

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ГИДРОГЕОЛОГИИ

На правах рукописи



Гриневский Сергей Олегович

ОЦЕНКА ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ
ВОД НА ОСНОВЕ ГЕОГИДРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Специальность 25.00.07 - гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва 2012

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Доктор геолого-минералогических наук, профессор

Б.В. Боровский

Доктор геолого-минералогических наук, профессор

И.С. Зекцер

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН

В.Г. Румынин

Ведущая организация:

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации

Защита состоится **18 мая 2012 г. в 14 часов 30 мин.** На заседании диссертационного совета по гидрогеологии, инженерной геологии и геокриологии (Д 501.001.30) при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ, Геологический факультет, аудитория 415.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета МГУ, зона А, 6 этаж.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ, Геологический факультет, ученому секретарю специализированного совета, проф. В.Н. Соколову.

Автореферат разослан ____апреля 2012 г.

Ученый секретарь специализированного совета Д 501.001.30
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



В.Н.Соколов

Введение

Актуальность исследований.

подавляющее большинство широко используемых в гидрогеологической практике методов оценки природных ресурсов подземных вод (ЕРПВ) зоны интенсивного водообмена основаны на определении количественных показателей разгрузки или расхода фильтрационного потока, с чем связаны известные объективные, но не всегда определенные погрешности. Вместе с тем, согласно общепринятому определению, методически корректной является количественная оценка ЕРПВ, основанная на изучении балансовых составляющих *питания* подземных вод, которое для зоны интенсивного водообмена обеспечивается, главным образом, инфильтрацией атмосферных осадков. Однако, методы определения инфильтрационного питания (ИП), как правило, позволяют количественно характеризовать его интенсивность на локальном участке в конкретный период исследований, в связи с чем их использование для оценки среднесрочных обеспеченных величин ресурсов подземных вод отдельных территорий весьма ограничено.

С 70-х годов прошлого века по настоящее время, как в России, так и за рубежом, активно развиваются математические модели, в той или иной форме связывающие процессы водообмена в системах атмосфера – ландшафт – поверхностные и подземные воды в смежных с гидрогеологией науках (почвоведение, гидрология, метеорология и др.). В гидрогеологических исследованиях такие модели были впервые использованы Р. Фризом, а в отечественной практике – И.С.Пашковским [Пашковский, 1985]. В.М. Шестаков предложил называть такие модели геогидрологическими и определил «геогидрологию», как граничный с другими науками раздел гидрогеологии, рассматривающий «движение воды в системе ландшафт – подземные воды зоны гипергенеза от выпадения осадков на поверхность суши до их поступления в биосферу и поверхностные воды с учетом деятельности человека» [Шестаков, Поздняков, 2003].

Использование принципов геогидрологического моделирования позволяет проводить площадную оценку ИП и ЕРПВ, основанную на моделировании процессов его формирования, с учетом природной неоднородности гидрогеологических, ландшафтных и климатических условий изучаемой территории. В такой постановке представляется возможность избежать основные ограничения известных методов оценки ресурсов и детализировать пространственно-временную неоднородность их количественных показателей.

Также целесообразным является применение геогидрологических моделей и в практически важных задачах изучения условий формирования и оценки ресурсов подземных вод в условиях их эксплуатации, что повышает уровень достоверности и детальности количественной оценки балансовой обеспеченности эксплуатационного водоотбора и прогнозирования влияния эксплуатации подземных вод на поверхностные воды и общий водный баланс территорий. Это обусловлено все возрастающей актуальностью количественного анализа экологических последствий влияния эксплуатации подземных вод на окружающую среду.

Однако *принципы построения таких моделей, их структура, содержание отдельных блоков и методика использования геогидрологического моделирования применительно к*

различным масштабам и практическим задачам оценки ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена не разработаны. Также требует решения и проблема параметрического обеспечения отдельных блоков геогидрологической модели для задач средне- и мелкомасштабной оценки ресурсов подземных вод, что на сегодняшний момент, во многом, ограничивает их практическое использование. Решение этих вопросов и определяют основные направления исследований в данной работе.

Цели и задачи исследований.

Основной целью работы является *разработка методики оценки инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод в естественных условиях и при их эксплуатации на основе геогидрологических моделей*, отражающих пространственно-временную неоднородность природных факторов их формирования и нелинейность процессов взаимовлияния поверхностной и подземной составляющих водообмена речного бассейна.

Для этого в работе решались следующие задачи:

- обоснование необходимой структуры расчетной геогидрологической модели, содержания ее расчетных блоков и принципов их сочленения, в зависимости от масштаба и цели исследований инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод;
- разработка расчетных модулей формирования зависимого гидрологического режима водотоков и водоемов в составе геогидрологической модели речного бассейна;
- разработка методических принципов использования геогидрологических моделей и их отдельных элементов (блоков) для средне- и мелкомасштабной (региональной) оценки среднесуточного ИП и ЕРПВ;
- анализ природных факторов формирования ИП и ЕРПВ и выделение основных, определяющих их пространственно-временную неоднородность в масштабе речного бассейна (водосбора);
- проведение расчетной схематизации условий формирования ИП на основе анализа процессов водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации и обоснование параметрического обеспечения и граничных условий расчетных моделей, отражающих основные различия этих процессов, в зависимости от ландшафтных, почвенных и гидрогеологических факторов;
- анализ адекватности расчетных моделей формирования ИП и их параметрического обеспечения природным условиям на основе сопоставления результатов моделирования с данными наблюдений на водно-балансовых стационарах;
- количественный анализ закономерностей формирования пространственной неоднородности ИП подземных вод в масштабе речного бассейна (водосбора), в пределах единой климатической зоны и при широтной зональности климатических условий (на примере Европейской части России);
- апробация методики средне- и мелкомасштабной оценки ИП и ЕРПВ для конкретных территорий, анализ достоверности полученных результатов и обоснование принципов их верификации;
- разработка и практическое применение геогидрологических моделей при оценке эксплуатационных запасов подземных вод (ЭЗПВ) в условиях влияния эксплуатации на поверхностные воды и природные ландшафты.

Методика исследований.

Методика проведения исследований включала:

- анализ существующих методов оценки ИП и ресурсов подземных вод, а также опыта разработки и использования моделей природных систем «атмосфера – ландшафт – поверхностные и подземные воды» в смежных с гидрогеологией науках (почвоведение, гидрология, метеорология и др.);
- теоретический и модельный анализ теплоэнергетических и воднобалансовых процессов на поверхности земли и в зоне аэрации с целью обоснования принципов их схематизации и параметрического обеспечения применительно к разным масштабам исследования ИП подземных вод;
- постановку и проведение наблюдений за уровнем грунтовых вод, температурным и влажностным режимом на поверхности земли и в зоне неполного водонасыщения на опытных ландшафтных площадках, лабораторное определение воднофизических свойств по глубине зоны аэрации, анализ материалов наблюдений на водно-балансовых стационарах;
- постановку, реализацию и интерпретацию численных модельных экспериментов;
- разработку и апробацию геогидрологических моделей при решении практических задач оценки среднемноголетнего ИП, естественных и эксплуатационных ресурсов подземных вод на конкретных объектах.

Научная новизна работы.

1. Определены понятие и балансовые критерии гидрогеодинамически зависимого и независимого гидрологического режима водотоков и водоемов. Разработана и апробирована на конкретном объекте оригинальная гидрогеодинамическая модель формирования зависимого гидрологического режима малого водоема в условиях эксплуатации подземных вод вблизи его акватории, отражающая прогнозные изменения процессов восполнения его запасов, гидрологического режима и балансово-гидрогеодинамических условий взаимодействия подземных и поверхностных вод.
2. Проведен количественный анализ и описаны закономерности формирования процессов сокращения речного стока в характерных гидрогеодинамических зонах влияния берегового водозабора.
3. Предложена типизация геогидрологических моделей в зависимости от их масштаба и характера решаемых с их помощью задач, отражающая основное содержание, принципы пространственно-временной схематизации процессов и параметрического обеспечения отдельных ее блоков (модулей). Разработаны и апробированы методические принципы построения геогидрологических моделей в разных масштабах.
4. Проведена оценка среднемноголетнего питания и естественных ресурсов подземных вод юго-западной части Московского артезианского бассейна, отражающая неоднородность природных факторов их формирования (климатических, ландшафтных, гидрогеологических), в масштабе отдельных речных бассейнов территории.

5. Количественно охарактеризована роль ландшафтных (рельеф, тип растительного и почвенного покрова) и гидрогеологических условий речных бассейнов в формировании средне- мелкомасштабной площадной неоднородности инфильтрационного питания подземных вод.
6. Впервые получены расчетные зависимости для оценки среднемноголетнего инфильтрационного питания подземных вод, отражающие широтную климатическую зональность территории Европейской части России и макро-неоднородность ландшафтных и почвенных условий на площади речного бассейна (водосбора).
7. Предложены и апробированы на конкретных объектах принципы количественной оценки распределения естественных ресурсов подземных вод в разрезе зоны интенсивного водообмена, основанные на использовании результатов геогеологического моделирования процессов формирования инфильтрационного питания и данных наблюдений за речным стоком.

Предмет защиты.

Основным предметом защиты являются разработанные методические принципы построения, параметризации, верификации и использования геогеологических моделей, определяющие принципиально новые подходы к решению задач оценки инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод в естественных условиях и при их эксплуатации применительно к различным масштабам исследования.

Личный вклад автора.

В диссертационной работе приведены результаты исследований, выполненных, в основном, в процессе самостоятельных работ автора. В работе использована оригинальная вычислительная программа моделирования трансформации осадков на поверхности земли, составленная проф. С.П.Поздняковым, тестирование и усовершенствование которой проведено при участии автора, а также авторские вычислительные программы моделирования зависимого гидрологического режима водотоков и водоемов «Речка» и MCG. В работе использованы результаты исследований при решении конкретных гидрогеологических задач на объектах, в которых автор принимал участие как научный руководитель и ответственный исполнитель работ, а также результаты численных и лабораторных экспериментов, выполненных в процессе подготовки студенческих курсовых, дипломных и магистерских работ, постановка, проведение и интерпретация результатов которых осуществлялась под научным руководством соискателя.

Практическая значимость и реализация результатов.

Результаты проведенных исследований использовались при выполнении работ по теме Государственного контракта с Федеральным агентством по науке и инновациям №02.435.11.4001 по теме РП-13.2/001 «Разработка технологии оценки загрязнения и ресурсов подземных вод техногенно нагруженных территорий России» и легли в основу построения региональной карты среднемноголетнего ИП территории Калужской области, которая была использована для анализа ресурсного потенциала и актуального состояния месторождений подземных вод этого региона. Математические модели и расчетные алгоритмы, рассматриваемые в диссертации, использованы при написании отчетов по

теме исследований «Совершенствование физико-математических моделей, численных методов и алгоритмов в пакете программ «НИМФА» для решения задач гидрогеоэкологии на многопроцессорных ЭВМ», в рамках Государственного контракта от 22.07.2010 № Н.4j.45.40.10.1134, заключенного между Госкорпорацией «Росатом» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по теме «Разработка технологий проектирования и имитационного моделирования для суперЭВМ на основе базового программного обеспечения», в котором кафедра гидрогеологии принимает участие на условиях субподряда.

На основе разработанной методики проведены оценки ЕРПВ бассейна р. Вологда с целью анализа перспектив их использования для водоснабжения г. Вологда, а также для территории поисково-разведочных работ на подземные воды в районе г. Смоленска. Разработки, приведенные в диссертации, в том числе и основанные на них программные коды, использовались при подсчете ЭЗПВ и прогнозировании влияния эксплуатации подземных вод на гидрологический режим поверхностных вод и природные ландшафты на месторождениях приречного типа в Архангельской области и на территории Самур-Гюльгерычайской аллювиально-пролювиальной равнины Южного Дагестана. Результаты практического использования разработок автора отражены в производственных отчетах по хозяйственным договорам кафедры гидрогеологии МГУ.

Материалы и основные результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, использованы при подготовке научных отчетов госбюджетных тематических НИР, выполняемых кафедрой гидрогеологии МГУ, и работ по гранту РФФИ № 08-05-00720-а «Геогидрологическое моделирование динамики ресурсов подземных вод в условиях глобального изменения климата» и совместного научного гранта с Академией наук КНР РФФИ №11-05-91161-ГФЕН_а «Взаимосвязь поверхностных и подземных вод в аридных областях Юга России и Китая: проблемы, методика и сравнительные исследования».

Материалы диссертационных исследований использованы при разработке учебных программ по курсам «Геогидрология» (совместно с С.П.Поздняковым) и «Поиски и разведка подземных вод» (совместно с Р.С.Штенгеловым) и легли в основу лекций по этим курсам, которые автор читает для студентов и магистрантов кафедры гидрогеологии МГУ. Составленные на основе научных разработок по теме диссертации авторские прикладные программы моделирования «Речка» и MCG используются при проведении научно-производственных работ кафедры, практических занятий со студентами и магистрантами, а также при подготовке ими выпускных работ.

Апробация работы.

Основные результаты исследований по теме диссертации были доложены и обсуждались на научных семинарах кафедры гидрогеологии МГУ, международных и российских совещаниях и конференциях, основными из которых являлись:

- ежегодная научная конференция «Ломоносовские чтения», МГУ, 1996, 1997, 2000, 2001, 2003, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011;
- 5-й Международный Конгресс и Техническая выставка «Вода: Экология и технология» ЭКВАТЭК-2002. Москва, 2002;
- научная конференция «Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование». Москва, МГУ, 2003

- вторая Всероссийская конференция «Современные проблемы изучения и использования питьевых подземных вод (памяти Л.С. Язвина)». Звенигород, 2006;
- Всероссийская конференция по математическому моделированию в гидрогеологии, Московская область, 2008.
- международная научная конференция «Ресурсы подземных вод. Современные проблемы изучения и использования». Москва, МГУ, 2010
- международная научно-практическая конференция «Питьевые подземные воды. Изучение, использование и информационные технологии». Моск. обл. п. Зеленый. 2011;
- научная конференция «Комплексные проблемы гидрогеологии». СПб.: С.-Петербург. ун-т. 2011;
- Российско-Тайваньский двусторонний симпозиум «Разработка технологий оценки водных ресурсов». Москва, 2004 (Taiwan-Russia Bilateral Symposium «Development of Water Resources Technology». Moscow, Russia 31 May, 2004);
- 4-я конференция по проблемам охраны окружающей среды и гидрогеологии «Гидрологические проблемы 21 века: экология, охрана окружающей среды и здоровье человека. Институт гидрологии. США, Сан Франциско, 1999 (1999 Annual Meeting of the American Institute of Hydrology and then Fourth USA/CIS Joint Conference on Environmental Hydrology and Hydrogeology. San Francisco, California, 1999);
- 7-я Международная Конференция по калибрации и надежности моделирования подземных вод. Ухань, Китай, 2009 (7-th International conference on calibration and reliability in groundwater modeling ModelCARE “Managing Groundwater and the Environment”, Wuhan, China, China University of Geosciences, 2009);
- международный симпозиум по подземным водам. Валенсия. Испания, 2010 (IAHR International Groundwater Symposium. 22-24 September 2010. Valencia, Spain)

Публикации.

По теме работы опубликовано в открытой печати 45 работ, из них 16 статей в рецензируемых журналах.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 6 глав и заключения, представлена на 382 страницах, включая 163 рисунка, 56 таблиц и список литературы из 314 наименований, в которых 137 иностранных работ и 12 фондовых источников.

Благодарности.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору Р.С. Штенгелову, оказавшему большое влияние на формирование его профессионального мировоззрения. Автор глубоко признателен профессору С.П. Позднякову за полезные советы и плодотворные обсуждения по тематике работы, скоропостижно скончавшемуся профессору И.С. Пашковскому за ценные консультации и замечания к работе, а также ушедшему из жизни профессору В.М. Шестакову, который на протяжении многих лет был для автора ориентиром в науке. Автор выражает особую благодарность профессору В.А.Всеволожскому и доценту Р.П. Кочетковой за плодотворные совместные работы по территории Калужской области, инж. В.Н. Обозному и доц. А.А. Маслову, помогавшим в организации режимных наблюдений на Звенигородском полигоне, доц. А.В. Расторгуеву и сотруднику ВНИИ ВОДГЕО к.т.н.

А.А. Киселеву за помощь в проведении лабораторных испытаний на образцах. Автор также считает своей приятной обязанностью выразить благодарность студентам кафедры гидрогеологии А.И. Беловой, Д.С. Даутовой, Я.В. Ивановой, М.В. Новоселовой, А.Е. Преображенской, К.В. Сучковой, М. Ю. Ширнину, выполнявших под его руководством исследования по теме диссертации в рамках подготовки своих курсовых и дипломных работ.

Исследования в рамках данной работы поддерживались грантами РФФИ № 08-05-00720-а и РФФИ №11-05-91161-ГФЕН_а.

Основное содержание работы.

Глава 1. Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод. Состояние вопроса и проблемы

Для верхней гидрогеодинамической зоны интенсивного водообмена в условиях гумидного климата ИП, под которым понимается процесс поступления атмосферной влаги на свободную поверхность грунтовых вод, является основной составляющей ЕРПВ - обеспеченного суммарным питанием среднесуточного расхода потока. Формирование ИП и ЕРПВ в этих условиях определяется водно-балансовыми процессами на поверхности суши и всего речного бассейна в целом.

Прикладное значение изучения ИП и ЕРПВ часто связано с анализом перспектив использования подземных вод для водоснабжения и оценкой их эксплуатационных запасов (ЭЗПВ). Для большинства типов месторождений пресных подземных вод [Боревский и др., 1989] их эксплуатационные запасы балансово обеспечиваются «ресурсными» составляющими, главным образом, за счет инверсированной части естественных ресурсов и привлекаемых ресурсов – дополнительного питания, возникшего вследствие эксплуатации подземных вод. На месторождениях подземных вод в речных долинах привлекаемые ресурсы генетически формируются за счет поверхностных вод, а на участках эксплуатационного снижения уровней грунтовых вод (УГВ) возможно увеличение ИП. Кроме того, при снижении УГВ может происходить сокращение разгрузки подземных вод за счет эвапотранспирации («эвапотранспирационной» разгрузки), которая характеризует часть инверсированных естественных ресурсов потока, однако, в связи со сложностями количественной оценки, часто не учитывается.

Таким образом, формирование ресурсов подземных вод, как в естественных (антропогенно-естественных) условиях - за пределами балансово-гидрогеодинамического влияния эксплуатации, - так и на участках водозаборов, тесно связано с водно-балансовыми процессами всего речного бассейна. Именно в таком контексте в содержании и названии данной работы используется термин «ресурсы подземных вод» - без дополнительного прилагательного. Это подразумевает анализ формирования питания (ресурсов) подземных вод во взаимосвязи с водно-балансовыми процессами всего речного бассейна в естественных и техногенно-нарушенных (эксплуатационных) условиях.

Методы оценки ИП и ЕРПВ можно разделить на площадные (региональные) и точечные (локальные).

