

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В. Н. КАРАЗИНА

На правах рукописи

Амджади Азиз

УДК 556.3 (55–15)

**ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД
ХОРРАМАБАДСКОГО И ШИРАЗСКОГО БАССЕЙНОВ
(ЗАПАДНЫЙ ИРАН)**

4.00.06 – гидрогеология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геологических наук

Научный руководитель:
Лурье Анатолий Ионович
доктор геолого-минералогических
наук, профессор

Харьков – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1. Обзор гидрогеологических исследований.....	11
1.2. Обзор развития статистических методов гидрогеологических исследований.....	17
РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК.....	20
2.1. Административное положение.....	20
2.2. Рельеф.....	21
2.3. Климат.....	22
2.4. Гидрография.....	27
2.5. Почвенно-растительный покров.....	32
РАЗДЕЛ 3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕ- СКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	33
3.1. Геологическое строение.....	33
3.1.1. Стратиграфия.....	38
3.1.2. Тектоника района исследования.....	48
3.1.3. Тектоника складчато-надвигового пояса Загроса.....	50
3.1.4. Тектоника большого сброса Загроса.....	52
3.2. Гидрогеологические условия.....	55
3.2.1. Общие закономерности гидрогеологических условий горной системы Загроса	56
3.2.2. Гидрогеодинамические условия Хоррамабадского бассейна	58
3.2.3. Характеристика водоносных горизонтов и комплексов Хоррамабадского бассейна	62
3.2.4. Химический состав грунтовых вод Хоррамабадского бассейна.....	59

3.2.5. Тяжелые металлы в грунтовых водах Хоррамабадского бассейна.....	64
3.2.6. Гидрогеодинамические условия Ширазского бассейна.....	67
3.3. Региональные закономерности формирования химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.....	67
РАЗДЕЛ 4. РАСЧЕТ БАЛАНСОВ ГРУНТОВЫХ ВОД ШИРАЗСКОГО И ХОРРАМАБАДСКОГО БАССЕЙНОВ И ИХ СРАВНЕНИЕ.....	76
4.1. Баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (2012 г.).....	76
4.1.1. Приходные составляющие водного баланса.....	77
4.1.2. Расходные составляющие водного баланса.....	81
4.1.3. Характеристика баланса грунтовых вод Хоррамабадского бассейна.....	84
4.1.4. Характеристика баланса грунтовых вод Ширазского бассейна.....	88
4.2. Сравнение балансов грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.....	89
РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВЫХ ВОД ХОРРАМАБАДСКОГО И ШИРАЗСКОГО БАССЕЙНОВ МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	92
5.1. Кластерный анализ.....	92
5.1.1. Методика кластерного анализа.....	94
5.1.2. Применение кластерного анализа для выделения участков грунтовых вод с подобным химическим составом.....	107
5.1.3. Сравнительная характеристика химического состава грунтовых вод Ширазского и Хоррамабадского бассейнов.....	124
5.2. Факторный анализ.....	130
5.2.1. Методика факторного анализа.....	132

5.2.2. Применение факторного анализа при исследовании химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.....	135
---	-----

РАЗДЕЛ 6. ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ГРУНТОВЫХ ВОД ХОРРАМАБАДСКОГО И ШИРАЗСКОГО БАССЕЙНОВ.....	151
--	-----

6.1. Обзор методов прогнозирования качества подземных вод.....	151
--	-----

6.2. Стохастическая модель прогноза качества грунтовых вод.....	157
---	-----

6.3. Прогноз качества грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.....	161
---	-----

ВЫВОДЫ.....	165
-------------	-----

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	169
---------------------------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

В Западном Иране грунтовый водоносный горизонт Ширазского бассейна широко используется для питьевого водоснабжения, в промышленности, для полива сельскохозяйственных культур и других целей. Он интенсивно эксплуатируется десятками водозаборов и сотнями одиночных скважин. Сейчас планируется также более широко использовать и грунтовые воды Хоррамабадского бассейна. Добыча значительных объемов воды нами рассматривается как мощный техногенный фактор, способствующий изменению пространственно-временных характеристик водоносного горизонта, и приводит к изменению химического состава грунтовых вод, что вызывает волнение у специалистов и общественности.

Несмотря на большое количество анализов химического состава грунтовых и поверхностных вод, они мало использовались для выяснения условий их формирования и прогнозов качества воды.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что в условиях дефицита экологически чистых питьевых вод большое значение приобретают такие проблемы: а) определение баланса грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов и их сравнение; б) установление региональных закономерностей формирования и изменения химического состава грунтовых вод этих бассейнов в условиях эксплуатации для прогнозирования качества подземных вод; в) определение по гидрогеохимическим данным подобия химических составов грунтовых вод и районирование грунтовых горизонтов этих бассейнов с целью выявления возможного их загрязнения; г) прогнозирование качества грунтовых вод.

Работа выполнена в соответствии с государственной программой «Оценка окружающей среды Западного Ирана». Соискатель принимал участие в выполнении 2 научно-исследовательских работ (Гос. рег. № А/23530–2010 и

№ Н/14532–2009), посвященных режиму и прогнозу химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационных исследований является изучение гидрогеодинамических и гидрогеохимических особенностей грунтовых водоносных горизонтов Хоррамабадского и Ширазского бассейнов, как в естественных условиях, так и при их эксплуатации водозаборами для выявления закономерностей формирования количественного и качественного состава грунтовых вод. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Составить и сравнить балансы грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.
2. Выявить региональные закономерности изменения химического состава грунтовых водоносных вод этих бассейнов в условиях эксплуатации.
3. Определить по гидрогеохимическим данным подобие химических составов грунтовых вод и на этой основе выполнить районирование грунтовых водоносных горизонтов этих бассейнов с целью выявления зон возможного их загрязнения.
4. Выполнить прогнозирование химического состава грунтовых вод в условиях их эксплуатации, используя стохастическую модель.

Объект исследования – грунтовые водоносные горизонты в Хоррамабадском и Ширазском бассейнах Западного Ирана.

Предмет исследования – гидрогеохимические особенности грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов Западного Ирана.

Фактический материал. В основу написания диссертационной работы положены материалы, собранные и проанализированные автором за период обучения в аспирантуре с 2011 по 2015 гг. Автором использовано более 1,5 тыс. полных химических анализов проб грунтовых вод. Фактический материал включает результаты лабораторных исследований компонентного состава

грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов, выполненных на один момент времени (июль 2012) в аккредитованной химической лаборатории фирмы Сангаб в Тегеране по существующим в Иране методикам определения химических элементов и соединений в природных водах.

Методы исследования – анализ и обобщение фондовых и опубликованных материалов, математическая обработка химического состава вод с использованием многомерного статистического анализа (кластерный и факторный анализы), применение стохастической модели для прогноза химического состава грунтовых вод (моделирование на IBM PC Pentium).

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Установлены региональные закономерности формирования химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов. Формирование химического состава этих вод обусловлено тем, что они приурочены к бассейнам межгорного типа, где минерализация грунтовых вод повышается от горного обрамления к центру этих бассейнов, а химический состав воды меняется от гидрокарбонатного кальциево-магниевого до сульфатного и хлоридно-сульфатного натриево-кальциевого. Установлено, что в Хоррамабадском бассейне на химический состав сильно влияет поверхностный сток из склонов соляных диапиров, а в Ширазском бассейне – соленое озеро Махарлу. Установлено также, что грунтовые воды в этих бассейнах формируются за счет подземного притока из горного обрамления, поглощения воды из рек и озер та инфильтрации атмосферных осадков, ирригационных и техногенных вод.

