., Гидрометеоздат, 1962.

87. Никитин М. Р. Некоторые вопросы прогноза режима подземных вод вблизи водохранилищ. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». М., «Недра», 1964.

88. Огильви Н. А. Определение параметров скорости распространения подпора в грунтовых водах путем анализа их режима. «Советская геология», 1956, № 56.

89. Огильви Н. А., Плетнев А. А. О математической модели режима грунтовых вод. В сб.: «Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях», вып. 6. М., 1968. (ВСЕГИНГЕО).

90. Озябкин В. Н. Графический анализ множественной корреляции. Раздел в книге А. А. Коноплянцева «Применение методов математической статистики для анализа режима уровня подземных вод». Серия № 79. М., 1957 (ВСЕГИНГЕО).

91. Оль А. И. Проявление 22-летнего цикла солнечной активности в кли-

мате Земли. В кн.: «Связь явлений в тропосфере Земли с солнечной активностью». Труды ААНИИ, т. 2. Л., Гидрометеонздат, 1969.

92. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии. Л., Гидрометеонздат, 1972.

93. Плетнев А. А. Нахождение весовых функций линейной системы по записям входных и выходных величин (случай различной «памяти» по каждому из входов). В сб.: «Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях», вып. 34. М., 1970. (ВСЕГИНГЕО).

94. Покровская Т. В. Синоптико-климатические и геллюгеофизические долгосрочные прогнозы погоды. Л., Гидрометеонздат, 1969.

95. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., Гостехиздат, 1952.

96. Попов Е. Г. Основы гидрологических процессов. Л., Гидрометеонздат, 1968.

97. Роговская Н. В. Анализ многолетних наблюдений за режимом подземных вод на примере Туркменской гидрогеологической станции. «Советская геология», 1964, № 12.

98. Романовский В. И. Математическая статистика. М.—Л., ОНТИ, 1938.

99. Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. 2. Под ред. В. Д. Комарова. Л., Гидрометеонздат, 1963.

100. Руководство по изучению режима и баланса подземных вод в речных бассейнах международного гидрологического десятилетия. Под ред. Шестакова В. М. и др. Серия № 91. М., 1968. (ВСЕГИНГЕО).

101. Семенов С. М. Закономерности естественного режима уровня грунтовых вод и их использование для составления гидрогеологических прогнозов и информаций (автореферат диссертации). М., 1968.

102. Семенов С. М., Коноплянцев А. А. Карты информации и прогноза режима подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1969, № 2.

103. Семенов С. М. О возможности составления сверхдолгосрочных прогнозов режима грунтовых вод на основе использования аппарата автокорреляционных функций. В сб.: «Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод». Серия № 127. М., 1969. (ВСЕГИНГЕО).

104. Семенов С. М. Об оценке точности прогнозов. М., 1970. (ВСЕГИНГЕО).

105. Сидоркина С. П. О долгосрочном прогнозе гидрогеологических процессов методами теории стационарных случайных функций. В сб.: «Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях». Серия № 153. М., 1970. (ВСЕГИНГЕО).

106. Слепцов-Шевлевич Б. А. О реальности существования двухлетнего цикла солнечной активности. В кн.: «Связь явлений в тропосфере Земли с солнечной активностью». Труды ААНИИ, т. 289. Л., Гидрометеонздат, 1969.

107. Справочник гидрогеолога (под ред. М. Е. Альтовского). М., Гостеолтехиздат, 1962.

108. Субботин А. И. О взаимосвязи подземных вод и речного стока. Труды ЦИП, вып. 9 (36). М., Гидрометеонздат, 1948.

109. Субботин А. И. Об использовании наблюдений за подземными водами при исследованиях и прогнозах речного стока. Труды III Всесоюзного гидрологич. съезда, т. IX. Л., Гидрометеонздат, 1959.

110. Токарев Н. С. Ритмические колебания климата и их влияние на режим поверхностных и подземных вод. Труды лаборатории гидрогеологич. проблем, № 9. М., Изд-во АН СССР, 1950.