Первую группу образуют балансовый (решение уравнение общего водного баланса), гидролого-гидрогеологический (количественный анализ речного стока) и

гидрогеодинамический (решение обратных задач геофильтрации) методы, представленные в работах Н.Н. Веригина, В.А. Всеволожского, И.К. Гавич, Р.Г. Джамалова, И.С. Зекцера, Н.И. Коронкевича, Б.И. Куделина, А.В. Лебедева, Н.А. Лебедевой, М.И. Львовича, В.М. Шестакова, В.М. Шестопалова и др. Все эти методы имеют ряд известных ограничений, лимитирующих их практическое использование. Основные погрешности балансового метода связаны с ошибками расчета суммарной эвапотранспирации, которые для условий гумидного климата соизмеримы с величиной ИП. Использование гидролого-гидрогеологического метода, основанного на допущении о тождестве среднесуточной величины питания подземных вод и их разгрузки в речную сеть, ограничено условием полного дренирования разреза, которое для зоны интенсивного водообмена возможно для речных бассейнов с площадью свыше 1500-2000 км² [Пашковский, 2001]. Однако и в этом случае не учитываются процессы разгрузки подземных вод эвапотранспирацией при неглубоком залегании УГВ. Основные проблемы определения ИП гидрогеодинамическим методом связаны с неопределенной погрешностью оценки геофильтрационных параметров. Кроме того, все рассмотренные площадные методы, как правило, позволяют оценить лишь интегральные величины ИП и ЕРПВ на площади крупных речных бассейнов и не отражают площадную неоднородность ИП, связанную с различием ландшафтных условий в границах речного бассейна, а также внутrigодовую (сезонную) динамичность его формирования.

Точечные (локальные) методы оценки ИП представлены его экспериментальными (лизиметрическими, изотопными, тензиометрическими, влажностными, гидрогеотермическими) измерениями (В.В. Бадов, Н.Е. Дзекунов, И.Е. Жернов, И.С. Пашковский, В.Н. Чубаров, В.Б. Чулаевский, В.М. Шестаков, С.Р. Amerman, G.N. Delin, D. Hillel, J.C. Vogel, M.H. Young и др.), методами расчетов влагопереноса в зоне аэрации (ЗА), представленными в работах Л.М. Рекса, И.С. Пашковского, M. Th. van Genuchten, J. Šimůnek и др., а также расчетами ИП по данным режимных наблюдений за уровнями подземных вод в скважинах (Н.Н. Биндеман, В.С. Ковалевский, G.N. Delin и др.). Помимо известных и более подробно рассмотренных в работе погрешностей каждого метода, все они характеризуют величину ИП непосредственно на участке проведения эксперимента, в связи с чем возникает объективная сложность их использования для средне- и мелкомасштабной оценки ЕРПВ.

Методы прогнозирования эксплуатации подземных вод, как основа для расчетов действующих и проектируемых водозаборов, хорошо разработаны благодаря основополагающим работам Н.Н. Биндемана, Б.В. Боровского, Ф.М. Бочевера, Н.И. Дробнохода, Н.И. Плотникова, А.Е. Орадовской, В.С. Усенко, В.М. Шестопалова, Р.С. Штенгелова, Л.С. Язвина и др. В настоящее время все более актуальной становится прогнозная оценка влияния эксплуатации подземных вод на окружающую среду, которая чаще всего выражается в изменении водно-балансовых условий в области влияния водозабора, проявляясь в снижении уровней грунтовых вод и изменении гидрологического режима поверхностных вод. Такие прогнозы в большинстве случаев требуют анализа и моделирования природных процессов формирования всего цикла водообмена речного бассейна - в условиях их взаимосвязи и взаимовлияния, что позволяет учитывать перестройку «ресурсной» составляющей баланса эксплуатационного водоотбора во

времени и получать реальные оценки масштаба воздействия эксплуатации подземных вод, как основы для экологических экспертиз ее допустимости.

Таким образом, проведенный обзор показывает, что каждый из методов в отдельности не является оптимальным для задач средне- и мелкомасштабной оценки ИП и ресурсов подземных вод как в естественных условиях, так и при их эксплуатации. В этом случае перспективным является комбинированный подход, сочетающий в себе различные методы оценки инфильтрации (локальные и региональные) с моделированием природных процессов его формирования.

Природные факторы формирования инфильтрационного питания

На основе анализа работ С.В. Басса, Н.А. Воронкова, И.К. Зубенок, К.Е. Иванова, А.Р. Констанстинова, Н.И.Коронкевича, П.П.Кузьмина, В.В.Куприянова, А.В.Лебедева, М.И.Львовича, А.А.Молчанова, И.С. Пашковского, Е.Н. Романовой, А.И.Субботина, И.И.Судницына, С.Ф. Федорова, И.С. Шпака и др., рассматривающих водно-балансовые процессы речного бассейна, выделяются метеорологические, ландшафтные и гидрогеологические факторы, которые в совокупности определяют средне- и мелкомасштабную пространственно-временную изменчивость ИП и ЕРПВ (рис. 1).



Рис. 1. Факторы формирования инфильтрационного питания

Несмотря на очевидное влияние микроландшафтных условий на отдельные элементы водного баланса, их генеральные различия, определяющие *средне- и мелкомасштабную* неоднородность ИП как ресурсообразующего фактора, прослеживаются на макроуровне, определяющем характер поверхности - главным образом, тип растительности и степень закрытости ландшафта. Основной анализ роли ландшафтных условий в работе проводится для двух его контрастных типов - закрытых лесных территорий («лес») и открытых безлесных пространств («поле»), в которых рассматриваются поля с многолетними травами и залежи («луг») и пахотные угодья («пашня»), поскольку другие типы поверхности имеют резко подчиненное значение и в гораздо меньшей степени связаны с другими факторами формирования ИП. Водно-балансовая роль почвы определяется ее фильтрационными и емкостными (водоудерживающими) свойствами, зависящими,

главным образом, от ее литологического состава, что позволяет интегрально учитывать природное многообразие типов почвы. Гидрогеологическими факторами, определяющими процессы формирования ИП, являются состав и строение верхней части зоны аэрации, а также глубина залегания УГВ [Пашковский, 1985]

Методические принципы оценки ИП и ЕРПВ на основе геогеологических моделей

Методические принципы средне- и мелкомасштабной оценки среднемноголетнего ИП и ЕРПВ на основе геогеологических моделей, описывающих воднобалансовые процессы в границах речного бассейна, включают:

- ✓ выделение основных факторов, определяющих средне- мелкомасштабную неоднородность формирования инфильтрации на рассматриваемой территории;
- ✓ районирование территории по комплексу метеорологических, ландшафтных, почвенных, гидрологических и гидрогеологических факторов, формирующих типовые условия ИП;
- ✓ построение и параметризация расчетных ландшафтных геогеологических моделей для типовых условий формирования инфильтрации;
- ✓ моделирование типовых условий формирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации и оценка его среднемноголетних составляющих – суммарной эвапотранспирации, поверхностного (склонового) стока и инфильтрации;
- ✓ верификация составляющих водного баланса речных бассейнов и калибровка параметров моделей на основе сопоставления с результатами фактических оценок элементов водного баланса в сходных условиях локальными (точечными) методами и сравнения расчетных и фактических среднемноголетних расходов речного (поверхностного) стока, как интегральных воднобалансовых показателей отдельных речных бассейнов (водосборов);
- ✓ построение карты среднемноголетнего ИП и оценка ЕРПВ.

Реализация такой методики региональной оценки ИП и ЕРПВ иллюстрируется в работе на примере юго-западной части Московского артезианского бассейна (МАОБ),

включающей территорию Калужской области и смежных речных бассейнов, общей площадью 49600 км² (глава 4). Для этой территории было выделено 5 климатических районов, охарактеризованных многолетними данными по соответствующей метеостанции, в каждом из которых проведено районирование с выделением до 96 типовых условий формирования ИП – рис. 2.

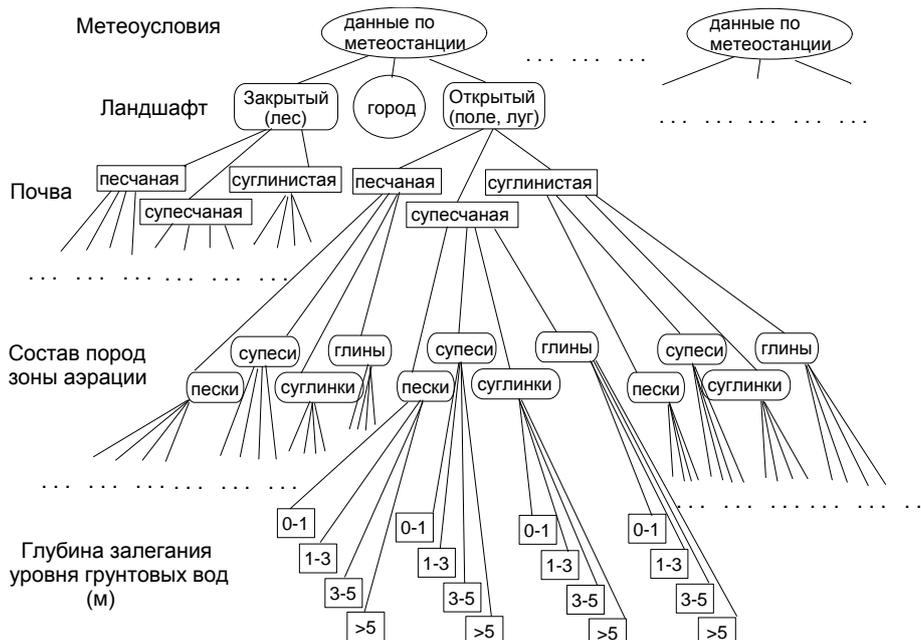


Рис. 2. Типизация условий формирования ИП

Глава 2. Структура и содержание геогидрологической модели

Развивая положения В.М. Шестакова, под *геогидрологической моделью* следует понимать совокупность моделей трансформации и переноса влаги внутри геогидрологического цикла, объединенных условиями сохранения водного баланса на его внутренних границах. Принципиальная структура геогидрологической модели состоит из следующих основных блоков (модулей).

I. Модель формирования водного баланса на поверхности земли - трансформации осадков с учетом процессов их задержания растительностью, испарения с нее и с поверхности суши, накопления и таяния снега, образования склонового (поверхностного) стока и впитывания в почву. Данный блок может дополняться метеоклиматическим модулем, формирующим (генерирующим) метеоусловия на верхней границе модели.

II. Блок, моделирующий процессы нестационарного влагопереноса в зоне аэрации с учетом восходящего подтока и отбора влаги корнями растений при изменяющемся УГВ.

III. Геофильтрационная модель движения воды (транзита) в условиях полного водонасыщения пород с учетом вертикального водообмена между грунтовым и напорными водоносными горизонтами.

IV. Расчетный блок, моделирующий процессы взаимовлияния водообмена между подземными и поверхностными (реки, озера, болота) водами и формирования их гидрологического режима.

V. Расчетные модули (модели) процессов антропогенного воздействия на водный баланс внутри геогидрологического цикла – отбор подземных и поверхностных вод, нагнетание в скважины, дренаж, орошение, утечка из водонесущих коммуникаций, сброс возвратных вод и т.д.

Сочленение отдельных блоков геогидрологической модели осуществляется на основе балансовых соотношений на их внешних границах.

Подобного рода модели разрабатываются и в смежных с гидрогеологией науках – почвоведении (в работах А.М.Глобуса, Е.В.Шейна, N. Mölders и др.) и гидрологии (работы Л.С. Кучмента, А.Н. Гельфана, В.Н. Демидова). В климатологии и метеорологии детально разработаны модели тепло- влагообмена поверхности суши с атмосферой - т.н. модели SVAS (Soil – Vegetation – Atmosphere System) или их более простые формы – LSM-модели (Land Surface Models) – в частности, модель Е.М. Гусева и О.Н. Насоновой SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants). В зависимости от своей научной ориентации, эти модели с различной детальностью рассматривают процессы водообмена в системах атмосфера – ландшафт – поверхностные и подземные воды. При этом во многих моделях смежных наук подземные воды либо вообще не представлены, либо формируют внешнее граничное условие оттока из верхнего почвенного слоя. Таким образом, геогидрологические модели формируют особую группу моделей общего водного цикла (круговорота), в которых рассматривается движение подземных вод с учетом процессов водообмена с почвенным слоем, растительностью, атмосферой и поверхностными водами. Соответствующую международную аббревиатуру для них можно представить как LSGS-модели (Land – Soil – Groundwater – Surface water).

Блоки геогидрологической модели, описывающие подземную ветвь водообмена (влагоперенос в ЗА и процессы геофильтрации), наиболее полно представлены в работах С.Ф.Аверьянова, И.К. Гавич, Е.А. Ломакина, Л. Лукнера, В.А. Мироненко, Л.М. Рекса, И.С.Пашковского, В.М. Шестакова, M. Th. van Genuchten, J. Šimůnek и др.

Модели взаимодействия подземных и поверхностных вод (ППВ), учитывающие гидравлику открытых водотоков, рассмотрены в работах С.Н. Антонцева, Г.П. Епихова, М.Г. Хубляряна, А.В. Gunningham, Daluz Vietra и др. На практике гидрогеологического моделирования процессов взаимодействия ППВ более широкое применение получили *гидрологические* модели речного стока, представленные в публикациях Л. Лукнера и В.М. Шестакова, С.М. Ашкинезера и А.А. Рошаля, С.О. Гриневского и Р.С. Штенгелова, D.E. Prudic. Модели взаимодействия подземных вод с водоемами, учитывающие процессы формирования и изменения их гидрологического режима, рассматриваются в работах С.О. Гриневского, X. Cheng, M.P. Anderson, M.L. Merritt, L.F. Konikow. Примером синтеза моделей отдельных процессов водообмена подземных вод с поверхностными в рамках единой геогидрологической модели речного бассейна является программный код GSFLOW [Markstrom et.al., 2008].

Геогидрологические модели также следует рассматривать как особый, «синтетический» вид гидрогеологических моделей, среди которых можно различать *водно-балансовые*, представленные уравнением баланса потока подземных вод, без анализа его динамики; *гидрогеодинамические*, в которых элементы баланса потока подземных вод рассчитываются на модели, исходя из расчетного поля напоров и заданных полей гидрогеодинамических параметров, и *балансово-гидрогеодинамические*, в которых балансовые составляющие потока, определенные независимыми методами, задаются на модель в качестве исходной информации и являются основой для расчетов поля напоров или других (неизвестных) компонент баланса потока подземных вод [Всеволожский, Гриневский, 2006]. При таком понимании геогидрологические модели принципиально отличаются от других гидрогеологических моделей отражением нелинейных процессов взаимосвязи баланса и гидрогеодинамики потока подземных вод с условиями формирования водного баланса на поверхности земли и гидрологического режима поверхностных вод.

В работе рассматривается содержание первых 4-х блоков геогидрологической модели, поскольку блок, моделирующий техногенную нагрузку в пределах речного бассейна, не имеет определенной «специфики» и в особом описании не нуждается.

Модель водного баланса на поверхности суши

Модель трансформации осадков на поверхности земли разработана С.П. Поздняковым при участии автора [Гриневский, Поздняков, 2010] и производит расчет задержки осадков растительностью и их испарения, накопления в виде снега, таяния и образования поверхностного стока в вертикальной колонке единичной площади и ограниченной сверху поверхностью растительности, а снизу - поверхностью почвы (рис. 3).

Решается уравнение баланса относительно слоя влаги, доступной для впитывания в почву v_p с суточным шагом по времени i :

$$v_p^i = O^i + \Delta V_S + \Delta V_L - C^i - E_S^i - E_L^i, \quad (1)$$

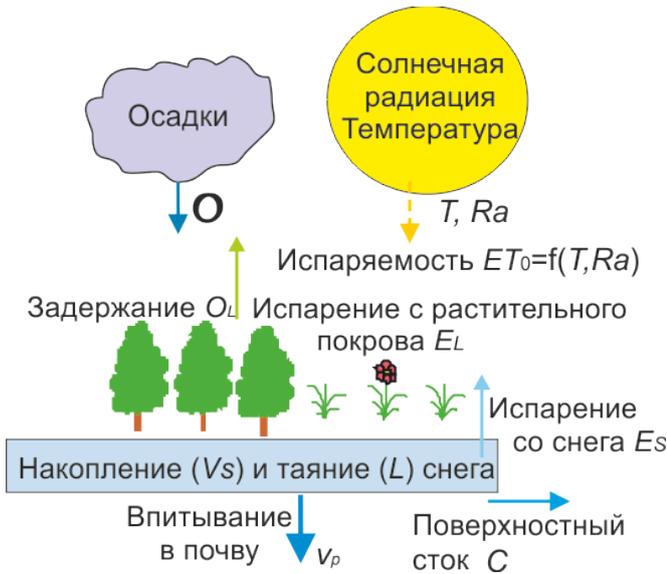


Рис. 3. Модель трансформации осадков

Liang et.al., 1994]:

$$O_L^i = P^i \left[1 - \exp\left(-\frac{O^i}{P^i}\right) \right], \quad P^i = P_{\max}^i - V_L^i; \quad E_L^i = ET_i^0 \left(\frac{V_L^i}{P_{\max}^i} \right)^{2/3}; \quad \Delta V_L = O_L^i - E_L^i \quad (2)$$

Суммарная суточная *потенциальная эвапотранспирация* ET^0 вычисляется по значениям температуры и солнечной радиации по зависимости Прислей–Тейлора, которая является упрощенной формой известного метода Пенмана-Монтейна [Allen, 2001]. Потенциальная эвапотранспирация *из почвы* ET_p^0 рассчитывается как оставшаяся за вычетом испарения с растительности E_L и снега E_S часть суммарной потенциальной эвапотранспирации ET^0 и разделяется на потенциальное почвенное испарение E_p^0 и потенциальную транспирацию TR_p^0 в зависимости от степени «закрытости» ландшафта β , характеризующегося типом растительности [Будаговский, 1981]:

$$(ET_p^0)_i = ET_i^0 - E_L^i - E_S^i; \\ E_p^0 = ET_p^0 \beta; \quad TR_p^0 = ET_p^0 (1 - \beta); \quad \beta = \exp(-\delta LAI^i); \quad 0,45 \leq \delta \leq 0,55 \quad (3)$$

Реальные значения почвенного испарения и транспирации растительностью E_p и TR_p , которые лимитируются соответствующими потенциальными значениями E_p^0 и TR_p^0 , вычисляются в следующем блоке - модели влагопереноса в зоне аэрации.

Снегонакопление ΔV_S и *сублимация* E_S в период отрицательных температур рассчитываются с учетом степени «закрытости» ландшафта β [Будаговский, 1981; Shroeder et. al., 1994]:

$$\Delta V_S^i = O^i - E_S^i, \quad E_S^i = \begin{cases} \beta^i ET_i^0 & \text{при } V_S^i > \beta^i ET_i^0 \\ V_S^i & \text{при } V_S^i < \beta^i ET_i^0 \end{cases}, \quad (4)$$

В рассматриваемом алгоритме используется упрощенная модель *снеготаяния* (L) - пропорционально среднесуточной температуре воздуха (T) и коэффициенту стаивания ε , который имеет внутрисезонную вариацию от ε_{\max} до ε_{\min} [Shroeder et. al., 1994]:

$$L^i = \begin{cases} \varepsilon^i T^i \beta^i & \text{при } V_S^i > \varepsilon^i T^i \beta^i \\ V_S^i & \text{при } V_S^i < \varepsilon^i T^i \beta^i \end{cases}, \quad \varepsilon^i = \frac{\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max}}{2} + \left(\frac{\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max}}{2} \right) \sin \frac{2\pi N}{366} \quad (5)$$

где $\Delta V_S, \Delta V_L$ - суточное изменение слоя влаги в снегу и на растительности.