2. Впервые рассчитан баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна и проведено его сравнение с балансом грунтовых вод Ширазского бассейна. Установлено, что в этих бассейнах расходные части балансов превышают приходные части. Дефицит грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне составляет $-0,59 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 , а в Ширазском бассейне – $-0,61 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 .

Доказано, что уровень грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне ежегодно будет понижаться на 0,76 м

3. Впервые в Иране по гидрогеохимическим данным с использованием кластерного и факторного анализов обосновано подобие химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов та выявлены и очерчены на картах-схемах участки грунтовых водоносных горизонтов с подобным химическим составом. На многих участках в их химическом составе обнаружены одинаковые характерные химические элементы и соединения, что позволяет устанавливать зоны возможного загрязнения.

4. Получило дальнейшее развитие моделирование изменений химического состава грунтовых вод в условиях их эксплуатации. Для прогноза химического состава подземных вод предложена стохастическая модель гидрогеологического процесса, которая может быть представлена суммой нескольких гармоничных составляющих, осложненных случайным компонентом. Долгосрочные прогнозы химического состава подземных вод составлены на основании изучения закономерностей его колебаний в прошлом, что в общем виде отображает влияние на него основных режимобразующих факторов. В связи с этим целесообразно найти в рядах таких колебаний закономерные составляющие, которые можно прогнозировать. Доказано, что если исходный ряд колебаний компонентов химического состава грунтовых вод разлагается на периодические составляющие целиком или с небольшим по амплитуде остатком, то прогноз не вызывает значительных затруднений. Если после выделения периодических составляющих, остается случайный компонент со значительной амплитудой, тогда можно составить прогноз об общем направлении процесса.

С использованием этой модели составлен прогноз изменения химического состава грунтовых вод в условиях эксплуатации для Хоррамабадского и Ширазского бассейнов (скв. Гилуран и Гачи). Установлено, что в предстоящий год минерализация, общая жесткость, сульфаты и кальций будут повышаться.

Практическое значение полученных результатов. Выявленные закономерности формирования и изменения химического состава подземных вод грунтового водоносного горизонта в условиях эксплуатации позволят прогнозировать качество питьевых вод, а районирование грунтового водоносного горизонта по химическому составу – рационально располагать водозаборные скважины. Пространственно-временные закономерности формирования грунтовых вод в условиях многолетней эксплуатации будут способствовать разработке водоохраных мероприятий, а применяемые методики могут использоваться и для исследований в других гидрогеологических регионах.

Внедрение результатов работы: Научно-методические разработки, содержащиеся в диссертации, используются при выполнении научно-исследовательских работ в учреждениях по охране природы провинции Лурестан и Фарс Ирана, на кафедре гидрогеологии в Харьковском национальном университете имени В. Н. Каразина и включены в лекционные курсы по гидрогеологии и гидрогеохимии.

Личный вклад соискателя. Автором самостоятельно сформулированы цель и задачи исследований; собран и систематизирован фактический материал, который обработан с применением методов многомерной статистики (кластерный и факторный анализы); определен баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна и проведено его сравнение с балансом Ширазского бассейна; выявлены основные закономерности формирования грунтовых вод в этих бассейнах; составлен прогноз изменения их химического состава. Основные результаты и выводы, которые приведены в диссертации, получены и обоснованы автором лично.

Апробация результатов исследования. Основные теоретические, методологические и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 21-й международной научно-практической конференции «Научная дискуссия: инновации в современном мире» (Москва,

2014); на международной научно-практической конференции «Регіон-2014: Стратегія оптимального розвитку » (два доклада) (Харьков, 2014); на научной конференции «Проблеми гідрогеології на сучасному етапі» Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (два доклада) (Харьков, 2014); на заседании кафедры гидрогеологии и Ученого совета факультета геологии, географии, рекреации и туризма Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (2012–2014 г.г.).

Публикации. По теме диссертации в разных издательствах Украины, России, Египта и Канады опубликовано 12 печатных работ, в том числе 7 в профессиональных изданиях, 1 – из Импакт-фактором и 4 без соавторов.

Структура и объемы диссертации. Диссертация общим объемом 183 стр., в том числе 143 с. основного текста. Работа состоит из введения, 6 глав и заключения, содержит 32 рис., 25 табл. Список использованных материалов включает 161 наименований, в том числе 66 на иностранных языках.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доктору геолого-минералогических наук, профессору Лурье А. И. за постоянную помощь и поддержку при выполнении работы. Автор благодарен заведующему кафедрой гидрогеологии доценту Удалову И. В., а также профессору Терещенко В. А., доцентам Чомко Ф. В. и Прибыловой В. Н. за помощь и полезные советы.

РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Обзор гидрогеологических исследований

В Иране выделяются две большие горные цепи Албурс и Загрос с межгорными впадинами.

Территория исследований находится на западе и юго-западе Ирана, расположена в складчатом поясе Загроса и является составной частью Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадин.

На территории Хоррамабадского бассейна действует 280 родников и 11 кяризов (канатов), а в Ширазском бассейне – 17 родников и 33 кяризов известных более 1000 лет. Поэтому можно считать, что гидрогеологические исследования на территории этих бассейнов проводятся давно.

Системные гидрогеологические исследования в Иране проводятся со середины прошлого столетия. Вначале это были разрозненные исследования при геологических съемках и других работах, затем приобрели большое значение при решении вопросов водоснабжения городов Хоррамабад, Шираз и относящимся к ним оазисов.

В 1970 г. фирма «General geophysics» выполнила вертикальное электроразведывание на всей территории Ширазского бассейна, а фирмы NKRC и АБК АВ эти работы провела в Хоррамабадском бассейне в 1971 г [108, 111].

Маринова Н. А. (1974) в своей большой работе «Гидрогеология Азии» [63] отмечает, что складчатая горная цепь Загроса с северо-запада на юго-восток образована параллельной системой крупных антиклинальных и синклинальных складок. В пределах синклинальных структур существует много больших и малых артезианских бассейнов. Ширазский и Хоррамабадский бассейны относятся к зоне складчатого Загроса и расположены на крайнем юго-западе этой цепи и обрамлены его отрогами. В юго-восточной части межгорных впадин широко развиты нерасчлененные

мезозойские осадочно-эффузивные и интрузивные образования. Толщина этих отложений колеблется от 1000 до 4000 м. Палеогеновые (преимущественно эоценовые) отложения, распространенные во внешней области питания юго-западной части бассейна, сложены известняками и глинистыми сланцами толщиной 200–1200 м.

В 1977 г. Харбер провел тектоническое районирование складчатой горной цепи Загрос. В этой цепи он выделил 4 морфотектонических участка: а) предгорье, б) складчатый пояс, в) пояс разлома, г) трастная зона [80, 89].

По данным исследований Алирзаева А. А., Абдулаева З. А. и Ганиева К. Г. для Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадин были установлены модули эвапотранспирации. При залегании грунтовых вод менее 3 м эти модули равны около $6 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 или 189 мм/год [64].