111. Шаратов И. П. Применение математической статистики в геологии. М., «Недра», 1971.

112. Шестаков В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. М., изд. МГУ, 1965.

113. Шинкаревский М. А. Вопросы методики изучения естественного режима уровня грунтовых вод, его основные закономерности и про-

гноз в условиях платформенной части Украины. Автореферат диссертации. Киев, 1971.

114. Шнитников А. В. Общие черты циклических колебаний уровня озер и увлажненности Евразии в связи с солнечной активностью. «Бюллетень комиссии по использованию Солнца», № 3—4 (17—18), 1948.

115. Эйгенсон М. С. Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. Изд. Львовского университета, 1957.

116. Bogardi I. A. Varheto tavaszi maximalis havi közepes talagvizállásox elorejelzeze az Aeföldön. Hidrológiai közlöny. Vol. 33, № 11—12, 1953.

117. Ground Water Studies. An International guide for research and practice. Edited by R. H. Brown, A. A. Konopliantsev, I. Ineson, V. S. Kovalevsky. Unesco, Paris, 1972.

118. Denner J. Untersuchungen der Gesefzmäsigkeit in den Bexiehungen zwischen Grundwasser und Niederschlag in langeren Leits pannen. Deutshe gewasserkundliche Mitteilungen, 1965. Ig. H. 4.

119. Orsborn John F. The prediction of piezometric groundwater levels in observation wells based on prior occurrences Water Resources, Res., 1966. vol. 2, № 1.

120. Rorabaugh M. I. Prediction of ground-water levels on basis of rainfall and temperature correlations. Transactions of the Americal Geophysical Union, 1956, Vol. 37, № 4.

121. Schoeller H. Karst systems. Methods and Techniques of ground-water investigation and development. Water resources series. № 33. United Nations ECAFE, Unesco, New York, 1967.

122. Ubell K. Determination and representation of characteristic data for ground-water household. Publ. Assoc. Intertational Hydrol. Scient. № 52, 1960.

Предисловие	3
Глава I. Типы и практическое назначение прогнозов режима подземных вод	5
Классификация прогнозов режима подземных вод	5
Некоторые аспекты практического использования прогнозов режима подземных вод	15
Глава II. Методические основы прогнозов режима подземных вод	24
Гидродинамические методы	25
Вероятностно-статистические методы	36
Балансовые методы	62
Методы гидрогеологической аналогии	65
Глава III. Прогнозы минимальных годовых уровней и дебитов грунтовых вод	71
Гидрогеологические предпосылки и некоторые общие физические основы прогнозов экстремальных уровней и дебитов грунтовых вод	71
Прогнозы предвесеннего минимума	77
Прогнозы летне-осеннего и зимнего минимума	83
Глава IV. Прогнозы максимальных годовых уровней и дебитов грунтовых вод	93
Прогнозы весеннего максимума	93
Прогнозы осеннего и зимне-весеннего максимумов	111
Глава V. Прогнозы среднегодовых уровней и дебитов грунтовых вод текущего года	115
Глава VI. Долгосрочные и сверхдолгосрочные многолетние прогнозы уровней подземных вод	121
Глава VII. Вероятностные прогнозы-оценки возможных колебаний уровней подземных вод	158
Глава VIII. Оценка качества прогнозов и некоторые рекомендации по их составлению	175
Глава IX. Картирование прогнозов режима подземных вод	187
Заключение	194
Приложения	197
Список литературы	199

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ АКАДЕМИИ НАУК СССР
Владимир Серафимович Ковалевский
ОСНОВЫ ПРОГНОЗОВ ЕСТЕСТВЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Редактор издательства *С. И. Перглер*
Технические редакторы *Т. М. Кан, В. Д. Павлова*
Корректор *М. Ф. Казакова*