Расчет *задержания осадков* (O_L) основан на модели накопительного резервуара [Rutter et.al., 1971, 1975] максимальной емкостью P_{\max} , пропорциональной индексу развития листьев LAI , меняющегося в вегетационный период от минимального (LAI_{\min}) до максимального (LAI_{\max}) значений [Shroeder et. al., 1994], а *испарение с растительного покрова* (E_L) рассчитывается

пропорционально потенциальной эвапотранспирации ET^0 [Виноградов, 1988,

где N – номер дня, отсчитываемый для Северного полушария с 21 марта.

Для моделирования *стокообразования* с элементарной ландшафтной площадки использована полуэмпирическая модель нумерованных кривых стока, в которой начальная задержка стокообразования пропорциональна величине максимального впитывания почвы v_{\max} при $a \approx 0.2$, которое зависит от ее типа и структуры, а также от ландшафтных условий, обобщенных в величине номера кривой стока CN [USDA, 1985]:

$$C_i = \begin{cases} \frac{(O_S^i - av_{\max})^2}{O_S^i - (1-a)v_{\max}} & \text{при } O_S^i > av_{\max} \\ 0 & \text{при } O_S^i \leq av_{\max} \end{cases} ; \quad O_S^i = O^i - O_L^i + L^i ; \quad CN = \frac{1000}{\frac{v_{\max}}{25.4} + 10}. \quad (6)$$

В зимний период, при промерзании почвы исходный номер кривой стока корректируется, согласно [Schroeder et.al, 1994]. Тестирование данной модели проведено на примере многолетних данных по малым водосборам юго-западной части МАБ – рис. 4.

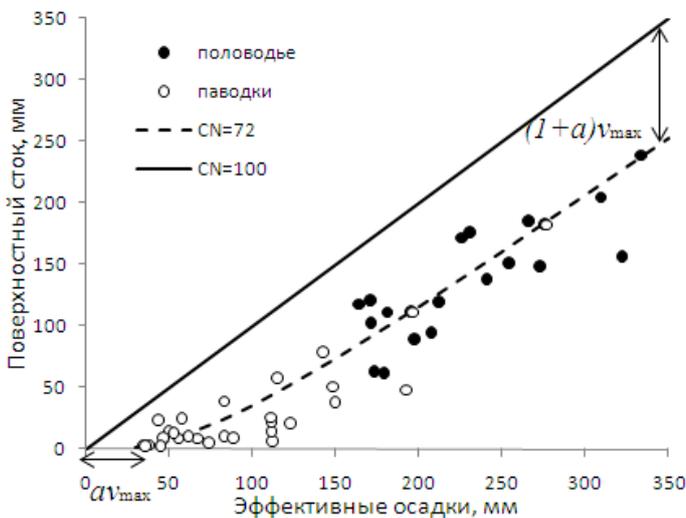


Рис. 4. Пример связи сток-осадки (пост Путынка-Малахово, 1960-2003 гг)

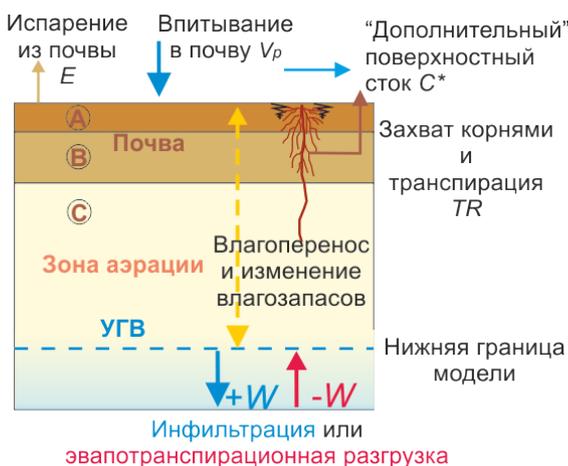
Таким образом, в данном расчетном блоке рассчитывается максимальный «паводковый» сток. При последующем моделировании влагопереноса, исходя из реальной влажности верхнего слоя почвы, может образовываться «дополнительное» стекание влаги, и суммарная величина поверхностного стока определяется по результатам моделирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации.

Результатами вычислений по первому расчетному блоку геогидрологической модели на основе

суточных рядов осадков температуры и солнечной радиации являются следующие воднобалансовые характеристики: испарение с поверхности (E_{LS}); поверхностный сток (C) и доступная для впитывания влага (v_p), которая формирует входной поток на верхней границе модели влагопереноса в зоне аэрации.

Модель водного баланса в зоне аэрации

Водообмен в ЗА моделируется на основе модели одномерной вертикальной



нестационарной насыщенно-ненасыщенной фильтрации от поверхности земли до нижней границы, расположенной ниже УГВ (рис 5), с учетом отбора влаги корнями растений $tr_p(z,t,h)$, которая реализована в программе HYDRUS-1D [Šimůnek et.al., 2009]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (k_w(\omega) \left(\frac{\partial h(\omega)}{\partial z} + 1 \right)) - tr_p(z,t,h); \quad (7)$$

где ω – объемная влажность пород; h – высота давления; k_w – коэффициент влагопереноса.

Рис. 5. Модель водного баланса в ЗА

Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) $h(\omega)$ и кривая влагопроводности $k_w(\omega)$ аппроксимируются уравнениями Ван Генухтена [van Genuchten, 1980].

На нижней границе модели задаются условия 1-го (постоянный УГВ) или 3-го рода, которое моделирует условие дренирования.

Инфильтрационное питание рассчитывается как расход через нижнюю границу q (при постоянном УГВ) или из уравнения, в котором коэффициент водоотдачи μ определяется в зависимости от изменения УГВ ΔZ_g и влажности разреза ω [Шестаков и др, 1982]:

$$w = q + \mu \frac{\partial h}{\partial t}, \text{ при } h \geq 0, \quad \mu = \frac{1}{\Delta Z_g} \int_{Z_g}^{Z_g + \Delta Z_g} (\omega_{\max} - \omega) dz, \quad (8)$$

где ω_{\max} – полная влагоемкость.

Отбор влаги корнями растений представлен дифференцированной в разрезе и переменной во времени функцией, зависящей от глубины z и высоты всасывающего давления влаги h в данном интервале разреза - $tr_p(z, t, h)$. Она распределена в пределах мощности корневой зоны m_r пропорционально относительной плотности корней $b(z)$, и интегральная величина TR_p может изменяться от 0 до величины потенциальной транспирации TR_p^0 [Šimůnek et al., 2009]:

$$tr_p(z, t, h) = TR_p^*(z, t) \psi(h); \quad 0 < z \leq m_r : TR_p^*(z, t) = b(z) TR_p^0(t), \\ z > m_r : TR_p^*(z, t) = 0; \quad (9)$$

Функция $\psi(h)$ характеризует изменчивость транспирационной способности растений в зависимости от влажности почвы (высоты всасывания) и описывается либо моделью Феддеса [Feddes et al., 1974], либо моделью Ван Генухтена [van Genuchten, 1987] (рис.6):

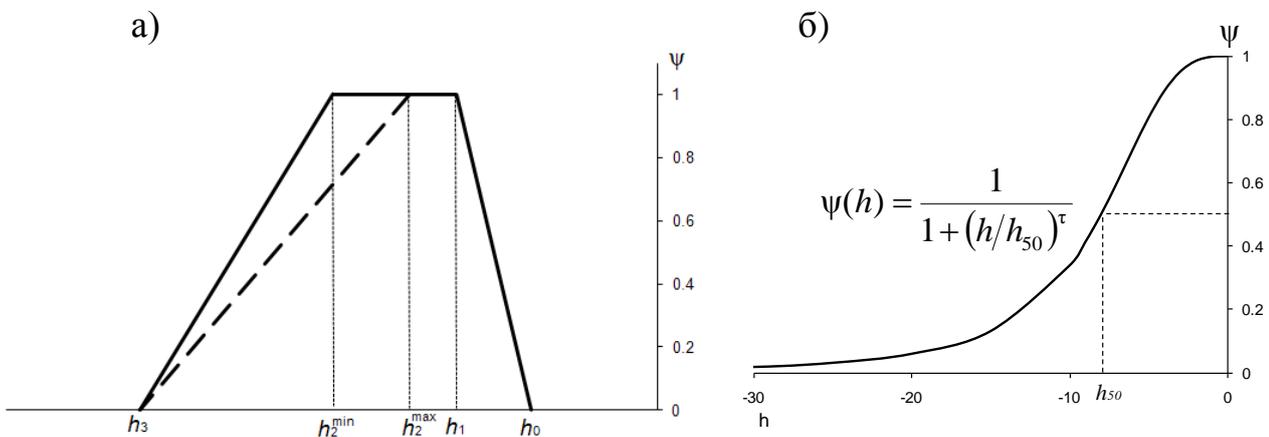


Рис. 6. Модели транспирационной способности растений: а) Феддеса; б) Ван Генухтена

Распределение корней по глубине также описывается двумя моделями [Gale, Grigal, 1987; Hoffman, van Genuchten, 1983] – для мочковатой и стержневой корневых систем.

Модель геофильтрации и ее граничные условия

При наиболее полной структуре геогидрологической модели подземный сток представлен геофильтрационной моделью квазитрехмерной (плоско-плановой) нестационарной напорно-безнапорной фильтрации с условиями жесткого перетекания между отдельными пластами и внутренними источниками-стоками. При локальном или точечном масштабе геогидрологического моделирования геофильтрационная модель

может «вырождаться» в обобщенные показатели условий дренирования грунтового потока и режима УГВ.

Водообмен подземных вод с поверхностными и с атмосферой, включая инфильтрационное поступление влаги или ее отвод посредством эвапотранспирации, представлен внешними граничными условиями геофильтрационной модели и определяет ее основные особенности, заключающиеся в *нелинейности условий внешнего водообмена* потока подземных вод, т.е. его взаимозависимость от процессов в смежных блоках – на поверхности земли и в поверхностных водах.

Инфильтрационный и эвапотранспирационный водообмен подземных вод с атмосферой ($\pm w$) рассматривается с учетом временной изменчивости процессов поступления или отвода влаги, которые, в свою очередь, определяются зависимостью от глубины до УГВ Z_g (напора подземных вод H). При этом на каждом суточном шаге проводится одномерное моделирование условий формирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации, исходя из текущих значений метеорологических характеристик (условий на верхней границе моделей 1-2 блоков) и положения УГВ (по результатам геофильтрационного расчета), определяющего условие на нижней границе модели влагопереноса, для всех выделенных типовых условий питания. «Разрывное» сочленение моделей водного баланса на поверхности земли и в ЗА с геофильтрационным блоком предполагает предварительный расчет ИП для всех типичных условий его формирования при возможном диапазоне изменения УГВ и его описание этой связи уравнением И.С. Пашковского, в котором w_p – постоянная величина ИП при глубоком залегании УГВ, а z_0 и w^0 – константы:

$$w = w_p - (w_p - w^0) \exp\left(-\frac{Z_g}{z_0}\right). \quad (10)$$

Водообмен между подземными и поверхностными водами (ППВ) в едином водно-балансовом цикле геогидрологической модели рассматривается в условиях *взаимовлияния* режима подземных вод и гидрологического режима водотоков и водоемов. При схематизации взаимодействия ППВ следует различать два принципиально различных подхода к описанию гидрологического режима поверхностных вод: *независимый* режим водотока (водоема), при котором изменение расхода взаимодействия ППВ не оказывает значимого влияния на изменение расхода (объема) водотока (водоема); *гидрогеодинамически зависимый* гидрологический режим поверхностных вод, который формируется под влиянием притока-оттока подземных вод.

В естественных условиях гидрогеодинамически зависимым является меженный гидрологический режим в истоках рек при отсутствии транзитного стока. *В нарушенных гидрогеодинамических условиях* (при развитии понижения уровней подземных вод) - когда суммарное сокращение подземного питания поверхностных вод и фильтрационные потери из водотока (водоема) на рассматриваемой площади влияния инженерного сооружения ΔR количественно сопоставимы с меженным расходом водотока $P_{\text{меж}}$ или суммарным расходом поверхностного питания водоема P_v (включая и возможный приток речных вод) с учетом темпа сработки его объема V за период межени $\Delta t_{\text{меж}}$. При этом допустимость представления гидрологического режима поверхностных вод как независимого, определяется соотношениями:

$$\text{для водотока: } \Delta R \ll P_{\text{меж}}, \text{ а для водоема: } \Delta R \ll P_{\text{меж}} + P_v + \frac{V}{\Delta t_{\text{меж}}} \quad (11)$$

На участках эксплуатации подземных вод с дебитом Q_3 можно полагать $\Delta R \approx Q_3$.

Модели взаимодействия ППВ при зависимом гидрологическом режиме водотоков и водоемов

Моделирование гидрогеодинамически зависимого гидрологического режима водотоков и водоемов наиболее актуально на участках береговых водозаборов в долинах малых рек (водоемов). Аналитические расчеты сокращения речного стока при этом рассмотрены в работах Ф.М. Бочевера, В.А. Злотника, С.Я. Концебовского, Е.Л. Минкина, М.М. Черепанского, В.С. Усенко и др. Принципам моделирования формирования зависимого гидрологического режима на основе сочленения моделей геофильтрации с *гидравлическими* моделями речного стока, основанными на уравнении Сен-Венана, посвящены работы С.Н. Антонцева, Г.П. Епихова, М.Г. Хубларяна. Однако на практике гидрогеологических расчетов используются, преимущественно, *гидрологические* модели основанные на уравнении Шези [Лукнер, Шестаков, 1976; Ашкинезер и др., 1987; Гриневский, Штенгелов, 1988; Prudic 1988] или эмпирической кривой расхода, которую удобно представлять в нормированном виде, а сочленение с геофильтрационной моделью при этом проводится на основе уравнения баланса руслового потока.

Численный анализ формирования зависимого гидрологического режима водотока на участке берегового водозабора показывает определенные пространственно-временные закономерности взаимодействия ППВ в различных гидрогеодинамических зонах области влияния эксплуатации (инверсии разгрузки, свободного и подпертого режимов, полного перехвата стока). Различия условий взаимодействия ППВ в этих зонах обуславливают асимметрию развития депрессии напоров и балансовой роли водотока как питающей границы, что необходимо учитывать при прогнозах эксплуатации подземных вод.

Геогидрологическая *модель взаимодействия подземных вод с водоемами* основана на уравнении водного баланса проточного озера и отражает его изменения в условиях эксплуатации подземных вод у его акватории. В ней учитывается изменение глубины и площади акватории водоема, которые определяют условия взаимодействия ППВ и суммарный расход поступающих на поверхность озера осадков и испарения, а также изменение транзитного стока через водоем. Расчетный алгоритм моделирования сочетает интегральную оценку водного баланса водоема и дифференцированный расчет расходов водообмена с подземными водами для отдельных участков акватории, при котором согласование морфометрических характеристик водоема и его баланса на каждом временном шаге достигается итерационно. Водоемы в составе геогидрологической модели сочленяются с общей структурой речной сети на основе уравнения Шези.

Следует подчеркнуть, что представленные в работе модели формирования зависимого гидрологического режима водотоков и водоемов являются оригинальными и существенно отличаются от зарубежных аналогов [Prudic и др., 1988; 2004; Cheng, Anderson, 1993; Merritt, Konikow, 2000], которые разрабатывались в то же время. В частности, авторская гидрологическая модель водотока использует нормированный по характерным значениям принцип описания сезонной динамичности поверхностного питания рек и кривой расхода [Гриневский, Штенгелов 1988], а модель водоема учитывает изменение площади его

акватории внутри элементарного блока модели [Гриневский, 2003]. Авторские модели, реализованные в расчетных программах «Речка» и MCG, апробированы при оценке ЭЗПВ Пермилковского и Пачужского месторождений в Архангельской области (глава 6).

Типизация геогидрологических моделей

В зависимости от целей и задач геогидрологического моделирования и пространственных границ модели целесообразно выделять четыре ее характерных масштаба – региональный (бассейновый), средний (водосборный), крупный (ландшафтный) и локальный (точечный) - табл. 1.

Как следует из анализа структуры геогидрологической модели и содержания ее отдельных блоков, наименее разработанной и наиболее вариативной частью, требующей также обоснования параметрических характеристик отдельных процессов, является модуль формирования ИП, включающий блоки водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации. Отсюда следуют основные направления исследования по разработке и использованию геогидрологических моделей различного масштаба для оценки ресурсов подземных вод.

Глава 3. Обоснование параметров модели формирования ИП

Обоснование параметров и граничных условий модели формирования ИП проводится на примере природных условий Центральных регионов РФ, главным образом, юго-западной части МАБ.

Граничные условия модели инфильтрационного питания

Условие на *верхней границе* модели ИП формируют метеорологические характеристики (осадки, температура воздуха, его влажность и солнечная радиация). Для расчетов среднесуточных величин ИП необходимая длительность рядов метеоданных должна составлять не менее 30-35 лет, с учетом того, что при неизвестном начальном распределении влажности в ЗА, в среднем, первые 5-10 лет должны быть исключены из анализа. При отсутствии рядов необходимой длительности, а также отдельных видов наблюдений используются метео-генераторы [Richardson, Wright, 1984] или расчетные значения [Allen, 2001]. Для моделирования среднесуточного ИП достаточно суточной дискретности метеоданных. Как показали результаты сопоставительных расчетов, уменьшение дискретности исходных метеоданных (их сглаживание и уменьшение дисперсии) существенно влияет на расчетные показатели среднесуточного водного баланса на поверхности земли и в ЗА, независимо от ландшафтных условий, строения ЗА и глубины УГВ. В то же время учет внутрисуточной вариации метеоданных значимо сказывается на расчетных значениях ИП только при глубине УГВ до 1 м. Это объясняется тем, что в условиях гумидного климата определяющими для формирования впитывания влаги и стокообразования являются процессы снеготаяния, а вероятность выпадения жидких осадков высокой интенсивности мала. При этом внутрисуточные вариации температуры и радиации практически не влияют на суточные величины потенциальной эвапотранспирации. Использование стандартных данных метеостанций предполагает их «ландшафтную» однородность; при этом микроклиматические различия учитываются соответствующими параметрами моделей (коэффициенты стока, затененности, развития растительности и др.).