З 1975 по 1985 г. Геологическая организация Ирана совместно с Иранской национальной нефтяной компанией на всей территории Ирана провели геолого-гидрогеологические съемки масштаба 1:5000000, 1:2500000 и 1:250000. По результатам этих съемок были построены геологические, гидрогеологические и другие специализованные карты этих масштабов. Также было выполнено стратиграфическое расчленение геологического разреза в соответствие с Международной стратиграфической таблицей. Было доказано, что горная цепь Загроса это продолжение горных цепей Гималаев и Альп [36, 61, 108].

В своих работах Алави [90], Берберинан и Кинг [36] показали, что современная структура Загроса обусловлена тектоническими движениями эпохи Альпийской складчатости. Это привело к образованию синклинальных и антиклинальных структур со складками, направленными с северо-востока на юго-восток. Это же подтвердили в своих работах Мохаджель и Фергюссон (2000) [61], Мохаджель и др. [109].

В 1980 г. Уилсон Дж. Л. установил, что и свита Сачун (одна из наиболее древних) прорывает все отложения от кембрия до голоцена и выходит на дневную поверхность. Свиту Сачун он обнаружил в антиклиналях Кара на юге

озера Махарлу, свиту Ахмади – на севере озера, свиту Назарабад – на востоке озера, свиты Кафтарак и Баму – на севере Ширазской впадины [108].

В 1980 г. фирма NKRC изучала водоносные горизонты в дочетвертичных отложениях, сложенных морскими фациями. По составу это карбонатные отложения, преимущественно известняки, доломиты и песчаники. Было установлено, что в районе Загроса широко распространены подземные формы карста. Крупные карстовые пещеры создают системы горизонтальных или слабонаклонных каналов, сложно ветвящихся и образующие огромные залы и гроты. На дне ряда пещер есть много озер, по другим пещерам протекают подземные водотоки (реки), которые питаю карстовые родники [95, 159].

Фирма Сангаб в 1980 г. проводила бурение разведочных и эксплуатационных скважин на территории Хоррамабадского бассейна грунтовых вод для обоснования водоснабжения Хоррамабада и других населенных пунктов подземными водами [104].

В соответствии с работой Штеклина (1982), в Загросе выделено три фазы развития: 1) образования фундамента (докембрийская), 2) платформенная (кембрий–триас), 3) альпийский орогенез (юра–голоцен) [89].

Фирма Махабкоде в 1982 г. установила, что в Ширазском бассейне четвертичный (грунтовый) водоносный горизонт приурочен, в основном, к континентальным аллювиальным и пролювиальным отложениям, которые занимают всю впадину. Толщина этих отложений колеблется от 10 до 350 м. Водопроницаемость пород этого водоносного горизонта колеблется от 100 до 1000 м²/сут, а коэффициент фильтрации от 1,5 до 10 м/сут. Глубина залегания уровня грунтовых вод уменьшается с понижением рельефа. Зеркало грунтовых вод имеет общий уклон от 0,01–0,008 до 0,004. [156].

В связи с расширением городов Шираз и Хоррамабад фирма Махабкоде в 1986 г. провела геологическое, гидрогеологическое, тектоническое изучение межгорных впадин на площади 1500 км². Эта фирма построила геологическую и гидрогеологическую карты масштаба 1:50000 [156].

В это же время фирма Параб проводила гидрологическое и гидрогеологическое изучение территории г. Шираз для выяснения возможностей транспортировки избыточных вод Ширазского бассейна с помощью трубопровода в Хоррамабадскую впадину. Изучение этого района продолжается и в настоящее время [161].

В 1982 г специалистами фирмы Махабкодс и Абкав была проведена повторная интерпретация результатов ВЭЗ как для Ширазского бассейна, так и для Хоррамабадского. При этом использовалась коррелятивная связь геоэлектрических и геофильтрационных параметров, полученных по данным одиночных откачек [156].

В 1983 г. Дегани и Маркиз по геофизическим данным определили, что наиболее древняя формация Хормоз, датируемая докембрием, залегает в центральной части Ширазской впадины на глубинах более 10000 м. Породы этой формации наблюдаются в соляных куполах, выходящих на поверхность. Некоторые крупные купола соли поднимаются над поверхностью в виде мощных антиклиналей [36]. Один из таких куполов находится на востоке озера Махарлу, а другой залегает под антиклиналью Кара. В 1991 г. NKRC подробно его описала и установила его возраст – мезозойский (K_1) [109].

В 1983 г. Кац Д. М. изучал потери воды на инфильтрацию из оросительных каналов и полей орошения в Ширазской и Хоррамабадской впадинах. Он установил, что эти потери составляют до 21 % от водоотбора [45].

В 1984 г. Штеклин Й. в своей работе [89] доказал, что складчатые отложения в геосинклинали Загроса образовались в последней фазе альпийского орогенеза. Согласно теории тектоники плит в этом орогене совмещены две различные континентальные окраины, которые до их столкновения отстояли друг от друга на тысячи километров, в структурном отношении, не имея ничего общего друг с другом.

В 1985 г. Фархуди Г. по геофизическим данным установил, что пресные карстовые воды с горной цепи Загроса на юге Ирана разгружаются в Персидский залив и Оманское море [91].

Куваев А. А. и Шестаков В. М. в 1987 г. установили, что годовое испарение из зеркала грунтовых вод в Ширазском и Хоррамабадском бассейнах зависит от глубины залегания уровня и времени года, в среднем за год составляя 1200–2000 мм [26, 55, 87].

Бахрами М. в 1990 г. по результатам бурения впервые описал отложения озера Махарлу. В этом же году фирма NKRC рассчитала водный баланс озера Махарлу [109].

В 1994 г. Алави М. построил схему поэтапного образования складчатой цепи Загроса. Согласно этой схеме в позднюю меловую эпоху и раннюю кайнозойскую эратему плиты Африки и Аравии под действием тектонических сил закрыли Новый Тетис и сформировалась горная цепь Загроса [90].

С 1995 по 1996 г. грунтовые воды Хоррамабадского бассейна изучала фирма NKRC в связи с возможным их загрязнением и истощением [109].

В 1996 г. фирмой Параб и учреждением по охране природы провинции Фарса было проведено определение тяжелых металлов в подземных водах Ширазского бассейна. Это позволило классифицировать подземные воды, используемые для водоснабжения по микрокомпонентному составу, выделить группы вод с различным содержанием ряда компонентов. Было также установлено, что грунтовые воды в некоторых частях бассейна содержат повышенные концентрации свинца, кадмия, хрома и железа. Это свидетельствует о техногенном загрязнении грунтовых вод [112].

С 1987 по 1999 г. подземные воды Ширазского и Хоррамабадского бассейнов изучала кафедра гидрогеологии МГУ (Шестаков В. М., Никитин Р. М., Фиделли И. Ф., Куваев А. А., Поздняков С. П. и др.). Результаты этих исследований опубликованы в монографии и нескольких статьях, окладывались на международных научных конференциях по гидрогеологии [26, 55, 87].

В 1999 г. Камали Голамреза в МГУ защитил диссертацию на тему: «Формирование потоков подземных вод Ширазской впадины (Иран)». Он составил обобщенный баланс подземных вод Ширазского бассейна и построил гидродинамическую (геофильтрационную) модель для изучения регионального формирования ресурсов подземных вод с выявлением балансовых факторов. С помощью такой модели предполагается производить региональную переоценку ресурсов подземных вод, а также изучать процессы подтопления и обосновывать работу дренажных систем. Компьютерное моделирование проводилось по программе MODFLOW. В работе [43] доказана принципиальная возможность повышения производительности действующих водозаборов, а также показана эффективность устройства новых дренажных сооружений для понижения уровня подземных вод в г. Шираз.