Сдано в набор 20/VIII 1973 г. Подписано к печати 28/XI 1973 г. Т-15867 Формат 60×90¹/₁₆ д. л.
Бумага типографская № 2. 13 печ. л. (уч.-изд. 13,66 л.) Тираж 800 экз. Изд. XX—3901

Стройиздат, 1973,
103777, Москва, Кузнецкий мост, 9

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Таблица соотношений между некоторыми единицами физических величин, подлежащих изъятию, и единицами СИ

Наименование величины	Единица				Соотношение единиц
	подлежащая изъятию		СИ		
	наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Сила; нагрузка; вес	килограмм-сила	кгс	} ньюتون	Н	1 кгс ≈ 9,8 Н ≈ 10 Н 1 тс ≈ 9,8 · 10 ³ Н ≈ 10 кН 1 гс ≈ 9,8 · 10 ⁻³ Н ≈ 10 мН
	тонна-сила	тс			
	грамм-сила	гс			
Линейная нагрузка	килограмм-сила на метр	кгс/м	} ньютон на метр	Н/м	1 кгс/м ≈ 10 Н/м
	килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²			
Давление	килограмм-сила на квадратный метр	кгс/см ²	} паскаль	Па	1 кгс/см ² ≈ 9,8 · 10 ⁴ Па ≈ 10 ⁵ Па ≈ 0,1 МПа
	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.			
	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.			
Механическое напряжение	килограмм-сила на квадратный метр	кгс/мм ²	} паскаль	Па	1 кгс/мм ² ≈ 9,8 · 10 ⁶ Па ≈ 10 ⁷ Па ≈ 10 МПа
	килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см ²			
	Модуль продольной упругости; модуль сдвига; модуль объемного сжатия				
Момент силы; момент пары сил	килограмм-сила-метр	кгс·м	} ньютон-метр	Н·м	1 кгс·м ≈ 9,8 Н·м ≈ 10 Н·м
Работа (энергия)	килограмм-сила-метр	кгс·м	джоуль	Дж	1 кгс·м ≈ 9,8 Дж ≈ 10 Дж

Наименование величины	Единица			Соотношение единиц	
	СИ				
	подлежащая изъятию наименование	обозначение	наименование		обозначение
Количество теплоты	калория килокалория	кал ккал	джоуль	Дж	1 кал \approx 4,2 Дж 1 ккал \approx 4,2 кДж
Мощность	килограмм-сила-метр в секунду попадная сила калория в секунду килокалория в час	кг·с·м/с л. с. кал/с ккал/ч	ватт	Вт	1 кг·с·м/с \approx 9,8 Вт \approx 10 Вт 1 л. с. \approx 735,5 Вт 1 кал/с \approx 4,2 Вт 1 ккал/ч \approx 1,16 Вт
Удельная теплоемкость	калория на грамм-градус Цельсия килокалория на килограмм-градус Цельсия	кал/(г·°С) ккал/(кг·°С)	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	1 кал/(г·°С) \approx 4,2 · 10 ³ Дж/(кг·К) 1 ккал/(кг·°С) \approx 4,2 Дж/(кг·К)
Теплопроводность	калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия в час на метр-градус Цельсия	кал/(с·см·°С) ккал/(ч·м·°С)	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)	1 кал/(с·см·°С) \approx 420 Вт/(м·К) 1 ккал/(ч·м·°С) \approx 1,16 Вт/(м·К)
Коэффициент теплообмена (теплоотдачи); коэффициент теплопередачи	калория в секунду на квадратный сантиметр-градус Цельсия килокалория в час на квадратный метр-градус Цельсия	кал/(с·см ² ·°С) ккал/(ч·м ² ·°С)	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м ² ·К)	1 кал/(с·см ² ·°С) \approx 42 кВт/(м ² ·К) 1 ккал/(ч·м ² ·°С) \approx 1,16 кВт/(м ² ·К)

На стр. 206 в выходных сведениях следует читать: Зак. 950.
Цена 82 коп.

ХД-2
ЗК 5

Цена 82 коп.

12752

24

19260