Таблица 1. Типизация геогидрологических моделей

Характеристика модели		Геогидрологическая модель			
		Бассейновая, региональная	Водосборная	Ландшафтная	Точечная
Масштаб		мелкий	средний	крупный	точечный
Картографическая основа		1:200 000 – 1:100 000	1:50 000 – 1:25 000	1:10 000 – 1:1000	-
Площадь		>2000 км ²	10 ² – 10 ³ км ²	1 – 10 ⁴ м ²	1 - 10 м ²
Область моделирования		бассейн крупной реки	бассейн малой реки, водосбор, область влияния инженерного сооружения	типичный ландшафт	опытная площадка
Типичные задачи моделирования		региональная оценка ИП и ЕРПВ, региональный прогноз водохозяйственной деятельности	оценка ЭЗПВ, прогноз поверхностного загрязнения ППВ, геоэкологические прогнозы	экологические прогнозы, построение карты ИП и защищенности грунтовых вод	формирование ИП, оценка параметров влагопереноса, прогноз миграции вещества в ЗА
Блок модели	Характеристика				
Водный баланс на поверхности	Метеоклиматические условия	неоднородные, многолетние	однородные, многолетние		однородные, эпизодические
	Ландшафтные условия	неоднородные по типу, однородные по рельефу	неоднородные по типу, рельефу и экспозиции	однородные, типичные	однородные, фактические
Зона аэрации	Строение	3-х слойное: горизонты А, В; С	3-х (4-х) слойное: горизонты А, В; С ₁ , (С ₂)	3-х слойное: горизонты А, В, С	многослойное
	Водно-физические параметры	типичные, планово-неоднородные	типичные, планово-неоднородные	типичные, планово-однородные	опытные, вертикально неоднородные
Геофильтрационный	Схематизация гидрогеологического разреза	квазитрехмерная, многопластовая	одно- двух- пластовая, с перетеканием на подошве	одномерный (латеральный или вертикальный) поток	-
	Параметры	пространственно-неоднородные, средние	пространственно-неоднородные, опытные	обобщенные	-
	Условие на верхней границе	среднегголетнее ИП $W_0 = f(x, y, t, Z_g^0)$	ИП $W = f(x, y, t, Z_g)$	среднегголетний УГВ $Z_g^0 = f(t)$	фактический УГВ $Z_g = f(t)$
Взаимодействие ППВ	Гидрологический режим	независимый, среднегголетний $H_r = f(x, y)$ или сезонный $H_r = f(x, y, t)$	зависимый, внутриггодовой $H_r = f(x, y, t, H)$ $P = f(x, y, t, H)$	-	-
Техногенное воздействие	Принцип схематизации	обобщенная схема техногенной нагрузки	схема и параметры инженерного сооружения	общая направленность воздействия	-

Вместе с тем, на примере юго-западной части МАБ показано, что при построении региональных геогидрологических моделей необходимо учитывать даже относительно незначительные внутризональные различия климатических условий, которые выявляются методами статистического анализа данных по разным метеостанциям территории. В этом случае обоснование представительных метеоданных для различных речных бассейнов территории обосновываются на основе их корреляционных связей с характеристиками речного стока.

Нижняя граница модели ИП в общем случае характеризуется переменным во времени УГВ. В полномасштабной геогидрологической модели это условие формируется в геофильтрационном блоке, а в локальной – по фактическим данным. Результаты сопоставительного моделирования показывают, что внутригодовые колебания УГВ влияют на формирование ИП при средней глубине уровня менее 3-4 м. Это означает, что при больших глубинах УГВ расчеты ИП можно проводить при его постоянном положении (условие 1-го рода). При малых глубинах, при отсутствии фактических данных и неопределенных количественных характеристиках дренирования грунтового потока, что характерно для ландшафтных моделей, предлагается 2-х этапный расчет: 1) оценка расхода ИП при постоянном УГВ; 2) задание этого постоянного расхода на нижней границе (2 род) и добавление на ней фиктивного слабопроницаемого слоя, параметры перетока через который подбираются из условия соответствия расчетного переменного УГВ необходимому среднегодовому положению.

Параметры модели трансформации осадков

Расчетная модель водного баланса на поверхности земли характеризуется параметрами развития растительности и задержания ею осадков, снеготаяния и образования поверхностного стока.

Характерные значения индекса развития различных типов растительности и его сезонной динамики (LAI) обоснованы с использованием мировой базы данных [Scurlock, 2001] а параметры снеготаяния (β), в зависимости от типа ландшафта поверхности - на основе анализа опубликованных данных (Н.А. Воронков, И.С. Пашковский, А.Н. Гельфан, G. Jost и др.) и материалов наблюдений на воднобалансовых станциях Московской области «Звенигород» и «Малая Истра». Анализ чувствительности модели ИП к возможным вариациям параметров LAI и β показал, что соответствующие изменения среднегодового ИП незначительны (1-5 мм/год) – это определяет возможность использования их средних величин для соответствующих ландшафтных условий (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные значения индекса развития листьев и коэффициента стаивания для разных типов ландшафта

Тип ландшафта	LAI		Коэффициент стаивания, β (мм/сут град)	
	LAI_{min}	LAI_{max}		
Луг	0	2		
Пашня	0	5		
Поле в целом	0	3	2	6
Смешанный лес	2	8	1,5	3,5

Роль *макрорельефа* (холмистого и полого-холмистого) в формировании ИП проанализирована на имитационной модели, в которой рассмотрены различные участки (вершина, средняя часть, подножье) пологого ($<5^\circ$) и крутого ($5-10^\circ$) склона разной экспозиции, при различном характере растительности, почвенного покрова, составе пород ЗА и глубине УГВ. Моделирование при климатических условиях юго-западной части МАБ проведено с использованием данных о перераспределении эффективных осадков и испаряемости в зависимости от характера рельефа [Романова, 1977]. Результаты моделирования показывают весьма существенное влияние рельефа и экспозиции склонов на среднееголетние величины ИП (рис. 7), которое сильнее проявляется на открытых склонах с травянистой растительностью. В целом, величины среднееголетнего питания снижаются от верхних – к средним, наиболее крутым частям склона, где при южной экспозиции могут формироваться условия эвапотранспирационной разгрузки подземных вод. В подножье склона влияние типа почвы и растительности на формирование ИП проявляется максимальным образом: при северной экспозиции здесь формируются участки повышенной инфильтрации, а на открытых травянистых участках южной экспозиции – эвапотранспирационная разгрузка подземных вод. С увеличением крутизны склона неоднородность среднееголетнего ИП более выражена.

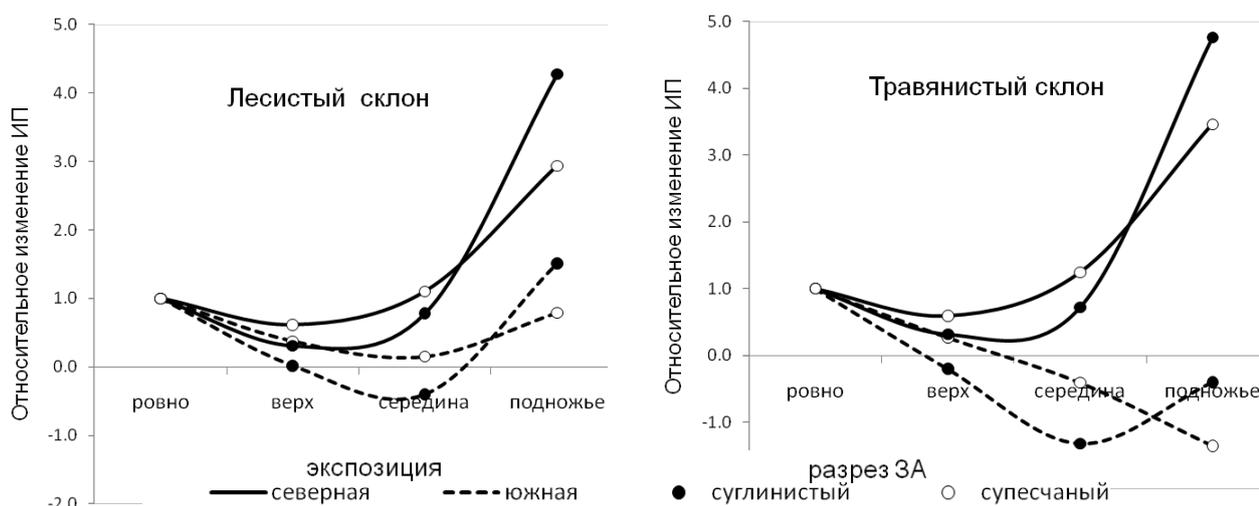


Рис. 7. Различия среднееголетнего ИП на склоне

Однако обусловленная макрорельефом неоднородность ИП проявляется лишь при крупном масштабе моделирования. С уменьшением масштаба модели (при площади бассейна $\geq 200 \text{ км}^2$) доля площади склонов мала, а их участки различной экспозиции распределены относительно равномерно. Таким образом, при средне- и мелкомасштабных оценках ИП, его неоднородность за счет рельефа и экспозиции склонов становится «внемасштабной».

Модельный анализ показал высокую чувствительность среднееголетних расчетных величин поверхностного стока и ИП к *параметрам стокообразования* (CN) при характерном диапазоне их вариации [Schroeder et.al., 1994] в зависимости от ландшафтных и почвенных условий, особенно при суглинистом составе ЗА (рис. 8), что требует их калибровки. Она проводится на основе расчетных связей элементов среднееголетнего водного баланса с величинами CN (рис. 8) путем сопоставления фактических величин поверхностного стока C_f , (по расчленению гидрографа) с расчетными C_p , которые для

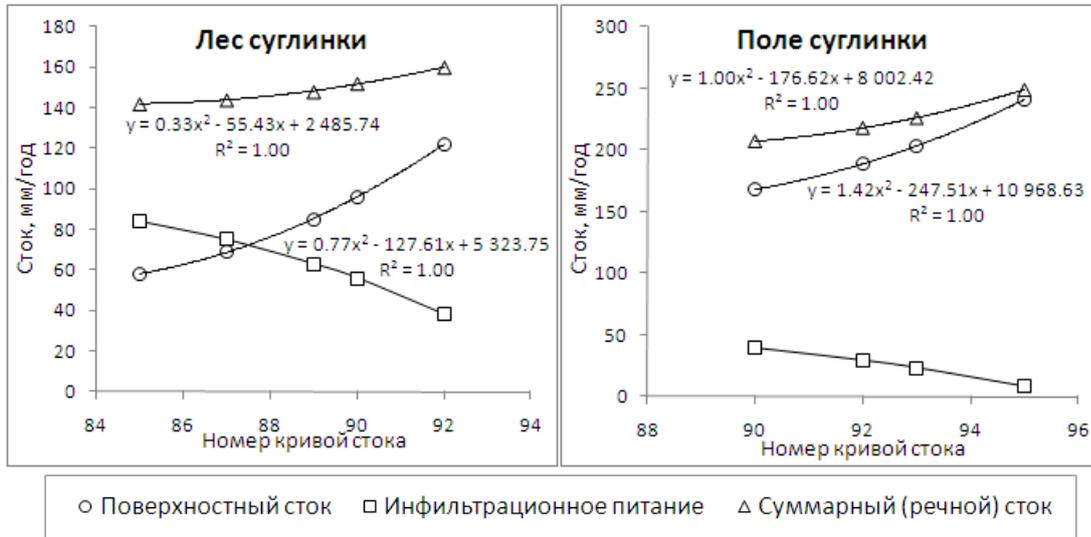


Рис. 8. Чувствительность расчетных элементов водного баланса к вариациям CN водосбора площадью F с N -различными ландшафтными условиями оцениваются как:

$$C_p = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^N C_i(CN_i) f_i ; CN_i^{\min} \leq CN_i \leq CN_i^{\max} ; (C_p - C_\phi) \rightarrow 0 , \quad (12)$$

где $C_i(CN_i)$ – расчетное значение поверхностного стока, в зависимости от номера кривой CN_i для типового ландшафта i площадью f_i , а CN_i^{\min} и CN_i^{\max} – пределы возможной вариации номера кривой стока. При мелкомасштабных оценках ИП калибровка параметров поверхностного стокообразования проводится поэтапно: сначала калибруются значения CN по малым водосборам с минимальной неоднородностью ландшафтных условий, а на втором этапе – крупные речные бассейны ($F > 1,5-2$ тыс. км²) в границах которых происходит практически полное дренирование зоны интенсивного водообмена [Зекцер, 1977; Пашковский, 2001]. В этом случае для калибровки, аналогично (12), используются фактические среднемноголетние величины речного стока, а расчетные являются суммой среднемноголетних значений поверхностного стока и инфильтрации. Использование для калибровки данных по речному стоку является предпочтительным, поскольку они интегрально характеризуют как поверхностную, так и подземную ветви водообмена. Проведенная таким образом калибровка параметров стокообразования для юго-западной части МАБ (глава 4) показала ее эффективность.

Параметры модели влагопереноса в зоне аэрации

Схематизация строения ЗА и ее параметрическая характеристика, а также параметризация модели транспирационного отбора влаги корнями растений при локальном масштабе моделей требует фактических данных и лабораторных определений. Другие масштабы геогидрологической модели объективно не могут быть обеспечены параметрами ЗА, что определяет необходимость ее схематизации, отражающей основные закономерности водно-балансовых процессов в ЗА с учетом ее пространственной неоднородности, и обоснования типовых расчетных параметров моделей.

Схематизация строения и водно-физических параметров ЗА проведена на основе анализа опубликованных характеристик по различным интервалам почвенных разрезов (>200) при различном типе растительности на поверхности для условий средней полосы России [Роде, 1965, Субботин, 1966, Вериго, Разумова, 1973; Федоров, 1977 и др.], а также

результатов поинтервального опробования и лабораторного определения ОГХ разрезов ЗА на 2-х ландшафтных площадках (лесной и полевой) Звенигородского полигона и базы данных USDA. Расчет параметров аппроксимации кривых ОГХ и влагопроводности уравнениями Ван Генухтена проведен на основе их функциональных связей с грансоставом и водно-физическими свойствами [Schaap et.al., 2001]. На основе анализа изменчивости водно-физических свойств почвенного покрова и подстилающих коренных пород с глубиной, разрез ЗА схематизируется тремя расчетными интервалами, отвечающими основным генетическим почвенным горизонтам – А, В и С. При этом кривые ОГХ и влагопроводности практически не зависят от генетического типа почвы, а в гораздо большей степени определяются литологическим составом почвообразующих пород. Для верхнего интервала (горизонт А) параметры влагопереноса определяются также и типом ландшафтных условий на поверхности земли, в связи с чем характер кривых ОГХ и влагопроводности отличается от характерных зависимостей для соответствующего литологического типа пород. Для более глубоких интервалов разреза ЗА форма кривых ОГХ и влагопроводности определяется только литологическим составом отложений.

На основе обобщения результатов расчета параметров ОГХ для различных почвенных разрезов обоснованы их средние значения для 3-х выделенных интервалов разреза ЗА, в зависимости от литологического состава отложений (а для верхнего – и от типа растительности), и оценена их вариация. Результаты моделирования ИП в различных ландшафтных условиях показывают, что возможная вариация параметров влагопереноса незначительно влияет на расчетные величины среднемноголетней инфильтрации - в большинстве случаев изменяя их менее, чем на 5-7 мм/год (< 5-10%). Это позволяет использовать полученные параметры влагопереноса, характеризующие основные интервалы разреза ЗА при их разном литологическом составе, для моделирования процессов формирования ИП.

Параметризация модели *транспирационного отбора влаги корнями растений* проведена на основе анализа природных закономерностей этого процесса в различных условиях [Судницын, 1979] и различных подходов к параметрическому обеспечению транспирационных моделей (рис. 6) [Feddes, Raats, 2004; Новак, 1990; Novak, Navrila, 2006, Li et. al., 2006; Chen et. al., 2008 и др.]. При этом по результатам сопоставительного моделирования оценивалась чувствительность расчетного среднемноголетнего ИП к возможным вариациям типовых параметров. Проведенные исследования показали возможность использования обобщенных параметров транспирационных моделей при расчетах влагопереноса в зоне аэрации, когда опорные значения транспирационных функций (рис. 6) определяются на основе ОГХ.

Модель Феддеса наиболее полно описывает изменчивость транспирационной способности растений в зависимости от влажности почвы и вариации климатических условий. Однако эта модель характеризуется большим числом параметров, к которым чувствительны результаты оценки инфильтрации, что требует их экспериментального определения. Более практичным является использование транспирационной модели Ван Генухтена, в которой параметр h_{50} , характеризующий высоту всасывания и соответствующую влажность почвы ω_{50} , при которой транспирационная способность растений падает вдвое (рис. 6), следует определять по ОГХ из условия [Li et. al., 2006]:

$$\sqrt{h^* \omega^*} = 0.5 \overline{TR_p^0} ; h^* = \frac{h_{50} - h_{\epsilon 3}}{h_{нв} - h_{\epsilon 3}} ; \omega^* = \frac{\omega_{50} - \omega_{\epsilon 3}}{\omega_{нв} - \omega_{\epsilon 3}}, \quad (13)$$

где $\omega_{нв}$ и $\omega_{\epsilon 3}$ – наименьшая влагоемкость и влажность завядания, а $h_{нв}$ и $h_{\epsilon 3}$ – соответствующие значения высоты всасывающего давления, а $\overline{TR_p^0}$ – относительная изменчивость потенциальной транспирации за период вегетации. Использование в расчетной модели $\tau = 2$ для древесной и $\tau = 4$ – для травянистой растительности отражает разную крутизну кривых, что отвечает фактическим закономерностям [Судницын, 1979].

В целом, чувствительность расчетных величин ИП к параметрам модели транспирационного отбора влаги корнями растений снижается при облегчении механического состава почвы от суглинистого к песчаному, как в абсолютных, так и в относительных величинах, при этом наиболее чувствительны результаты – к параметрам функции распределения плотности корней по глубине.

Таким образом, результаты исследований, охарактеризованных в данной главе работы, позволили количественно обосновать расчетные параметры и граничные условия модели ИП при различных природных условиях его формирования для проведения средне-мелкомасштабного геогидрологического моделирования.

Глава 4. Примеры построения и использования геогидрологических моделей для оценки ИП и ресурсов подземных вод в разных масштабах

Оценка ИП и ЕРПВ юго-западной части МАБ

Рассматриваемая территория в границах Калужской области и смежных речных бассейнов рек Оки и Десны, общей площадью 49 600 км², относится к краевой зоне регионального питания МАБ. Ее районирование по условиям формирования ИП проведено с использованием данных по 6-ти метеостанциям Калужской области, топографических карт, почвенных атласов и карт строения и состава пород ЗА и глубин УГВ масштаба (1:200 000) [Селезнева, 2000], по результатам которого выделены группы типовых условий (рис. 2). С использованием многолетних (свыше 50 лет) суточных рядов метеоданных проведено моделирование формирования водного баланса на поверхности земли и в ЗА на соответствующих ландшафтных геогидрологических моделях при их типовых параметрах и рассчитаны среднееголетние значения ИП и их зависимости от глубины УГВ $w(Z_g)$, которые хорошо описываются уравнением (10).

Итоговая карта среднееголетнего ИП юго-западной части МАБ, отвечающая масштабу 1:100 000 (рис. 9) построена путем сочленения отдельных фрагментов территории в границах опорных речных бассейнов, метеорологические условия которых охарактеризованы по данным соответствующей метеостанции. При этом учтено, что определенные сочетания ландшафтных, почвенных и гидрогеологических условий обуславливают незначительные различия значений среднееголетнего ИП, что позволяет объединить их в единую провинцию, представленную на карте соответствующим цветом и охарактеризованную диапазоном изменчивости ИП. Более детально они характеризуются средневзвешенной по площади величиной среднееголетнего ИП и параметрами кривых $w(Z_g)$, которые можно использовать и в прогнозных целях. На городских территориях техногенное ИП рассчитано пропорционально суммарному водопотреблению.