В 2010 г. фирма Сангаб провела новые гидрогеологические исследования на территории Хоррамабадского бассейна с целью обоснования орошения сельскохозяйственных земель избыточными подземными водами, которые планируется перекачивать из Ширазского бассейна с помощью трубопровода в Хоррамабадскую впадину [107].

В 2012 г. определение тяжелых металлов в подземных водах из 23 скважин и 6 родников Хоррамабадского бассейна выполнил соискатель Амджади А. в Учреждении по охране природы провинции Лурестан Ирана [91].

Амджади Азиз с 2011 по 2015 г. по теме диссертации опубликовал 12 печатных работ в разных издательствах Украины, России, Египта и Канады. Работы посвящены районированию грунтового водоносного горизонта Хоррамабадского и Ширазского бассейнов по химическому составу и определению сходства грунтовых вод этих бассейнов по гидрохимическим данным, прогнозу изменения химического состава подземных вод по данным многолетних наблюдений и определению баланса грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов и их сравнение [2–9, 91, 92].

1.2. Обзор развития статистических методов гидрогеологических исследований

Попытки делать прогнозы на будущее ученые предпринимали во все времена. С развитием науки и техники, появлением все более мощного математического и логического аппарата качество прогнозов постоянно улучшается. Сейчас можно бы говорить, что с появлением современных вычислительных, измерительных и других приборов человек может делать точные прогнозы, но это далеко не так. И, все же, пытаться и делать прогнозы просто необходимо. Еще в 1968 г. Н. Виннер говорил: «Человек стал настолько могущественным, что любое нерасчитанное его движение: с роботами, с атомной энергией, с химией – может иметь тяжелые непредвиденные последствия. Это – парадокс могущества».

Все вышеизложенное относится также и к гидрогеологии. Гидрогеологические прогнозы, с разной степенью точности, начали делать давно. Уже в 1833 г. по прогнозу, основанному на известных фактах и теории, у дома инвалидов в Париже была заложена Гренельская скважина на воду. Прогноз оправдался. С тех пор количество прогнозов в самых разных сферах гидрогеологии постоянно увеличивалось. С течением времени улучшалось и качество прогнозов.

В XX в. получили развитие гидрогеологические прогнозы в связи с горнорудными работами, мелиорацией земель, сооружением водохранилищ, каналов, тоннелей, метро, оседанием и подтоплением зданий, районов и целых городов, искусственным восполнением запасов подземных вод, поисками месторождений полезных ископаемых, загрязнением подземных вод и т. д.

Становление методов гидрогеологических прогнозов процесс длительный. Перечислим некоторые его узловые точки: а) первая в гидрогеологии прогнозная модель – уравнение Дюпюи для установившегося притока подземных вод к колодцам (1857 г.); б) математические модели неустановившегося движения подземных вод (Жуковский Н. Е., 1889 г., Ж.

Буссинеск, 1904 г.) – необходимая научная основа пространственно-временных гидродинамических прогнозов; в) первая математическая модель для прогноза режима подземных вод (Ж. Буссинеск, 1904 г.); г) аналоговые методы: электрогидродинамический (Павловский Н. Н., 1920 г.), гидравлический (Лукьянов В. С., 1937 г.), электрических сетей (60-е годы), конечно-разностные методы (Каменский Г. Н., 1940 г.); д) математико-статистические методы (60-е годы); е) гидрогеохимические методы прогноза месторождений полезных ископаемых (Сафронов Н. И., 1936 г.); ж) гидрогеохимические прогнозы на основе методов химической термодинамики и физико-химической гидродинамики (60-е годы); з) математическое моделирование с использованием ЭВМ и более современных и мощных компьютеров (с 70-х годов и до сих пор).

Даже из этого краткого перечня следует, что методология гидрогеологического прогнозирования складывается из методов, разрабатываемых гидрогеологами на основе представлений и методов, в основном, точных наук, и из методов, применяемых во всех науках (математические, формально-логические и др.). В целом, преобладают общенаучные методы. При их использовании необходимо творческое их приспособление к краевым условиям и ситуациям, свойственным гидрогеологическим системам. Естественно, что сложные проблемы прогнозирования, нерешенные в рамках общей прогностики, не имеют адекватного решения и в гидрогеологии.

Впервые в мировой практике в 1970 г. во ВСЕГИНГЕО был составлен и выпущен прогноз летне-осенних минимальных и среднегодовых уровней грунтовых вод по территории, охватывающей европейскую часть бывшего СССР. Этим было положено начало службе регулярных прогнозов режима грунтовых вод в системе Министерства геологии СССР и УССР.

На основании проведенных опытных исследований по оценке роли природных факторов и сопутствующих явлений для влаго- и солепереноса в

зоне аэрации Бутом Ю. С., Ситником А. Б. и др. были составлены общие и упрощенные математические модели в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа. Разработанная методика математического моделирования для специальных аналоговых вычислительных нелинейных устройств, позволяет решать прогнозные задачи на основе упрощенных математических моделей с учетом оптимальных граничных условий для гидрогеологических процессов в зоне аэрации [15].

В 1983 г. в свет вышла книга Сарманова О. В. и Сарманова И. О. под названием «Основные типы корреляции, применяемые в гидрогеологии» [77]. В этой книге излагается теория корреляции. Она нашла приложение при описании и построении математических моделей гидрогеологических процессов, а также при моделировании случайных величин, встречающихся в гидрогеологии. Некоторые типы корреляции используются в теории прогнозирования, а также при водохозяйственных расчетах.

В 1985 г. выходит статья Ефременко А. В., в которой он показывает, что зависимость структуры рядов гидрогеологических наблюдений от их длины не является прямой. Исследования показали, что увеличение длины рядов наблюдений приводит к повышению его случайности и сокращению детерминированной составляющей [38].

С 1996 г. по 2001 г. Решетовым И. К., Чомко Д. Ф. и Чомко Ф. В. опубликовано ряд статей, в которых используются методы многомерной математической статистики для прогноза качества вод водоносного горизонта в процессе его эксплуатации, определения гидрогеологических окон, обоснования балансовой структуры эксплуатационных запасов [74–76, 85, 86, 92].

С 2012 и до настоящего времени Амджади Азиз, Чомко Д. Ф. и Чомко Ф. В. опубликовали несколько статей и тезисов докладов на разных конференциях в Украине, России, Канаде и Египте [2–9, 59, 85, 86]. В этих статьях обосновывается применение кластерного и факторного анализов при изучении грунтовых вод Западного Ирана, использования стохастической модели для прогноза качества этих вод.

РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

2.1. *Административное положение*

Территория исследований находится на западе и юго-западе Ирана и расположена в складчатом поясе Загроса в Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадинах. К этим впадинам приурочены одноименные бассейны подземных вод.

Хоррамабадский бассейн находится в провинции Лурестана на западе Ирана. Изучением и управлением водными ресурсами этой впадины занимается администрация по водным делам этой провинции, которая подчиняется Министерству энергетики Ирана.

Ширазский бассейн находится в провинции Фарса на юго-западе Ирана. Изучением и управлением водными ресурсами этой впадины занимается администрация по водным делам этой провинции, которая также подчиняется Министерству энергетики Ирана.