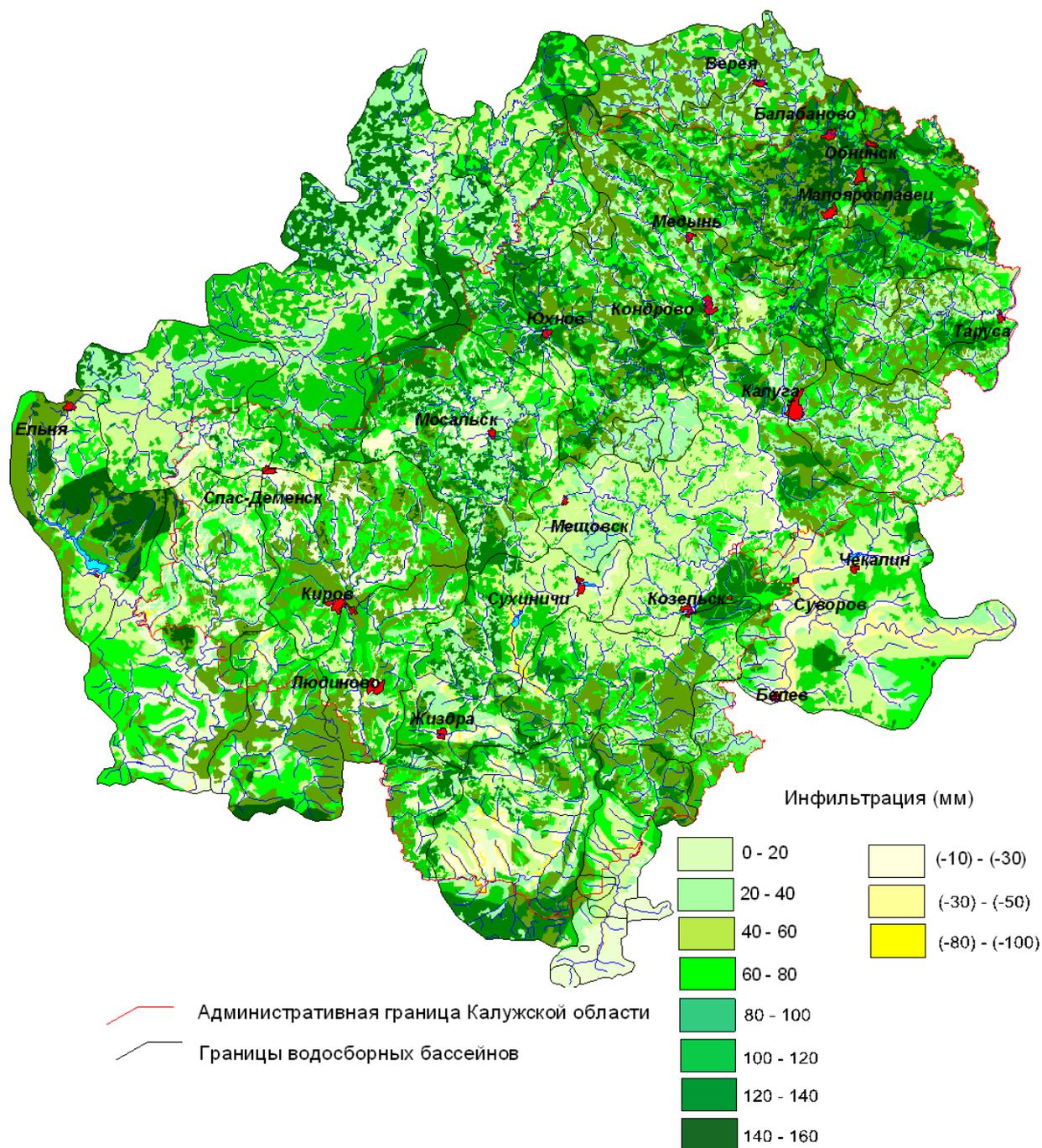
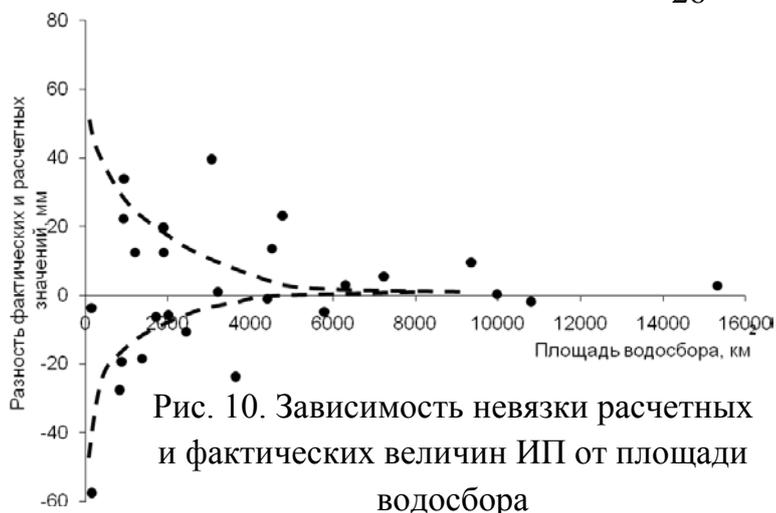


Рис. 9. Карта среднегогодового ИП юго-западной части МАБ

Верификация расчетных значений среднегогодового ИП проведена сопоставлением фактических (по стационарным постам) и расчетных величин поверхностного и суммарного речного стока для опорных речных бассейнов разного порядка. Невязка расчетных величин среднегогодового ИП и фактических значений слоя подземного стока связана с неполнотой дренирования малых бассейнов и закономерно уменьшается с увеличением площади водосбора (рис. 10). В целом, для рассматриваемой территории различия ландшафтных, почвенных и гидрогеологических условий обуславливают неоднородность среднегогодового ИП от 0 до 160 мм/год; при этом участки речных долин с малыми глубинами УГВ характеризуются условиями эвапотранспирационной разгрузки подземных вод ($w < 0$). При этом только за счет микроклиматической зональности средние величины ИП подземных вод на рассматриваемой территории меняются с юга на север от 60 до 100 мм/год.



В своих средних величинах полученные величины средне-многолетнего ИП соответствуют модульным характеристикам естественных ресурсов, полученных по межennaleму стоку рек [Лебедева, 1972 и др.] Это подтверждает достоверность проведенной региональной оценки ИП на основе разработанной методики гео-гидрологического моделирования. По результатам проведенной оценки

суммарный расход ЕРПВ юго-западной части МАБ составляет 8811,2 тыс. м³/сут. Доля эвапотранспирационной составляющей в общем расходе разгрузки потока подземных вод составляет при этом ≈5% (383,4 тыс. м³/сут), достигая по отдельным речным бассейнам на юге территории 12-15%. Эта составляющая ЕРПВ остается за рамками традиционного гидролого-гидрогеологического метода, в то время как при определенных условиях ее оценка является практически значимой. На основе многолетних расчетных значений питания, полученных методами гео-гидрологического моделирования, оценку ИП и ЕРПВ можно проводить с различной обеспеченностью (вероятностью превышения).

Оценка распределения ЕРПВ в разрезе зоны интенсивного водообмена

Методика гео-гидрологического моделирования формирования ИП, в сочетании с гидрометрическими методами, позволяет провести оценку ЕРПВ балансово-незамкнутых площадей или в условиях ее неполного дренирования гидросетью, что характерно для среднемасштабных исследований, а также количественно охарактеризовать относительное распределение ЕРПВ в разрезе зоны интенсивного водообмена.

В таких условиях проведена **оценка ИП и ЕРПВ для территории поисково-разведочных работ для водоснабжения г. Смоленска**. Разрез зоны интенсивного водообмена на рассматриваемой территории, представляющей собой частный водосбор верхнего течения р. Днепр площадью 1660 км², представлен мощной (до 100 м) толщей четвертичных отложений, включающей несколько водоносных и разделяющих моренных горизонтов, и нижележащим средне-верхнефаменским водоносным комплексом, который используется для централизованного водоснабжения. Ее дренирование осуществляется, главным образом, р. Днепр, а малые реки дренируют только верхние четвертичные водоносные горизонты. В таких условиях, учитывая большой среднемеженный транзитный расход р. Днепр (37,5 м³/с), оценка ЕРПВ не может быть проведена по данным гидрометрических работ, в связи с чем использована методика гео-гидрологического моделирования – на основе районирования территории по условиям ИП и проведения соответствующих расчетов на ландшафтных моделях.

В результате моделирования условий формирования водного баланса в различных ландшафтно-гидрогеологических условиях проведена оценка средне-многолетнего ИП и построена соответствующая карта, отражающая его пространственную неоднородность (0-170 мм/год). Расчетное значение модуля средне-многолетнего речного стока (6,3 л/с км²),

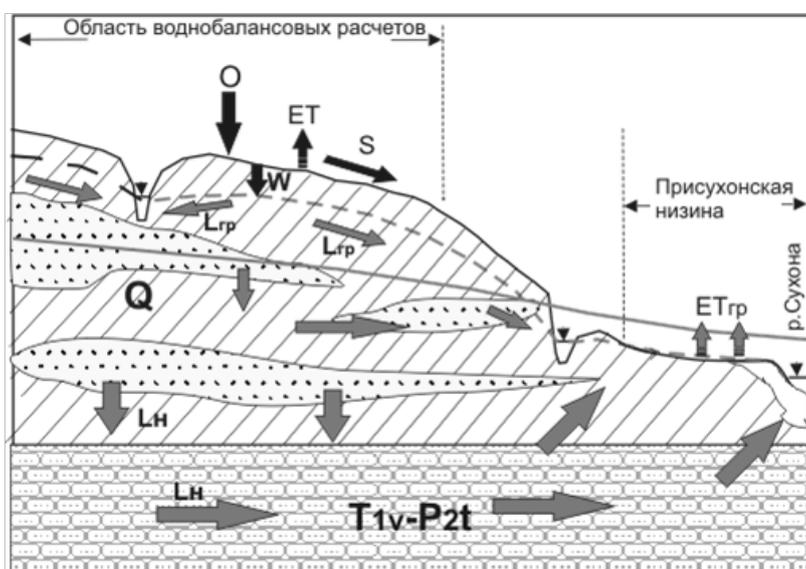
полученное для данной территории, соответствует фактическому значению по посту в г. Смоленск, что является критерием адекватности интегральных расчетных показателей водного баланса природным условиям. Суммарная величина ЕРПВ, формирующихся на площади поисково-оценочных работ, характеризуется средневзвешенным по площади ИП 87 мм/год, что отвечает суммарному расходу 5,9 м³/с и модулю подземного стока 3,6 л/с км². Эти значения существенно превышают региональную величину модуля подземного стока 2-2,5 л/с км², которая характеризует только подзону дренирования местной эрозией сетью [Лебедева, 1972].

Используя среднемеженную величину модуля подземного стока 2,18 л/с км², полученную по данным гидрометрических работ на малых реках территории [Алабян и др., 2010] и характеризующую «местный» подземный сток четвертичных водоносных горизонтов, рассчитана доля глубокой составляющей питания, формирующая подземный сток средне-верхнефаменского водоносного комплекса – табл. 3, которая, в среднем, составляет порядка 39% от суммарного ИП. Однако по отдельным речным водосборам территории эта величина меняется от 5 до 80%, что характеризует различия строения гидрогеологического разреза, и эти величины питания нижних интервалов разреза являются количественной основой для калибровки гидрогеодинамической модели территории.

Таблица 3. Расчетные величины ИП и ЕРПВ на территории поисково-оценочных работ

	Расход,		Модуль, л/с км ²	Слой, мм
	м ³ /с	тыс.м ³ /сут		
Естественные ресурсы (суммарное питание)	5,9	509,2	3,57	113
«Местный» подземный сток	3,6	311,1	2,18	69
«Глубокий» подземный сток (глубокая составляющая питания)	2,3	198,1	1,39	44

Еще одним примером *оценки ЕРПВ* и их относительного распределения в разрезе пластовой водоносной системы на основе геогидрологического моделирования являются



работы, выполненные в бассейне р. Вологда для оценки перспектив использования подземных вод этой площади для организации централизованного водоснабжения. Зона интенсивного водообмена этой территории, расположенной в верхнем течении р. Сухоны, представлена двухслойной толщей четвертичного (до 80-100 м) и татарско-ветлужского водоносных комплексов. В соответствии с принципиальной схемой формирования водного баланса и подземного стока (рис. 11), ЕРПВ, формирующиеся на

Рис. 11. Схема формирования водного баланса в бассейне р. Вологда

данной территории, не могут быть оценены по приращению расхода р. Сухоны из-за ее большого транзитного расхода, а также в связи неопределенной долей разгрузки подземных вод эвапотранспирацией $ET_{гр}$ в пределах заболоченной Присухонской низменности.

ИП формирует местный грунтовый сток, дренируемый верховьями рек $L_{тр}$, и более глубокую составляющую потока L_n , направленную в сторону региональной дрены – р.Сухоны. Грунтовая составляющая стока и соответствующая ей часть питания оценивается методом расчленения гидрографа речного стока по стационарным водопостам на малых реках, имеющих многолетние ряды наблюдений. Другая часть питания, формирующего

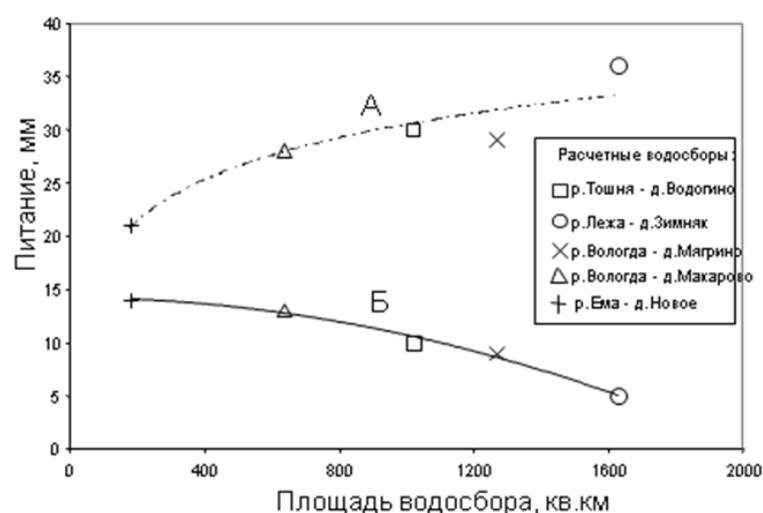


Рис. 12. Зависимость доли питания, формирующего сток четвертичного (А) и татарско-ветлужского (Б) водоносных комплексов, от площади водосбора

более глубокий сток L_n , рассчитана по разности среднегодового ИП, полученного методами геогидрологического моделирования процессов его формирования, и величин $L_{тр}$. Результаты этой оценки показали, что при относительно однородном ИП (35 - 48 мм/год) с увеличением площади водосбора происходит закономерное увеличение доли питания, формирующего подземный сток четвертичных горизонтов $L_{тр}$, и уменьшение его глубокой составляющей – рис. 12.

Количественная характеристика распределения подземного стока в разрезе зоны интенсивного водообмена явилась основой для калибровки региональной геогидрологической модели территории, в результате чего проведена оценка доли эвапотранспирационной разгрузки подземных вод на площади Присухонской низины, которая для данных климатических условий весьма значительна и составляет порядка 20% от суммарного питания – табл. 4.

Таблица 4. Расчетный среднегодовой баланс подземных вод территории

Питание (%)		Разгрузка (%)	
суммарное инфильтрационное	100	в верхнем и среднем течении рек	71
татарско-ветлужского водоносного комплекса	32	в нижнем течении рек и в р.Сухона	10
		эвапотранспирацией в Присухонской низине	19

Изучение формирования инфильтрационного питания на различных ландшафтах

Изучение формирования ИП в различных ландшафтных условиях методами геогидрологического моделирования проведено по данным режимных наблюдений на лесной и полевой водно-балансовых площадках Звенигородского учебно-научного полигона и станции «Малая Истра» (Московская область). Синхронные ряды наблюдений за изменением температуры и всасывающего давления по глубине ЗА, а также динамика глубины до УГВ по скважинам использованы для калибровки модели формирования ИП; при этом поинтервальное определение ОГХ разреза ЗА было проведено на капилляриметре [Бадов, Киселев, 1987]. Результаты моделирования водного баланса сопоставлялись также с данными натурных наблюдений за весенним стоком, почвенным испарением и др.

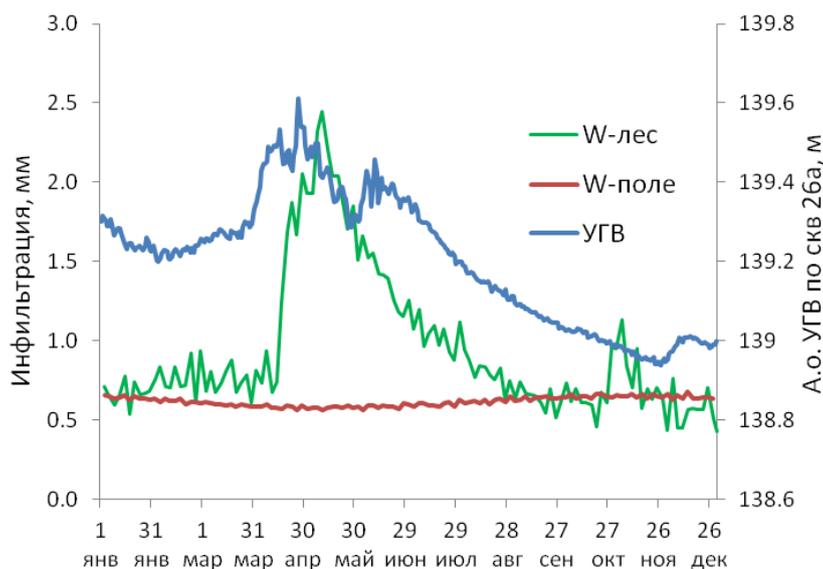


Рис. 13. Среднемноголетние внутригодовые вариации ИП и режим УГВ на лесной (А) и полевой (Б) ландшафтных площадках

Средние за расчетный период (1996-2010 гг) годовые суммы ИП на лесной площадке почти в 2 раза превышают значения в полевых условиях (рис. 13), что по масштабу соответствует результатам ландшафтного моделирования при мелко-масштабных исследованиях, и, учитывая близкое расположение площадок (~100 м), характеризуют влияние типа растительного покрова. Существенно различными являются также и среднемноголетние внутригодовые вариации ИП – рис. 13.

Таким образом, рассмотренные в данной главе примеры геогидрологических моделей формирования водного баланса на поверхности земли и в ЗА для оценки ИП и ЕРПВ доказывают возможность их практического использования в мелком, среднем и крупном масштабах исследования. При мелком и среднем масштабе геогидрологическое моделирование является альтернативой или дополнением традиционного гидролого-гидрогеологического метода оценки ЕРПВ, поскольку: а) позволяет количественно охарактеризовать ландшафтную неоднородность ИП; б) учитывает «эвапотранспирационную» составляющую ЕРПВ; в) характеризует связь среднемноголетнего ИП с глубиной УГВ; г) дает возможность оценивать ИП и ЕРПВ балансово-незамкнутых площадей, а также их распределение внутри гидрогеологического разреза зоны интенсивного водообмена; д) позволяет рассчитывать обеспеченные показатели ЕРПВ произвольной вероятности превышения.

Глава 5. Модельный анализ природных закономерностей формирования инфильтрационного питания и естественных ресурсов подземных вод

Ландшафтные и гидрогеологические закономерности формирования ИП

Роль ландшафтных и гидрогеологических факторов формирования ИП анализируется по результатам моделирования среднемноголетнего водного баланса на поверхности земли и в ЗА на примере природных условий юго-западной части МАБ; при этом результаты

моделирования сопоставлены с опубликованными материалами воднобалансовых наблюдений, что доказывает адекватность расчетов.

В рассматриваемых климатических условиях макро-различия ландшафтных условий на поверхности речных бассейнов максимально проявляются при формировании стока весеннего половодья и обуславливают существенно разные объемы впитывания влаги в почву – как годовых сумм, так и во внутригодовой динамике – рис. 14.

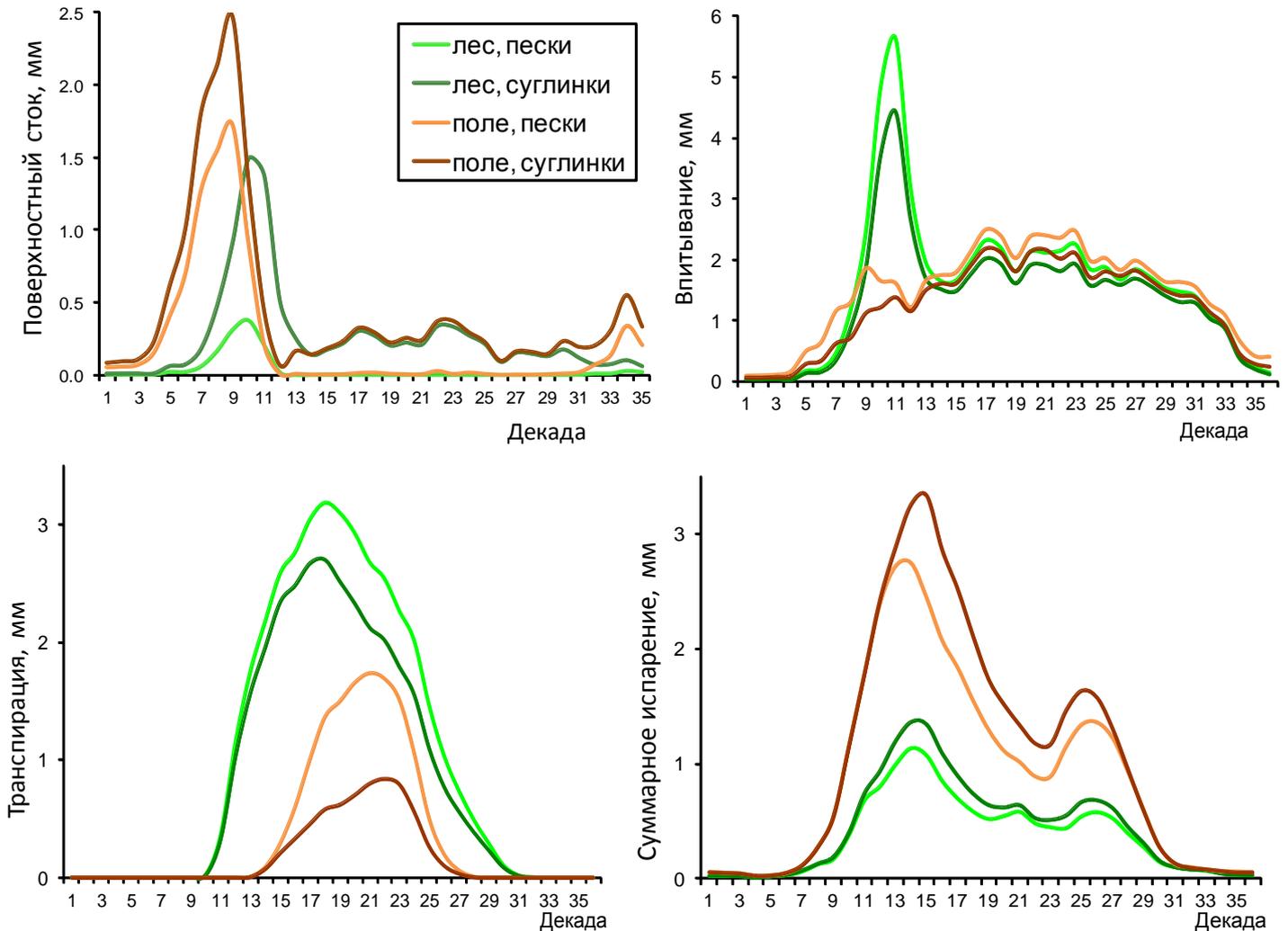


Рис. 14. Среднемноголетняя внутригодовая динамика стокообразования, впитывания влаги в почву, испарения и транспирации в различных ландшафтных условиях

При этом, если в полевом ландшафте основной составляющей суммарной эвапотранспирации является испарение, то в лесном – транспирация (рис. 14). В целом ландшафтные и гидрогеологические условия определяют существенные различия среднемноголетних величин ИП и их связи с глубиной УГВ – рис. 15.

Основными ландшафтными факторами при этом являются тип растительности и почвенного покрова, а гидрогеологическими – глубина залегания УГВ и, в меньшей степени, состав пород ЗА. Лесные природные ландшафты характеризуются более благоприятными условиями формирования ИП, а условия среднемноголетней эвапотранспирационной разгрузки подземных вод наиболее характерны для открытых полевых ландшафтов при суглинистом составе ЗА, где они могут формироваться при глубине УГВ до 3 м. Внутригодовые вариации ИП резко затухают с глубиной УГВ и при его залегании свыше 5 м практически отсутствуют и не влияют на его режим (рис. 16).

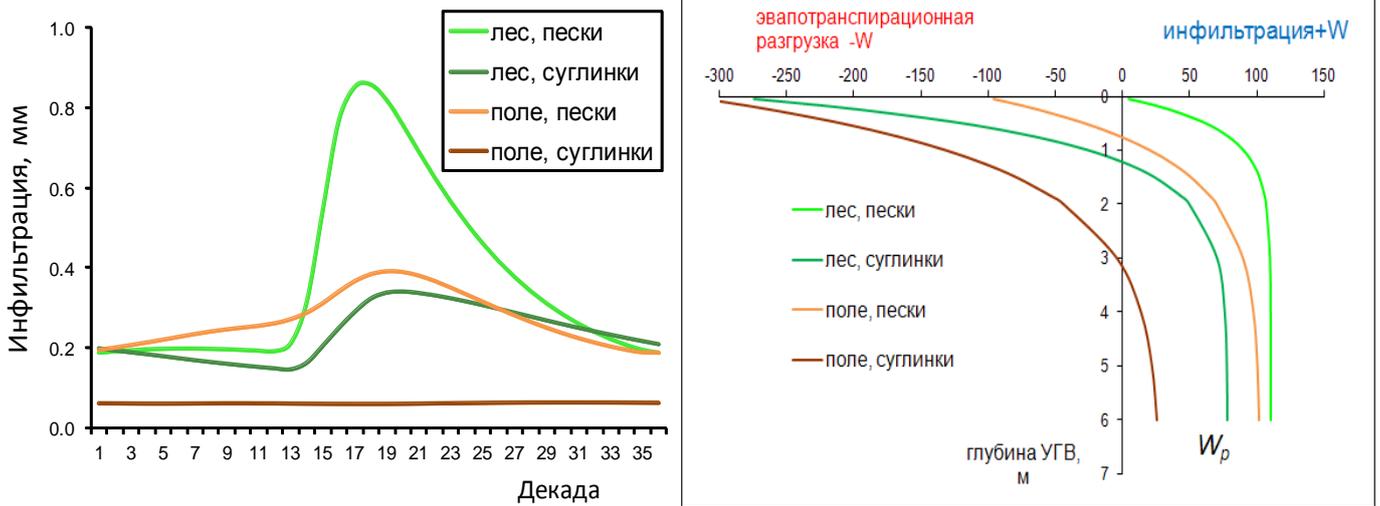


Рис. 15. Среднемноголетняя внутригодовая динамика ИП и его зависимость от глубины УГВ в различных ландшафтных условиях

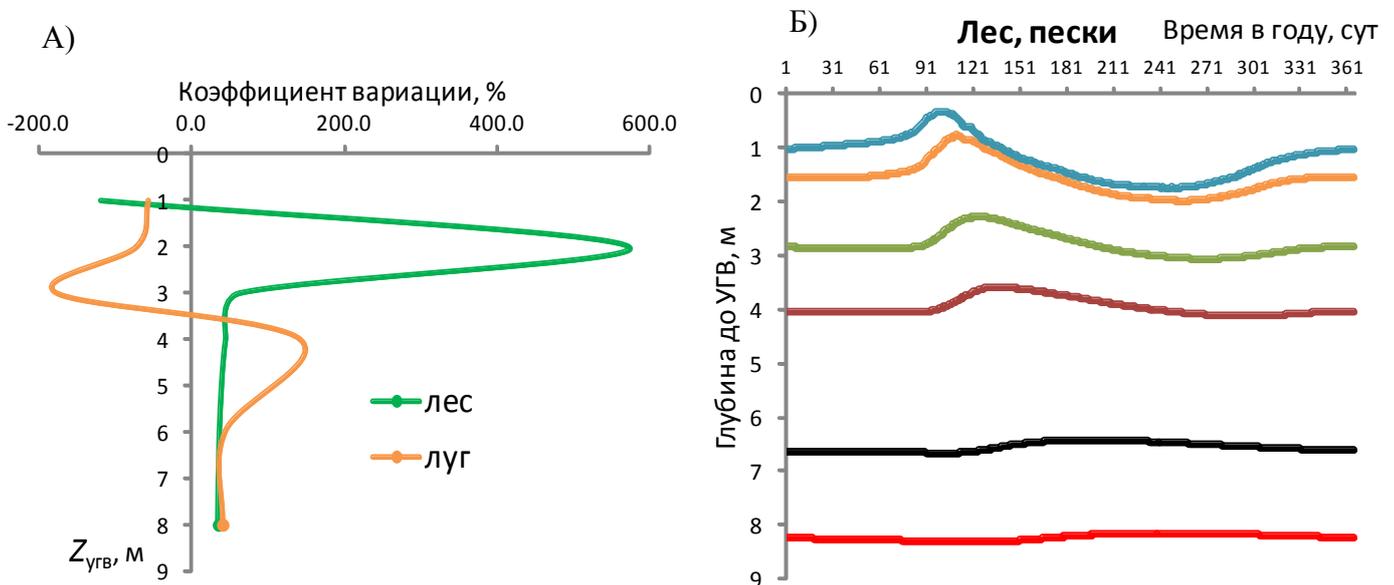


Рис. 16. Зависимость коэффициентов вариации годовых сумм ИП от глубины УГВ (А) и расчетная изменчивость УГВ при различной глубине его залегания (Б) на примере песчаного разреза ЗА

В тоже время *многолетняя* вариация годовых сумм инфильтрации сохраняется при значительных (>10 м) глубинах УГВ и проявляется в их режиме (рис. 17). Это означает, что при глубоком положении УГВ их сезонный режим не связан с «местным» инфильтрационным питанием, а обусловлен изменениями в латеральном потоке (главным образом, уровня дренирования).

В целом, при однотипности климатических условий интегральные соотношения среднемноголетнего стока и эвапотранспирации в границах бассейнов полного дренирования зоны интенсивного водообмена остаются практически неизменными. Для юго-западной части МАБ при различных ландшафтных и гидрогеологических условиях сумма ИП и поверхностного стока составляет 23-30% от осадков, а суммарная эвапотранспирация 70-77%. Ландшафтные и гидрогеологические условия определяют, главным образом, лишь соотношения: а) между поверхностным и подземным стоком (инфильтрацией) и б) между различными составляющими суммарной эвапотранспирации.

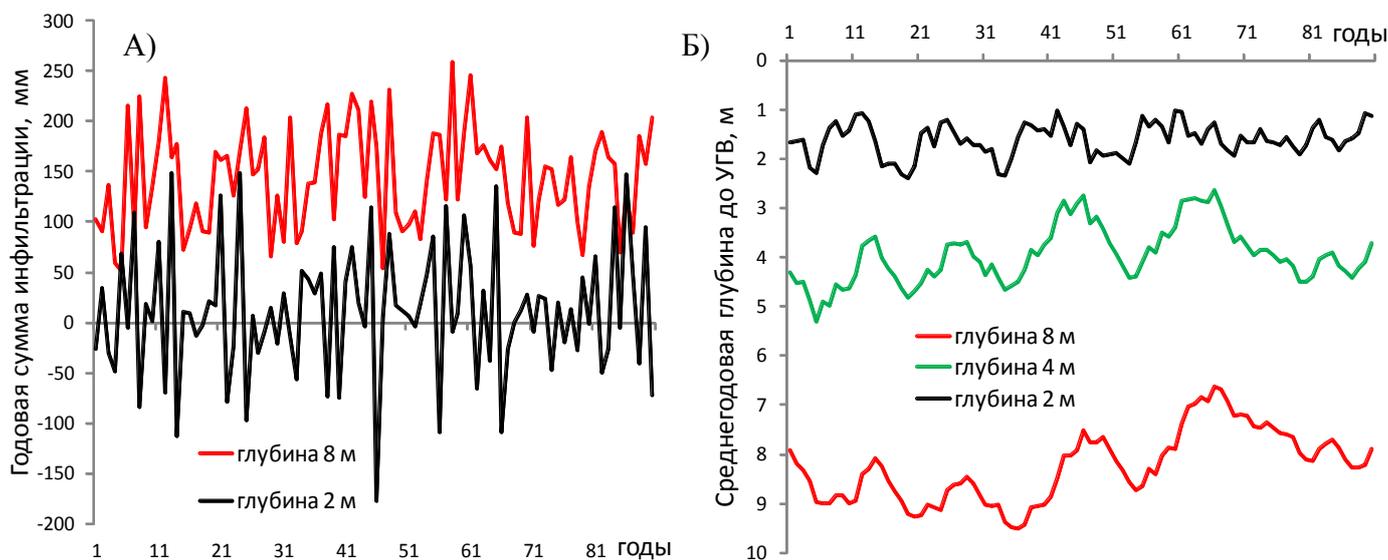


Рис. 17. Многолетние вариации годовых сумм ИП (А) и среднегодовых УГВ (А) при различной глубине их залегания на примере песчаного разреза 3А

Проведенный анализ роли ландшафтных факторов при формировании ИП дает основание говорить об условиях *ландшафтной защищенности грунтовых вод*, а методика средне- мелкомасштабной оценки ИП на основе геогидрологического моделирования может быть эффективно использована для ее количественной характеристики и построения соответствующих карт, поскольку: а) основана на районировании территории по комплексу природных факторов, определяющих защищенность грунтовых вод; б) количественно характеризует природную неоднородность ИП; в) вероятностная (обеспеченная) оценка величин ИП позволяет характеризовать защищенность или уязвимость грунтовых вод с необходимой степенью вероятности (риска); в) ландшафтные геогидрологические модели ИП позволяют более точно оценивать время миграции потенциального загрязнения, в том числе и с учетом его состава и свойств.

Влияние региональных климатических условий на формирование ИП и ЕРПВ

Анализ роли широтной климатической зональности в процессах формирования среднемноголетнего ИП и ЕРПВ проведен для территории Европейской части России на основе ландшафтного геогидрологического моделирования с использованием многолетних суточных рядов метеоданных по 27 станциям.

Интегральное влияние климатических условий на формирование водного баланса описывается связью относительной доли суммарной эвапотранспирации ET с индексом сухости $\varphi = ET^0/O$, являющейся модификацией уравнения М.И. Будыко [Zhang et.al., 2004]. На ее основе можно оценивать региональные соотношения речного стока P и эвапотранспирации ET :

$$\frac{ET}{O} = 1 + \varphi - [1 + \varphi^\eta]^{1/\eta}; \text{ при } O = ET + P, \quad \frac{P}{O} = [1 + (\varphi)^\eta]^{1/\eta} - \varphi, \quad (14)$$

где η – ландшафтный параметр. Неопределенным, однако, при этом остается соотношение между поверхностной и подземной составляющими стока и его изменение в зависимости от климатических условий.

Используя результаты моделирования среднемноголетнего водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации при глубоком положении УГВ (>5 м), были получены

связи коэффициентов поверхностного стока (C/O) и инфильтрации (W/O) с индексом сухости φ для различных ландшафтов и состава зоны аэрации, которые хорошо описываются уравнениями:

$$\frac{W}{O} = \bar{W}^0 \exp(-\gamma\varphi), \quad \frac{C}{O} = \bar{C}^0 \exp(-\beta\varphi), \quad (15)$$

в которых γ и β – «ландшафтные» константы, а $\bar{W}^0 = W^0/O$, $\bar{C}^0 = C^0/O$ – предельные коэффициенты поверхностного стока и инфильтрации при отсутствии эвапотранспирации, сумма которых равна 1 – табл. 5, рис 18.