Города Хоррамабад и Шираз – самые большие города в своих впадинах имеют особое значение с точки зрения древней (до 2500 лет) и новейшей истории. Население г. Хоррамабад и относящихся к нему оазисов, составляет 1300000 чел., а г. Шираза и 97-ми, относящихся к нему оазисов, – 1700000 чел. Норма пользования питьевой водой на человека достигает 280–300 дм³/сут.

Рассматриваемые бассейны представляет собой межгорные впадины с высотами порядка 1520 м над уровнем моря (рис. 2.1). Площадь впадины составляет около 936 км²: 42 % (395 км²) ее используется для земледелия; 21 % (196 км²) – это населенные пункты; 37 % (346 км²) – залежная земля.

2.2 Рельеф

В Иране выделяются две большие горные цепи: Альбурс и Загрос. Горная цепь Загроса – продолжение горных цепей Гималаев и Альп [36, 62].

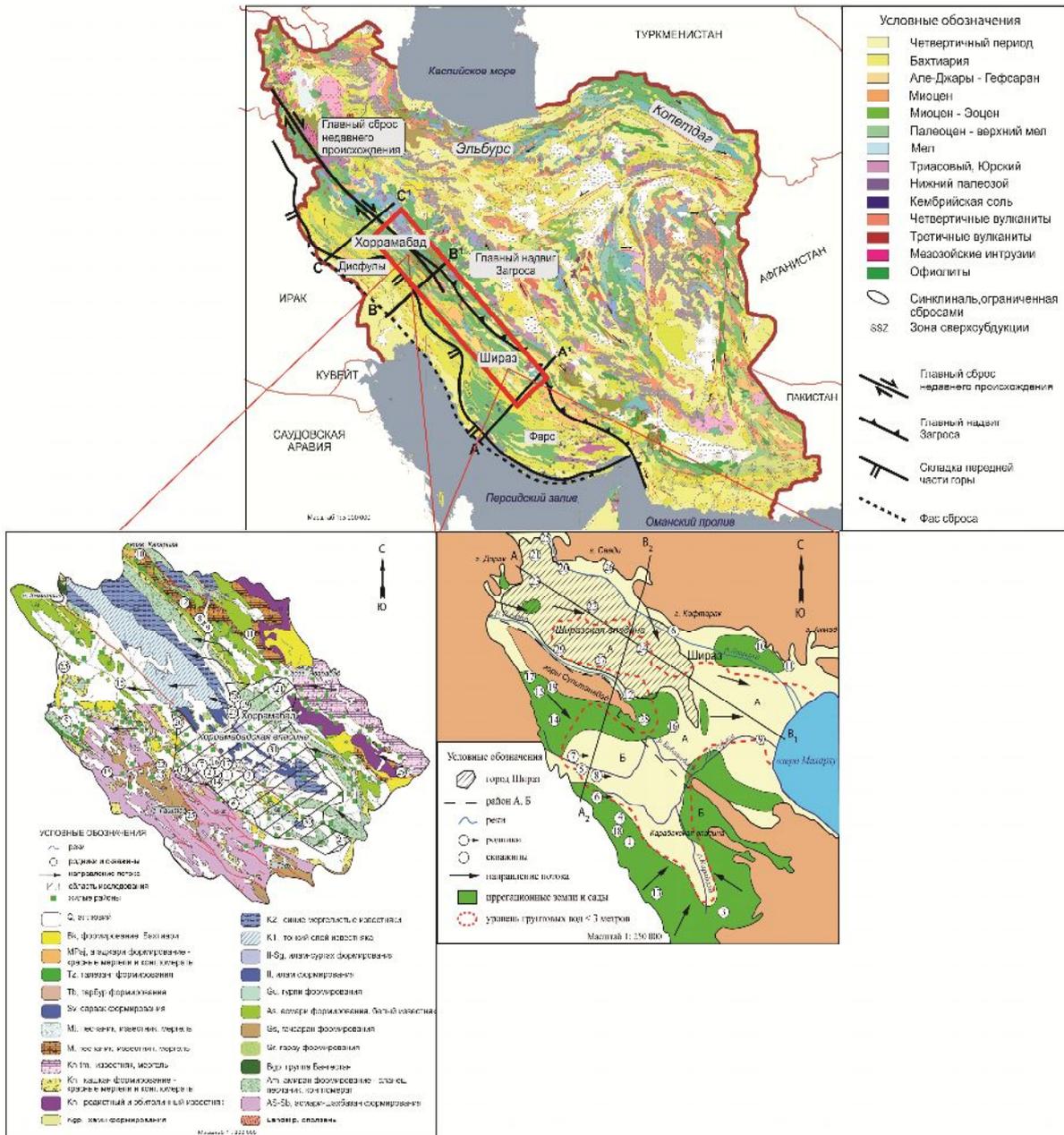


Рис. 2.1. Обзорная карта-схема Хоррамабадской и Ширазской впадин

Территория исследований включает в себя Хоррамабадскую и Ширазскую межгорные впадины, окруженные горными хребтами.

Равнинная часть Хоррамабадского бассейна окружена горами: на севере находятся горы Сефидку и Камарсия, на юге впадины – горы Таф, на юго-востоке – горы Сефид и на востоке – горы Азгане и Яварабад (рис. 2.1, 2.2).

Равнинная часть Ширазского бассейна ограничена хребтами: на севере – горы Саади, Кафтарак (высота до 2800 м); на юге – горы Султанабад, (высота 1750 м); на западе – горы Дерак и Калат (высота до 3100 м); на юге – горы Сабзпушан (высота до 2900 м) (рис. 2.1, 2.2).

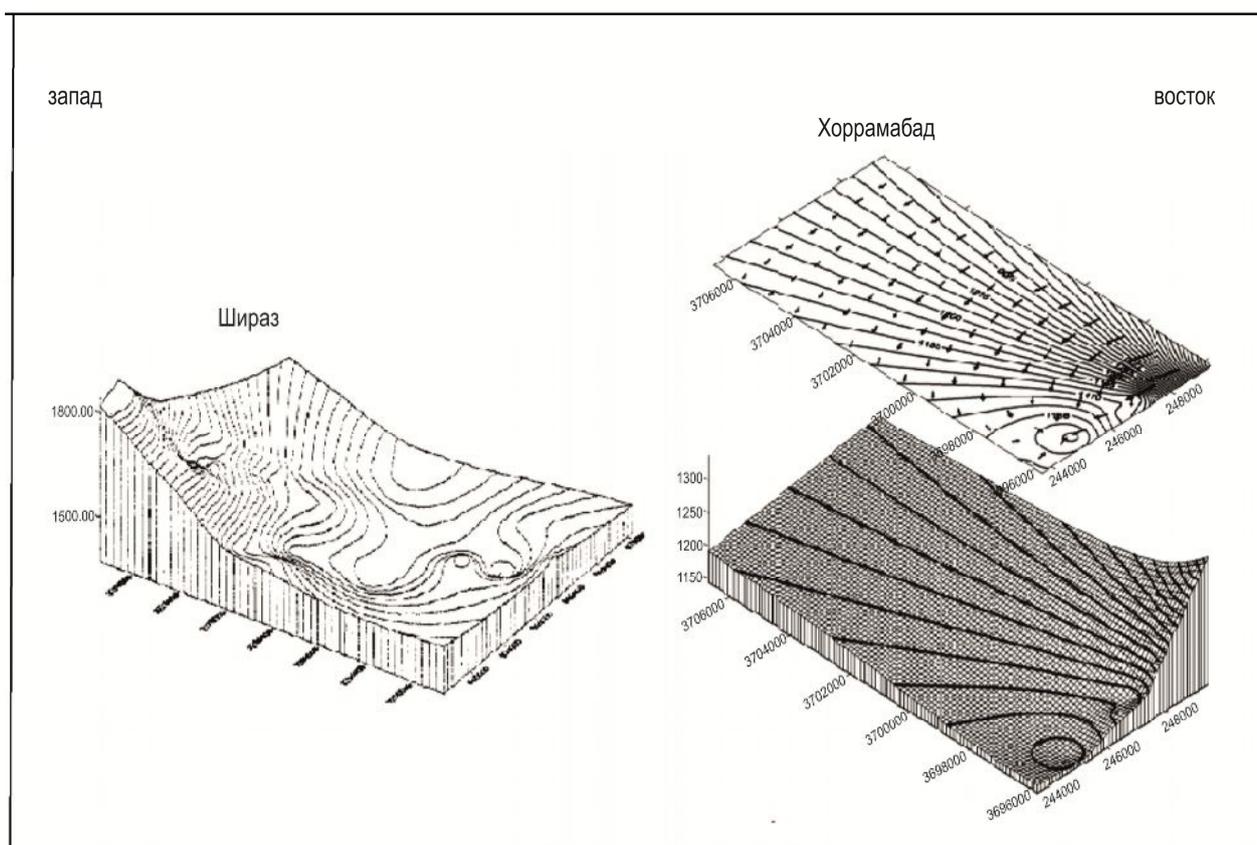


Рис. 2.2. Блок-схема рельефа Ширазской и Хоррамабадской впадин.

2.3 Климат

Климат района обуславливается не только географическим положением, но и наличием разновысоких горных хребтов, оказывающих заметное влияние на распределение осадков, температур и ветров.

В районе исследований выделяются четыре климатические зоны.

1. Холодный горный климат приурочен к высокогорным районам свыше 1600–2500 м. Он отмечается на севере и на востоке Хоррамабадского бассейна,

на севере и на западе Ширазского бассейна. Этот климат отличается холодной и долгой зимой и коротким жарким летом.

2. Сухой жаркий климат отмечается на юго-западе от г. Хоррамабад и на востоке от г. Шираз. Здесь зима короткая и лето относительно долгое.

3. Переходный климат в районе г. Шираз – теплый и умеренный. Этого климата нет в районе г. Хоррамабад.

4. Сухой холодный климат отмечается только на востоке и северо-востоке г. Хоррамабад.

Относительная влажность в течение года колеблется от 60–80 %: в зимние месяцы до 40–20 % летом. Средняя скорость ветра составляет 4.5 м/с (16,2 км/ч).

Летом на территории исследований преобладает жаркий сухой воздух. Самым жарким месяцем является июль, максимальная температура воздуха достигает 38–44 °С (рис.2.3, 2.4). Минимум температуры воздуха -5 °С достигается в декабре–феврале. Продолжительность морозного периода колеблется от 25 до 40 суток. Амплитуда колебаний абсолютных температур достигает 48 °С. Среднегодовая температура воздуха составляет +17.5 °С. Понижение температуры в земное время связано с проникновением во впадины северных воздушных масс. Однако морозы здесь очень недолговременные, поскольку на смену холодному воздуху с севера часто приходят теплые воздушные массы с юга. Это обуславливает неустойчивость снежного покрова, особенно на равнинной части этих межгорных впадин.

Увлажнение Хоррамабадского бассейна в значительной степени определяется проникновением воздушных масс с востока и северо-востока, а Ширазского бассейна – из запада и северо-запада. Наиболее влажным периодом является весна, когда на территорию проникает теплый тропический воздух с юго-запада. Для этого времени характерны частые и обильные ливневые дожди.

Наибольшее количество осадков приходится на период ноябрь–февраль (70% от годовой суммы); немного меньше 28 % – на март–май и совсем незначительная часть (2 %) – на период с июня по октябрь (рис. 2.3).

Среднегодовая сумма атмосферных осадков составляет 460 мм в Хоррамабадской впадине и 409 мм – Ширазской, а на высокогорье – до 515 мм в Хоррамабадской впадине и до 550 мм в Ширазской.

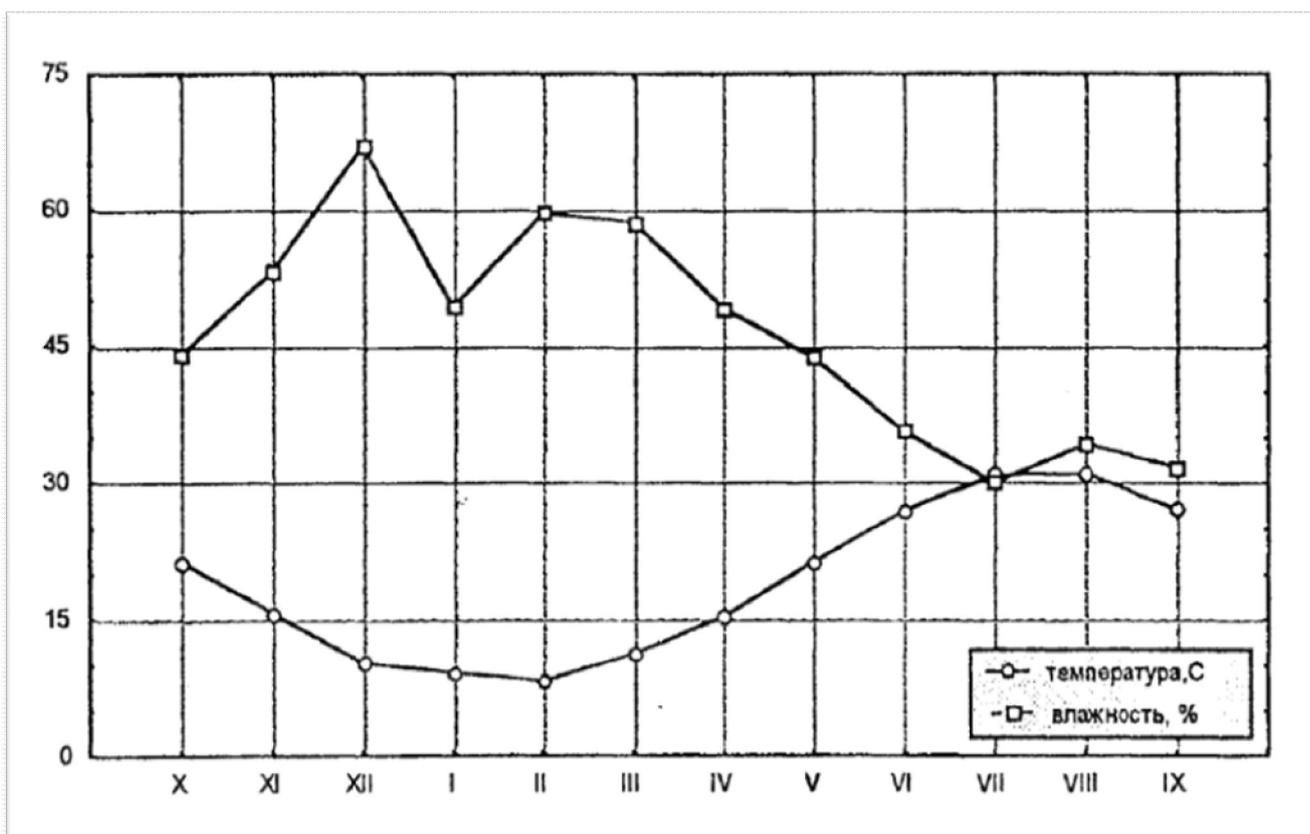


Рис. 2.3. Графики изменения температуры и влажности воздуха (метеостанция «Добане», абс. отм. 1750 м, 1980–2012 г.)