Таблица 5. Параметры зависимостей коэффициентов поверхностного стока и инфильтрации от индекса сухости

Тип растительности	Состав ЗА	\bar{W}^0	γ	\bar{C}^0	β
ПОЛЕ	пески	0.57	1.49	0.43	1.27
	суглинки	0.48	2.77	0.52	0.68
ЛЕС	пески	0.90	1.83	0.10	1.67
	суглинки	0.77	2.23	0.23	0.44

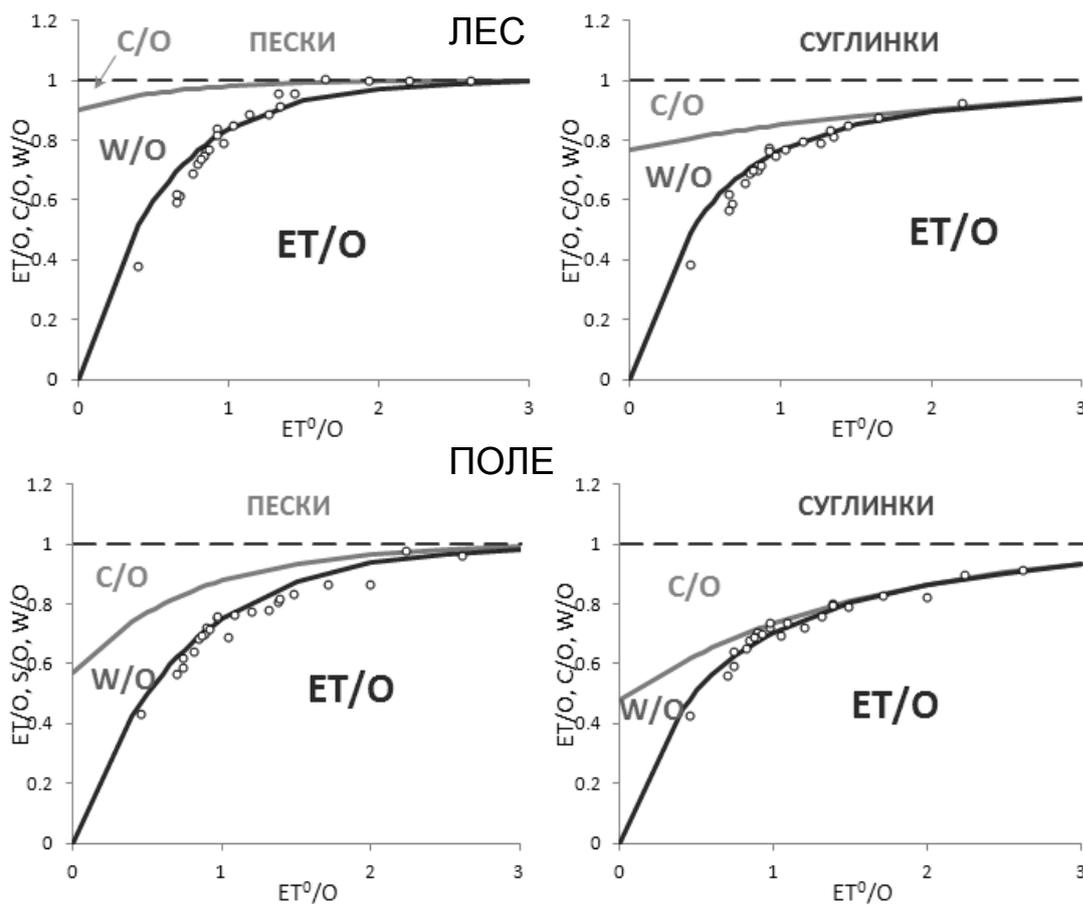


Рис. 18. Расчетные соотношения элементов водного баланса (коэффициентов поверхностного стока, инфильтрации и эвапотранспирации) в различных ландшафтных и климатических условиях

Уравнения (14, 15) определяют соотношения элементов среднегодовалого водного баланса в зависимости от ландшафтных и климатических условий – рис. 18. Если в зоне избыточного увлажнения (при $\varphi < 1$) в условиях лесного ландшафта преобладает подземная составляющая стока, а полевого – поверхностная, то в аридных условиях ($\varphi > 1$) гораздо более существенную роль в перераспределении составляющих речного стока играет состав пород ЗА. При ее суглинистом составе, вне зависимости от типа ландшафта в условиях недостаточного увлажнения подземная составляющая стока и ИП близки к нулю.

Полученные зависимости (15) можно использовать для предварительных региональных оценок коэффициента инфильтрации, учитывая климатические условия и макро- неоднородность ландшафтов на площади речных бассейнов:

$$\frac{W}{O} = \sum_{i=1}^4 \left((\bar{W}^0)_i \exp(-\gamma_i \varphi) \right) \frac{f_i}{F}; \quad F = \sum_{i=1}^4 f_i, \quad (16)$$

где f_i/F относительная площадь каждого типа ландшафта i .

Широтная климатическая зональность закономерно проявляется и в общем характере зависимости среднегодовалого ИП от глубины УГВ: с севера на юг увеличивается критическая глубина УГВ, при которой формируются условия среднегодуальной эвапотранспирационной разгрузки подземных вод, а ИП сокращается до нуля. При этом в аридных и полуаридных условиях наличие растительного покрова и более глинистый разрез ЗА приводят к увеличению этой критической глубины УГВ.

Глава 6. Геогидрологическое моделирование при прогнозах эксплуатации подземных вод

Проведение прогнозного *геогидрологического* моделирования эксплуатации подземных вод является особо актуальной в условиях, когда эксплуатационный водоотбор формируется за счет поверхностных или грунтовых вод. В первом случае это обуславливает необходимость адекватного отражения процессов взаимодействия ППВ с учетом единства их формирования и взаимовлияния, а во втором – требуется учитывать прогнозное «эксплуатационное» изменение условий формирования инфильтрационного питания или эвапотранспирационной разгрузки подземных вод, связанное с понижением УГВ.

Прогнозное моделирование воздействия эксплуатации подземных вод на поверхностные водотоки и водоемы

Апробация авторской геогидрологической модели формирования *зависимого гидрологического режима водотоков* (программа «Речка») проведено при подсчете ЭЗПВ Пермилковского месторождения (Архангельская обл.), расположенного в краевой части Северо-Двинского артезианского бассейна. Его балансовая площадь (свыше 1000 км²) ограничена бассейном верхнего течения р. Ваймуга. Основной водоносный комплекс месторождения приурочен к сильно закарстованным известнякам и доломитам средне-верхнекаменноугольного возраста, а его балансовая площадь ограничена бассейном верхнего течения р. Ваймуга. Интенсивно развитый поверхностный карст и малая мощность четвертичных отложений обуславливают благоприятные условия для местного питания подземных вод и их взаимодействия с поверхностными, выраженного в разнообразных формах - рассредоточенной и очаговой русловой и родниковой разгрузки, а также линейного

и концентрированного (через карстовые поноры) руслового поглощения [Гриневский, Штенгелов, 1988].

Пермиловское месторождение относится к подтипу месторождений в малых речных долинах с ограниченным поверхностным стоком, полностью формирующимся в пределах балансовой площади месторождения. Суммарный дебит прогнозной эксплуатации подземных вод линейными водозаборными системами в долине р. Ваймуга, соизмерим с общими

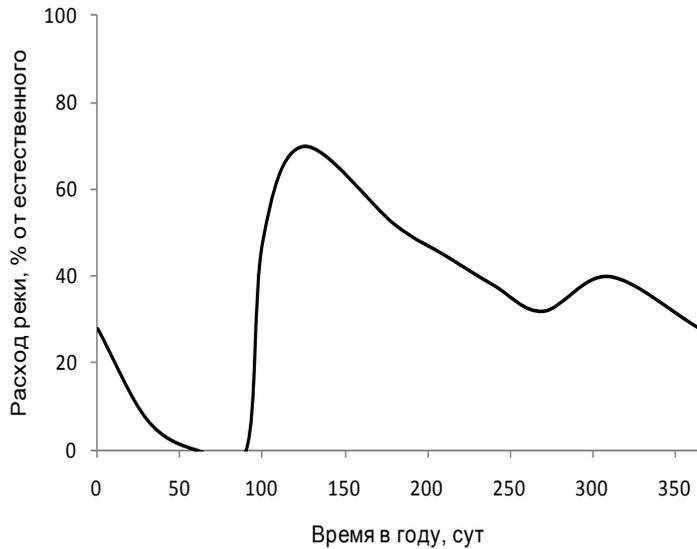


Рис. 19. Прогнозный годовой гидрограф реки Ваймуга (в % от естественного расхода) в створе водозаборного участка

водными ресурсами территории месторождения, что предполагает значимое воздействие водоотбора на общий водный баланс территории и формирование зависимого гидрологического режима водотоков, согласно (11). Прогнозная геогидрологическая модель эксплуатации подземных вод учитывает принципиальное различие характера изменения отдельных форм взаимодействия ППВ при водоотборе, в связи с их самостоятельной балансовой значимостью в формировании ЭЗПВ. Результаты прогнозного моделирования показывают значительное сокращение стока р. Ваймуга, особенно в период межени,

когда на отдельных ее участках речной сток полностью перехватывается (рис. 19).

Балансово-гидрогеодинамическая значимость формирования зависимого гидрологического режима очевидна при сопоставлении 2-х вариантов постановки

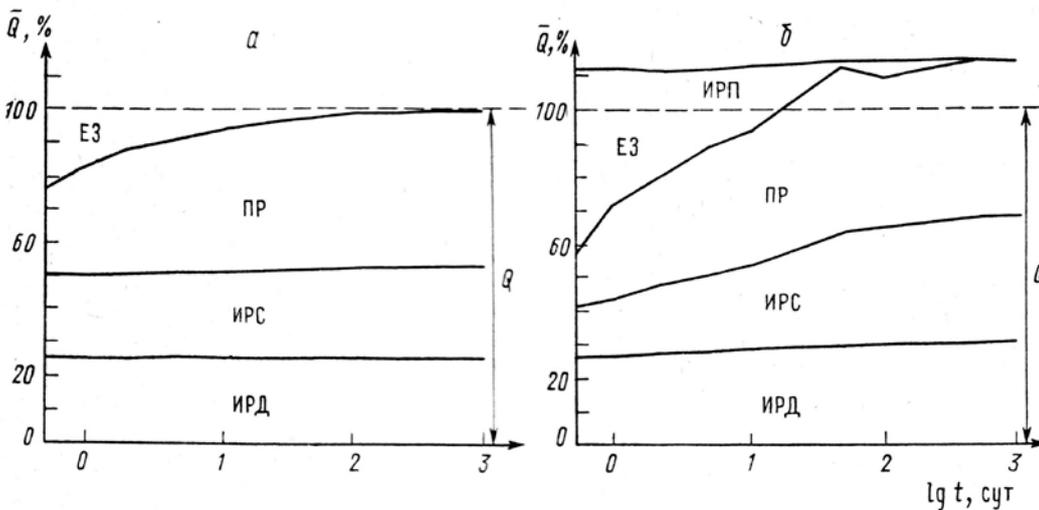


Рис. 20. Расчетная относительная балансовая структура водоотбора во времени при моделировании: а) независимого гидрологического режима; б) зависимого гидрологического режима: ЕЗ – сработка емкости пласта; ПР – привлечение речных вод; ИРС – инверсия русловой разгрузки; ИРД – инверсия родникового стока; ИРП – изменение поглощения речных вод

прогнозного моделирования: 1) при независимом (постоянном) и 2) зависимом гидрологическом режиме водотоков. В этих вариантах, расчетная балансовая структура эксплуатационного водоотбора формируется по-разному - рис. 20.

Во-первых, интенсивное сокращение речного стока существенно огра-

ничивает формирование питания за счет фильтрации речных вод – вплоть до нуля на участках полного перехвата стока, что компенсируется увеличением сработки емкостных запасов пласта и приводит к значительному расширению депрессии напоров. Во-вторых, прогнозируемое обмеление реки вызывает уменьшение питания водоносного горизонта на участках «природного» поглощения стока (ИРП), что формирует добавочную (к дебиту эксплуатации) расходную статью баланса и также обуславливает увеличение прогнозного понижения уровня подземных вод (на водозаборных участках в 2-3 раза).

Таким образом, данный пример показывает, что помимо своей очевидной геоэкологической значимости, геогидрологическое моделирование процессов формирования зависимого гидрологического режима водотоков при эксплуатации подземных вод позволяет избежать существенных ошибок в прогнозных расчетах водоотбора, которые, несомненно, отражаются и в итоговой величине ЭЗПВ месторождения в целом.

Разработанная геогидрологическая *модель зависимого гидрологического режима водоема* использована при прогнозных расчетах одного из вариантов расположения водозабора у акватории озера на Пачужском месторождении подземных вод (Архангельская обл). Озеро Пачозеро, дающее начало р. Пачуга, имеет узкую вытянутую форму и состоит из двух котловин, соединенных «переузьем». Протяженность его составляет 10,5 км при ширине от 100 до 300 м. Глубина озера весьма изменчива: от 20 – 25 м в локальных глубоких котловинах карстового происхождения, до 5 – 7 м – на участках их сочленения и до 2 м – на береговой отмели. Средний объем воды в котловине озера порядка 7.7 млн. м³. Озеро дренирует гидравлически связанную водоносную толщу четвертичных, карбонатных каменноугольных и терригенных вендских водоносных горизонтов.

Эксплуатация подземных вод предполагает использование поверхностных вод в качестве источника привлекаемых ресурсов, что неизбежно вызовет изменение естественного водного баланса водоема и может привести к негативным экологическим последствиям его обмеления. При этом изменение балансово-гидрогеодинамических условий взаимосвязи ППВ, определяющих долю привлечения поверхностных вод структуре ЭЗПВ, требует адекватного отражения при прогнозных расчетах водоотбора. Существующая практика прогнозных расчетов крупных береговых водозаборов подземных вод при оценке ЭЗПВ предполагает максимально жесткую постановку – на уровне минимальной водности 95% вероятности превышения (ВП) [Боревский и др., 1989]. Для «приозерного» водозабора такая постановка исключает все процессы пополнения запасов озера, кроме подземного питания на уровне межени 95% ВП. Очевидно, что постановка расчетов на уровне минимальной водности 95% ВП не отвечает природным условиям и не позволяет адекватно оценить реальные масштабы экологического влияния эксплуатации на гидрологический режим водоема, поскольку не отражает сезонного восполнения запасов воды в водоеме в периоды половодья. Отнесение процессов поверхностного питания «в запас надежности» прогнозных оценок, как это делается для приречных месторождений, где основная часть паводкового поверхностного питания реки проходит транзитом в относительно короткие сроки, в случае с водоемом является неоправданным, в связи с аккумулярующей способностью озера. С гидрогеодинамических позиций это означает «реабилитацию» основной питающей границы потока подземных вод, обеспечивающей поступление привлекаемых ресурсов к водозабору.

Для прогнозного моделирования «приозерного» варианта расположения водозабора на Пачужском МПВ использована оригинальная авторская модель формирования зависимого режима водоема (программа MCG). На первом моделировались естественные условия сезонной изменчивости формирования подземного и поверхностного питания озера, а также стока из него на основе многолетних рядов метеорологических данных, которые отражают накопление твердых осадков и их весеннее поступление в акваторию озера, а также испарение с водной поверхности в летний период. Средне многолетняя сезонная изменчивость ИП и склонового поверхностного стока получена на основе одномерного ландшафтного геогидрологического моделирования условий формирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации. Калибровка расчетной модели формирования естественного водного баланса оз. Пачозеро проведена по фактическим расходам стока из водоема. Гидрологический режим водоема характеризуется амплитудой колебания уровня порядка 0.6 м, а среднегодовой сток из озера составляет $0.472 \text{ м}^3/\text{с}$. В ходе прогнозных расчетов проведено обоснование максимального постоянного дебита эксплуатации при допустимом нарушении водного режима акватории озера, которое предполагает сохранение $> 10\%$ среднегодового стока из водоема большую часть года и минимальный период его полного отсутствия, что обеспечивает обмен воды в чаше водоема и сохранение проточных условий, минимизирующих негативные экологические последствия (заболачивание, смена биоценозов и т.д.).

В результате обоснован допустимый объем эксплуатации подземных вод в количестве 31.1 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, что на 30% больше, чем при «жестком» варианте расчета; при этом прогнозируемое сокращение глубины водоема не превышает 0,5 м (рис 21а), а сток из озера сохраняется (рис. 21б) и удовлетворяет экологическим ограничениям. Увеличение водоотбора вызывает необратимые процессы прогрессирующего обмеления водоема и прекращения стока из него, за исключением наиболее многоводных лет.

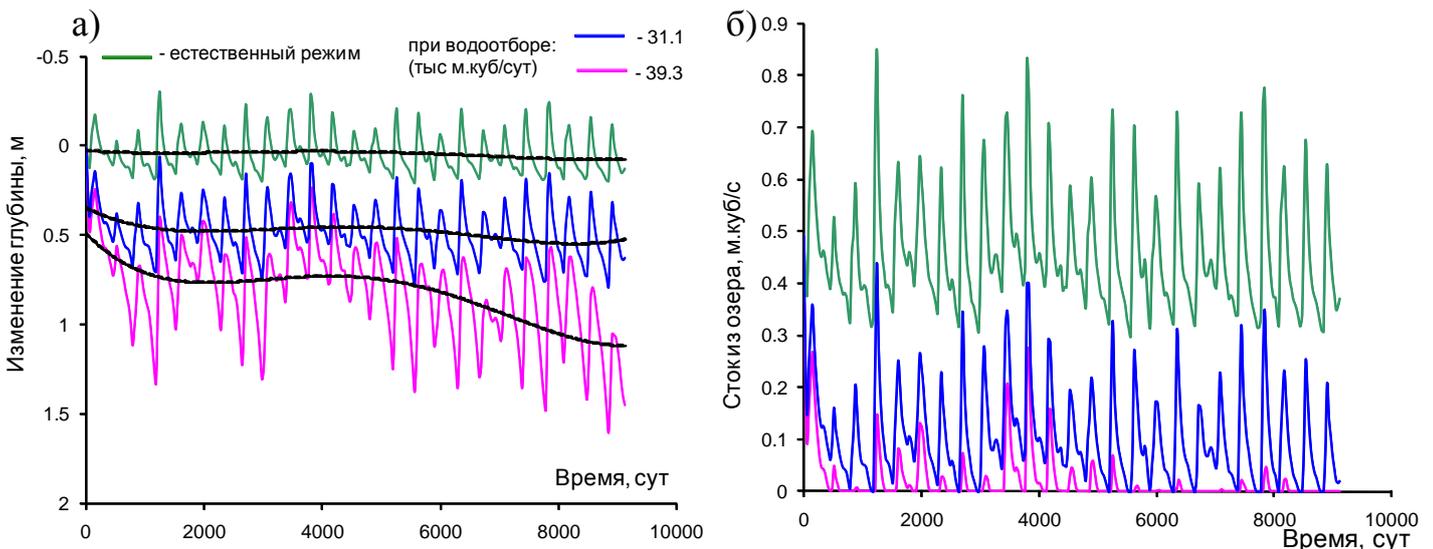


Рис. 21. Прогнозное изменение глубины озера (а) и стока из него (б) при разных дебитах эксплуатации подземных вод в сравнении с естественным режимом

Следует подчеркнуть, что при проточном режиме водоема связь между его суммарным питанием и восполнением запасов воды в нем является нелинейной, что не позволяет использовать простые балансовые расчеты и обуславливает необходимость

геогидрологического моделирования формирования зависимого гидрологического режима водоема.

Оценка воздействия эксплуатации подземных вод на ландшафтные условия

На примере территории Самур-Гюльгерычайской аллювиально-пролювиальной равнины (АПР) Южного Дагестана проведена оценка влияния проектируемой эксплуатации подземных вод на воднобалансовые условия данной пограничной с Республикой Азербайджан территории на основе принципов геогидрологического моделирования. Эта задача обусловлена актуальностью экологической оценки возможности использования подземных вод на территории Дагестана и необходимостью анализа масштабов трансграничного использования ресурсов подземных вод соседним государством.

«Сложившийся» (по В.А.Листенгартену) баланс потока подземных вод на территории АПР формируется в условиях антропогенного перераспределения поверхностного стока сетью магистральных и оросительных каналов. Формирование потока подземных вод, направленного от вершинной части АПР в сторону Каспийского моря, происходит, главным образом, за счет интенсивных фильтрационных потерь стока рек Самур и Гюльгерычай в привершинной и центральной частях АПР и, в гораздо в меньшей степени, - за счет ИП. Разгрузка подземных вод осуществляется в прибрежной части АПР родниковым стоком, в русла устьевых участков рек и ручьев, эвапотранспирацией с УГВ и в Каспийское море.

Использование ресурсов подземных вод АПР для водоснабжения как на Российской территории, так и республикой Азербайджан, связано с необходимостью сохранения уникального реликтового леса Самурского природного комплекса (СПК), расположенного в области выклинивания потока и во многом формирующего эвапотранспирационную составляющую его разгрузки. Обоснование масштабов прогнозного влияния эксплуатации подземных вод на природные ландшафты СПК поведено на основе построения ландшафтных геогидрологических моделей ИП и эвапотранспирационной разгрузки. Калибрация эвапотранспирационных моделей для трех типичных ландшафтов СПК, проведенная по данным фактической динамики влажности по глубине ЗА (ГУП РЦ «Дагестангеомониторинг»), позволила обосновать соответствующие зависимости эвапотранспирационного оттока влаги с УГВ от глубины его залегания [Поздняков, Преображенская, 2009]. На их основе, с использованием схем ландшафтного районирования и среднегодовых глубин УГВ, рассчитан расход эвапотранспирационной разгрузки, который в суммарном балансе потока составляет $>20\%$ (227 тыс.м³/сут).