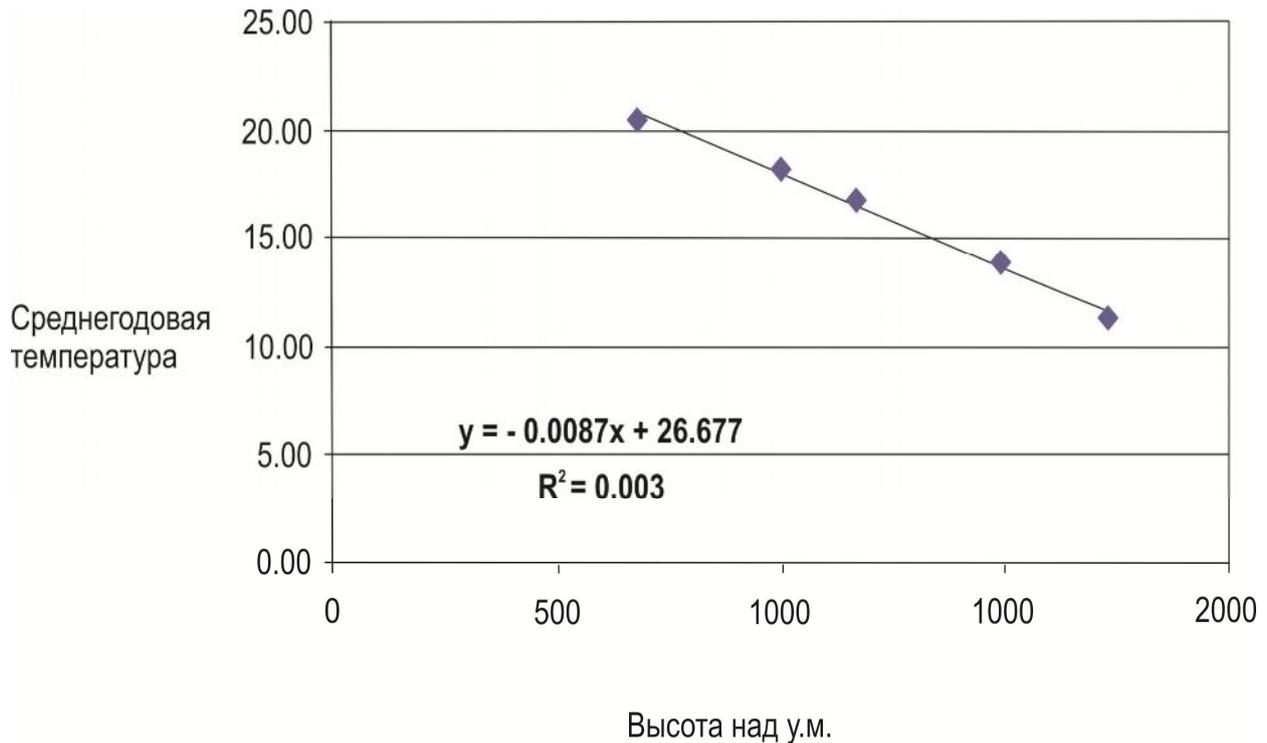


Рис. 2.4. График зависимости температуры от абсолютной высоты (м)

Причем основная часть атмосферных осадков выпадает в холодный период (рис. 2.5). Максимальное количество осадков приходится на декабрь, январь и февраль, а минимум – на июнь, июль, август и сентябрь.

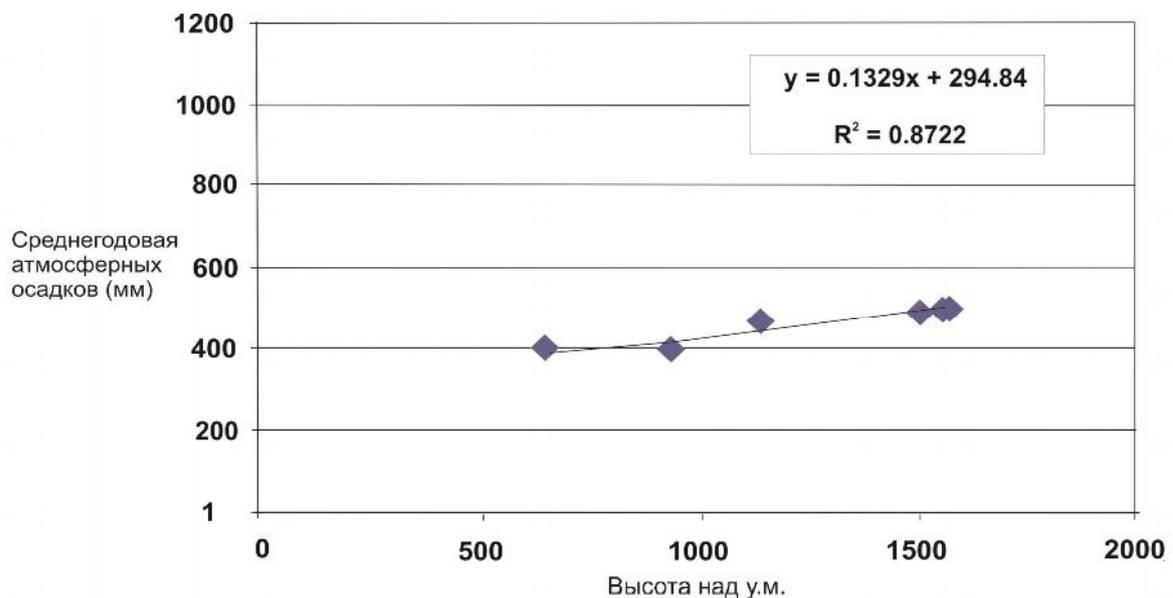


Рис. 2.5. График изменения атмосферных осадков от абсолютной высоты изучаемой области.

Господство над территорией Хоррамабадской и Ширазской впадин сухих, тропических воздушных масс в летнее время является предпосылкой

интенсивного испарения с поверхности земли. В то же время, естественные запасы влаги в корнеобитаемом слое почвы являются недостаточными для полноценного возделывания сельскохозяйственных культур. В особенности это касается территорий с глубоким залеганием уровня подземных вод (более 3 м).

В процессе вегетации растения транспортируют значительное количество влаги, которое одновременно с испарением составляет существенную часть водного баланса корнеобитаемого слоя почвы. В период наиболее плотного покрытия поверхности земли растениями суммарное испарение может превысить значения испаряемости на 15–20%

В Ширазской впадине не проведена специальная экспериментальная работа для расчета суммарного испарения с поверхности почвы. Только на двух метеостанциях определено испарение с поверхности воды по методу Белинкиридел (около 1735 мм/год), а в Хоррамабадской впадине – только на четырех метеостанциях (около 1865 мм/год). Испаряемость с водной поверхности в Хоррамабадской впадине достигает до 2250 мм/год (рис. 2.6, 2.7).