Оценка прогнозного воздействия вариантов проектной эксплуатации подземных вод (в том числе и на Азербайджанской территории) на лесные ландшафты СПК проведена на основе схемы их видового разнообразия и данных об оптимальном положении УГВ и влажности для каждого вида [Новикова, Полянская, 1994]. Результаты моделирования позволили обосновать оптимальное расположение проектного водозабора, при котором прогнозные понижения УГВ на территории Самурского леса не превысят допустимых отметок, способных вызвать деградацию лесных массивов (рис. 22).

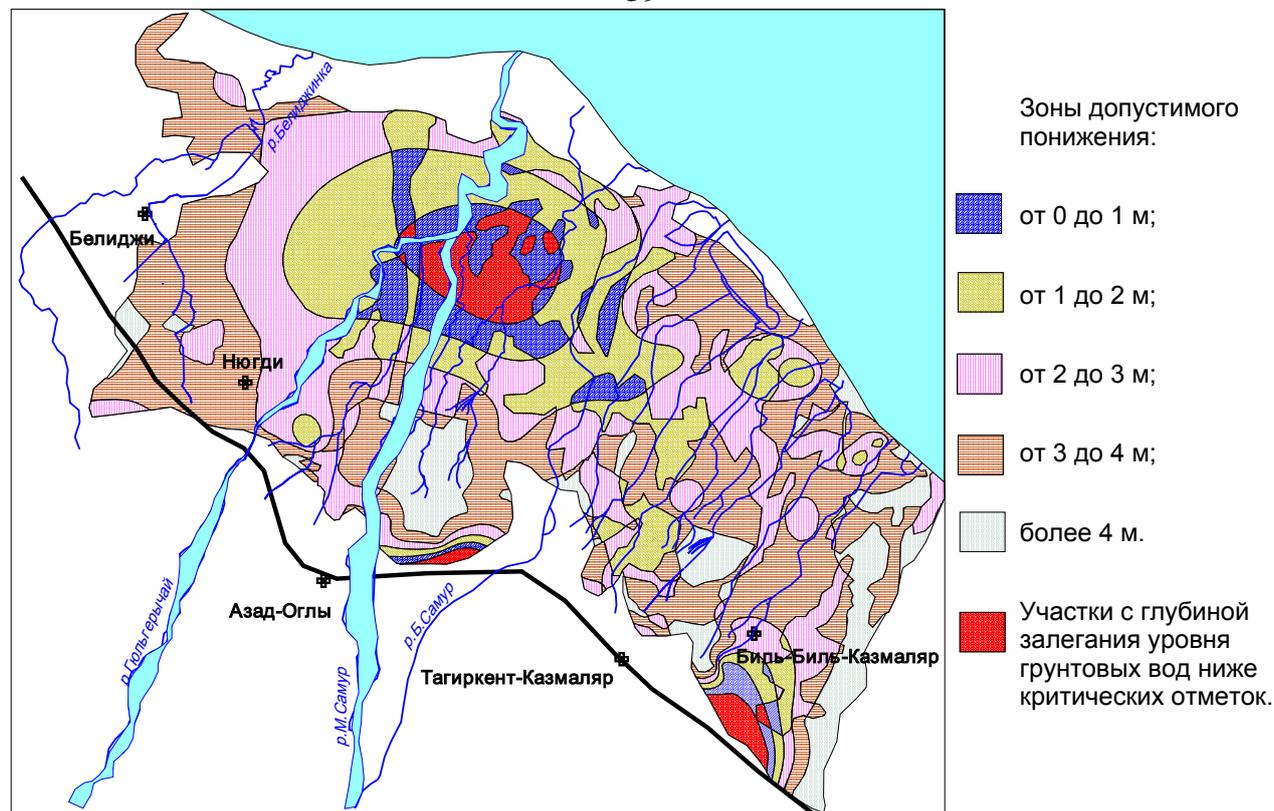


Рис. 22. Схема допустимых понижений УГВ на территории Самурского леса

В то же время региональное моделирование формирования потока подземных вод Самур-Гюльгерычайской АПР показало, что доля его суммарного питания на территории Азербайджана составляет лишь 19,5%, а разгрузки – 31%. По данным имитационных прогнозов эксплуатации подземных вод, планируемой на приграничной территории Азербайджана, ее дебит только на 60-65% будет обеспечиваться «собственными» ресурсами подземных вод, а ее остальная часть в балансовом смысле формируется на территории Дагестана, что будет существенно влиять на природные ландшафтные условия СПК.

Таким образом, рассмотренные примеры прогнозных расчетов эксплуатации подземных вод доказывают необходимость использования геогидрологического моделирования гидрогеодинамически зависимого гидрологического режима водотоков и водоемов в условиях ограниченных ресурсов (запасов) поверхностных вод, которое позволяет повысить достоверность ЭЗПВ и их балансовой обеспеченности, а также адекватно оценить масштабы воздействия эксплуатации подземных вод на поверхностные воды. Геогидрологические модели, отражающие процессы формирования ИП и эвапотранспирационной разгрузки, позволяют оценивать эти сложно определяемые статьи баланса потока подземных вод и их роль в обеспечении эксплуатационного водоотбора, а также прогнозировать влияние эксплуатации подземных вод на влажностный режим природных ландшафтов.

Заключение

В заключении приведены основные выводы по результатам проведенных исследований, которые составляют защищаемые положения работы.

1. Геогидрологические модели представляют собой особый класс моделей, рассматривающих водообмен в системе «атмосфера – поверхность – почва – подземные воды – поверхностные воды» во взаимовлиянии процессов формирования водного баланса на поверхности суши, подземного и поверхностного стока и характеризуются нелинейными условиями на балансовых границах фильтрационного потока, отражающими связь инфильтрационного питания и эвапотранспирационной разгрузки подземных вод с ландшафтно-климатическими условиями и взаимозависимость режима и баланса подземных и поверхностных вод.

Структура, содержание, характер граничных условий и параметризация отдельных блоков геогидрологической модели, а также принципы ее верификации определяются масштабом и целевым назначением оценки инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод в естественных и нарушенных условиях.

В соответствии с этим целесообразно различать четыре основных типа (масштаба) геогидрологических моделей – бассейновый (мелкий), водосборный (средний), ландшафтный (крупный) и локальный (точечный).

2. Методика средне- и мелкомасштабной оценки среднемноголетнего инфильтрационного питания и естественных ресурсов подземных вод на основе геогидрологических моделей заключается в районировании территории по условиям инфильтрации, построении типовых ландшафтных моделей и оценке элементов водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации по результатам моделирования на основе многолетних рядов метеорологических характеристик.

Масштабная неоднородность инфильтрационного питания на площади речного бассейна (водосбора) характеризуется типовыми условиями формирования инфильтрации. В мелком (региональном) масштабе они определяются макро-различиями общего характера ландшафта (природный, урбанизированный, водный), типа растительности и литологического (механического) состава почвенного покрова и пород верхнего (до 5-7 м) интервала разреза зоны аэрации, средней глубиной залегания уровня грунтовых вод (УГВ). В среднем и крупном масштабах необходимо также учитывать характер сельскохозяйственного использования ландшафта, рельеф и экспозицию склонов.

3. Проведено обоснование характера граничных условий и параметрического обеспечения расчетных моделей для средне- и мелкомасштабной оценки среднемноголетнего инфильтрационного питания подземных вод, отражающее основные природные ландшафтно-климатические закономерности его формирования, применительно к климатическим условиям средней полосы России.

- На верхней границе модели формирования среднемноголетней инфильтрации оптимальной является суточная дискретность метеорологических характеристик, а условие на нижней границе может быть охарактеризовано среднемноголетним положением УГВ при глубине его залегания свыше 3-4 м.

При меньшей глубине УГВ условие на нижней границе модели инфильтрационного питания *должно отражать его сезонную динамичность*, которая существенно влияет на процессы формирования водного баланса в зоне аэрации.

- *Обоснованы обобщенные параметры*, характеризующие *ландшафтные условия*, водно-физические *свойства пород зоны аэрации*, в зависимости от их *литологического состава*, а для *верхнего почвенного горизонта* – и от *типа растительности*, а также *параметры модели транспирационного отбора влаги корневой системой* древесной и травянистой растительности, в зависимости от состава почвы.
- Установлено, что *различия в расчетных величинах среднемноголетней инфильтрации при возможной вариации обобщенных параметров моделей*, в большинстве случаев *не превышают 5%*, что *доказывает возможность их использования*. Наиболее чувствительна модель инфильтрационного питания к параметрам поверхностного стокообразования, что требует их калибровки.
- Предложенные *принципы калибровки и верификации геогидрологической модели основаны на использовании фактических характеристик речного стока*, что обеспечивает достоверность расчетных интегральных показателей водного баланса речных бассейнов (водосборов).

4. Методика оценки среднемноголетнего инфильтрационного питания и естественных ресурсов подземных вод на основе геогидрологического моделирования процессов водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации может быть использована при средне-мелкомасштабных исследованиях, *как альтернатива или существенное дополнение широко используемого гидролого-гидрогеологического метода*. Она позволяет *количественно охарактеризовать*:

- *неоднородность инфильтрационного питания* в границах речных бассейнов разного порядка;
- *«эвапотранспирационную» составляющую естественных ресурсов* подземных вод;
- *связь среднемноголетнего инфильтрационного питания с глубиной УГВ*;
- *инфильтрационное питание* подземных вод *балансово-незамкнутых* территорий;
- *питание глубоких интервалов гидрогеологического разреза* зоны интенсивного водообмена, не дренируемых местной эрозийной сетью;
- многолетние показатели *естественных ресурсов подземных вод заданной обеспеченности*.

Методика оценки инфильтрационного питания на основе геогидрологических моделей также может быть *использована для обоснования количественных показателей степени защищенности (уязвимости) грунтовых вод*.

5. В масштабе речного бассейна ландшафтные факторы, главными из которых являются тип растительного и почвенного покрова, обуславливают резкую неоднородность инфильтрационного питания подземных вод и определяют соотношение между составляющими суммарного испарения, а также поверхностным стоком и инфильтрацией. **В региональном масштабе значимая неоднородность среднемноголетнего инфильтрационного питания** и естественных ресурсов подземных

вод может быть обусловлена также *различием микроклиматических условий* отдельных речных бассейнов территории, относящейся к единой климатической зоне.

В целом, *наиболее благоприятные условия для инфильтрационного питания* формируются *на лесных ландшафтах*, а для *среднемноголетней эвапотранспирационной разгрузки* подземных вод – на *открытых полевых ландшафтах при глубине УГВ до 3 м*. *Ландшафтные условия определяют* также параметры *зависимости среднемноголетней инфильтрации от глубины УГВ*.

Внутригодовые вариации ИП резко затухают с глубиной УГВ, и при его залегании глубже 5 м практически отсутствуют и не влияют на его режим. Это означает, что *сезонный режим УГВ при их средней глубине свыше 5 м не связан с «местным» инфильтрационным питанием*, а обусловлен изменениями в латеральном потоке (главным образом, уровня его дренирования). В то же время *многолетняя вариация годовых сумм инфильтрации сохраняется и проявляется в режиме УГВ при значительной (более 10 м) его глубине*.

6. Рассмотренные *методические принципы геогидрологического моделирования необходимо использовать при оценке эксплуатационных запасов* подземных вод, когда *их формирование связано с процессами изменения уровня грунтовых вод или с привлечением поверхностных вод* в объемах, нарушающих их гидрологический режим. В этих случаях *геогидрологическое моделирование позволяет учитывать нелинейные процессы изменения инфильтрационного питания или эвапотранспирационной разгрузки подземных вод в зависимости от природных ландшафтно-климатических условий, и формирование гидрогеодинамически зависимого гидрологического режима водотоков и водоемов*.

На примере конкретных объектов показано, что *использование геогидрологических моделей* при оценке эксплуатационных запасов подземных вод в этом случае *повышает степень балансовой обеспеченности эксплуатационного водоотбора* и позволяет *адекватно прогнозировать его влияние на водный баланс территории*, что является количественной основой для *оценки его экологических последствий*.

Основные работы по теме диссертационных исследований.

Монографии и учебные пособия:

1. *Гринецкий С.О.* Численное моделирование фильтрации // в кн. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ. Под ред. Р.С. Штенгелова. М.: Изд-во МГУ. 1994. С. 91 - 133.
2. Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований (учебное пособие) // под ред. В.А.Королева, Г.И.Гордеевой, *С.О.Гринецкого*, В.А.Богословского. М. МГУ. 2000 г.
3. *Гринецкий С.О.* Алгоритм моделирования потоков грунтовых вод и малой реки // в кн. В.М.Шестаков, С.П.Поздняков «Геогидрология».М., ИКЦ «Академкнига».2003, с.156-165
4. *Гринецкий С.О.* Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: Инфра-М. 2012. 152 с.

Статьи в рецензируемых журналах:

5. *Гринецкий С.О.*, Штенгелов Р.С. О прогнозировании влияния водозаборов подземных вод на сток малых рек. // Водные ресурсы. 1988. № 4. С.24 – 32.

6. *Гринецкий С.О.* Формирование эксплуатационных запасов водозабора подземных вод в долине малой реки. // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1991. № 3, с.87 – 92.
7. *Гринецкий С.О., Штенгелов Р.С.* Мониторинг приречных месторождений подземных вод // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1995. № 6, с.52 – 58.
8. *Гринецкий С.О., Короткова И.Ю.* Обоснование допустимых понижений при оценке эксплуатационных запасов подземных вод // Вестник МГУ. Сер. Геология. 1997. № 4, с.71-74.
9. *Гринецкий С.О., Машкова Е. В.* Оценка балансовой структуры эксплуатационного отбора подземных вод // Вестник МГУ. Сер. Геология. 1999. №5. С. 33 - 40.
10. *Н.И.Алексеевский, С.О. Гринецкий, П.В.Ефремов, М.Б.Заславская, И.Л.Григорьева* Малые реки и экологическое состояние территории // Водные ресурсы, 2003, т.30 №5, с. 586-595
11. *Гринецкий С.О., Прокофьев В.В.* К методике проведения и интерпретации термометрических измерений для выявления зон субквальной разгрузки подземных вод // Вестник МГУ. Сер.4. Геология. 2005. №3. С. 55 – 61.
12. *Всеволожский В.А., Гринецкий С.О.* Оценка естественных ресурсов подземных вод с использованием балансово-гидродинамических моделей // Водные ресурсы. 2006. Т.33. №4, с. 410-416.
13. *Гринецкий С.О., Грицаенко В.Г.* Гидродинамическое моделирование при обосновании строительства подземных хранилищ газа в каменной соли // Вестник МГУ, сер. 4 Геология. 2006 №1, с. 41-49
14. *Гринецкий С.О., Преображенская А.Е., Юрченко С.А.* Оценка баланса подземных вод Самур-Гюльгерычайской аллювиально-пролювиальной равнины (Южный Дагестан) // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2009. № 4, с.44 – 54.
15. *Гринецкий С.О., Преображенская А.Е., Цяпа Л.П.* Идентификация гидрогеодинамических условий потока подземных вод по опытным данным // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2009. №3, с. 39-45
16. *Гринецкий С.О.* Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод // Вестник МГУ, сер. 4. Геология. 2010. №6. С.56-67.
17. *Гринецкий С.О., Поздняков С.П.* Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543 - 557.
18. *Гринецкий С.О., Маслов А.А., Поздняков С.П.* Опыт создания и применения комплекса режимных гидрогеологических наблюдений в условиях Звенигородского учебного полигона МГУ им. М.В.Ломоносова // Инж. изыскания. 2011. №5. с.20 – 24.
19. *Гринецкий С.О.* Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод // Вестник МГУ, сер. 4. Геология. 2011. №3, с 41-52.
20. *Гринецкий С.О., Новоселова М.В.* Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод // Водные ресурсы. 2011. Т.38, № 2. С. 169 - 180.

Основные статьи в научных сборниках:

21. *Гринеvский С.О.* Особенности расчетов водозабора вблизи акватории сточного озера. Часть 1. Балансово-гидродинамическая модель // в Сб. Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование. М.: РУДН. 2003 а. С. 276 – 288.
22. *Гринеvский С.О.* Особенности расчетов водозабора вблизи акватории сточного озера. Часть 2. Моделирование динамики водного баланса водоема // в Сб. Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование. М.: РУДН. 2003 б. 289 – 306.
23. *Гринеvский С.О., Преображенская А.Е.* Оценка разгрузки подземных вод эвапотранспирацией методами моделирования (на примере Южного Дагестана). Материалы Всероссийской конференции по математическому моделированию в гидрогеологии, «Пахра», Московская область, 23-25 апреля 2008 г., Москва, Геомод, 2008.
24. *Гринеvский С.О., Преображенская А.Е.* Комплексная оценка баланса подземных вод Самур-Гюльгерычайской аллювиально-пролювиальной равнины // Ресурсы подземных вод Юга России и меры по их рациональному использованию, охране и воспроизводству. Труды Института геологии ДНЦ РАН. Выпуск № 55. Махачкала, 2009 г. с.41-43
25. *Гринеvский С.О., Маслов А.А.* Режимные гидрогеологические наблюдения на территории Зенигородского учебного полигона // Материалы Международной научной конференции «Ресурсы подземных вод. Современные проблемы изучения и использования». М., МАКС Пресс, 2010, с. 227-234
26. *Гринеvский С.О.* Моделирование формирования инфильтрационного питания подземных вод // «Питьевые подземные воды. Изучение, использование и информационные технологии». Материалы международной научно-практической конференции. 18-22 апреля 2011 г. Моск. обл. п.Зеленый. с. 221-235
27. *Гринеvский С.О.* Модельный анализ природных факторов формирования инфильтрационного питания подземных вод // Комплексные проблемы гидрогеологии: тез. докл. науч. конференции. СПб.: С.-Петербург. ун-т. 2011. с. 58-60
28. *Grinevskiy S.O., Shtengelov R.S.* Models of Surface Water and Groundwater Interaction for Local Lake Basins Under Natural and Water Supply Pumping Conditions. Proceedings of Taiwan-Russia Bilateral Symposium – Development of Water Resources Technology. Moscow, Russia 31 May, 2004. P. 124 – 144.
29. *Grinevskiy S.O., Pozdniakov S.P.* Simulation of regional-scale groundwater recharge and its change under transient climate conditions // Calibration and Reliability in Groundwater Modeling “Managing Groundwater and the Environment”. Proceeding of the 7-th International conference on calibration and reliability in groundwater modeling ModelCARE, Wuhan, China, China University of Geosciences, 2009. P. 499-502.
30. *Pozdniakov S.P., Grinevskiy S.O., Lykhina A.A., Preobragenskaya A.E.* Groundwater resources simulation under transient climate conditions // IAHR International Groundwater Symposium. 22-24 September 2010. Valencia, Spain.