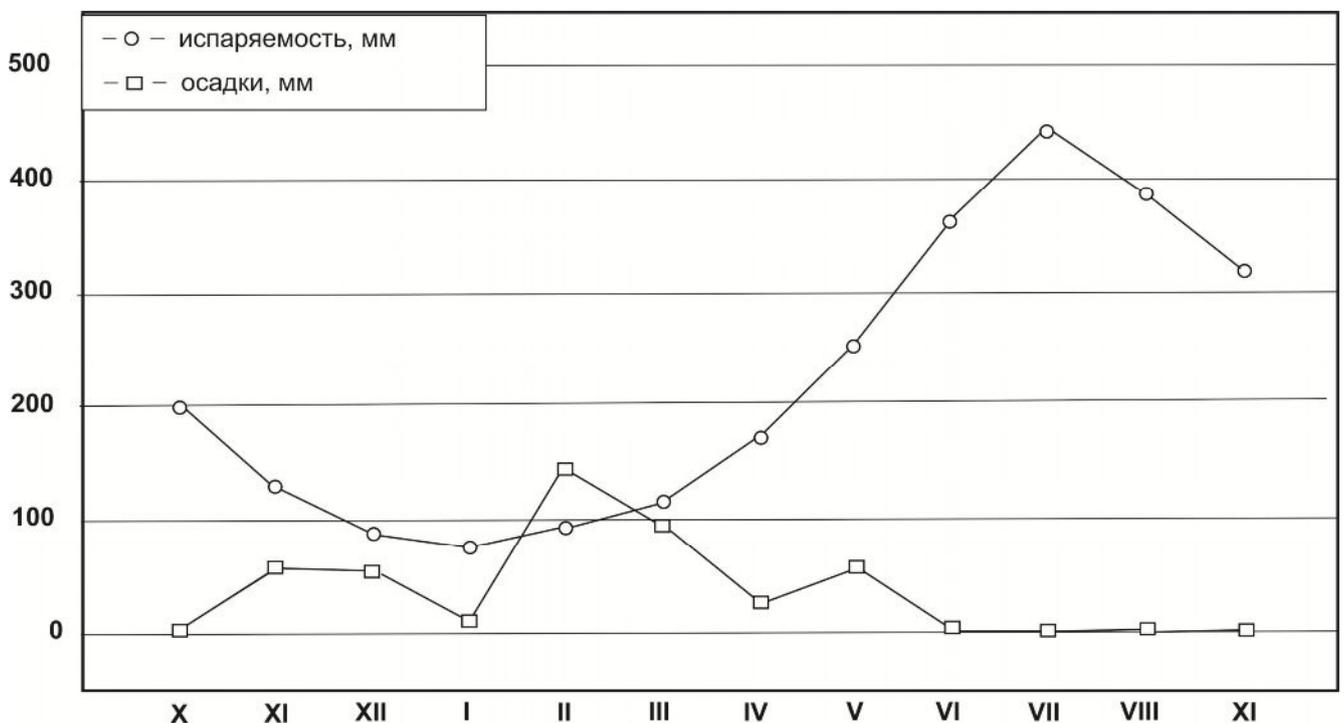


Рис. 2.6. Зависимость атмосферных осадков и испаряемости с поверхности воды (метеостанция «Добане», абс. отм. 1750 м, 1993–1996 г.)

2.4 Гидрография

В связи с глубоко-материковым положением исследуемой территории, особенностями атмосферной циркуляции и значительными абсолютными высотами водораздельных хребтов основным источником питания рек являются талые воды сезонных снегов, снежников и, отчасти, ледников [65, 100].

Основной рекой на территории Хоррамабадского бассейна является р. Хоррамабад. Река берет свое начало высоко в горах в зоне обильного увлажнения. Минерализация воды не больше $0,5 \text{ г/дм}^3$, состав воды гидрокарбонатный кальциевый. На территории этой впадины постоянный сток река имеет только зимой и ранней весной.

В Ширазском бассейне нет постоянных крупных рек, есть несколько временных водотоков (Хошкруд, Рахдар и др.), которые протекают через впадину и впадают в озеро Махарлу (рис. 2.1, 2.8, 2.10).

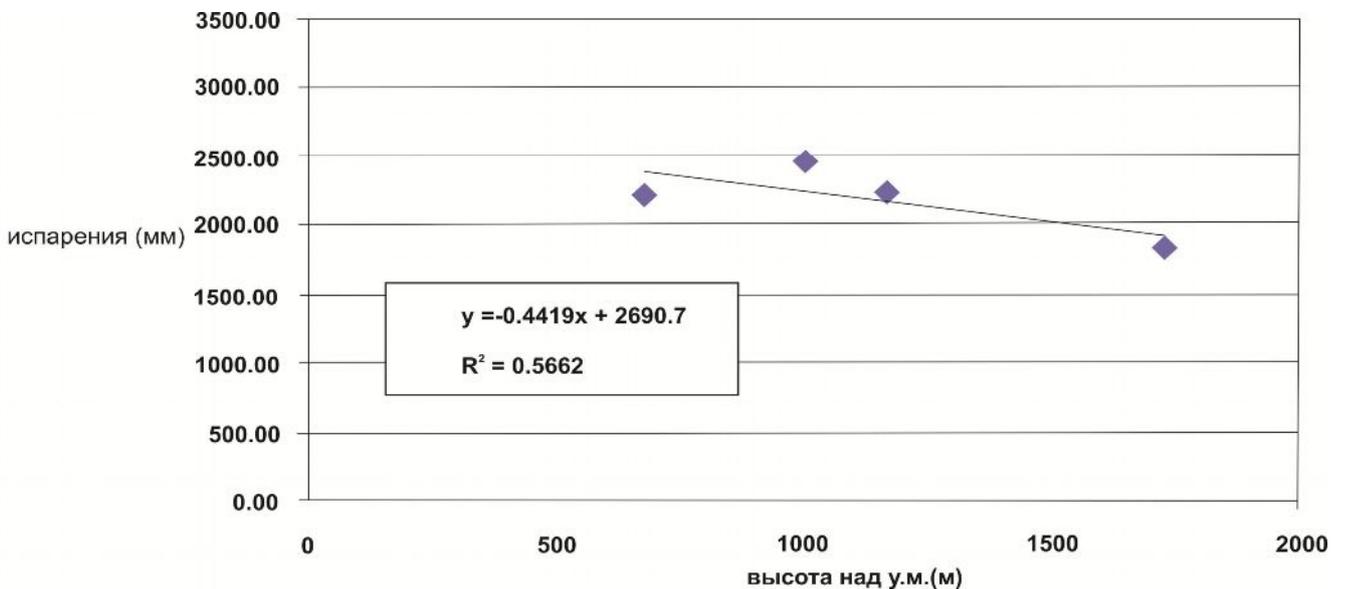


Рис. 2.7. График зависимости испарения от высоты изучаемой области

Основной рекой на территории Ширазском бассейне является р. Хошкруд. Это временная река, которая берет свое начало на северо-западе Ширазского бассейна. Она протекает через впадину с северо-запада на юго-восток близи ее

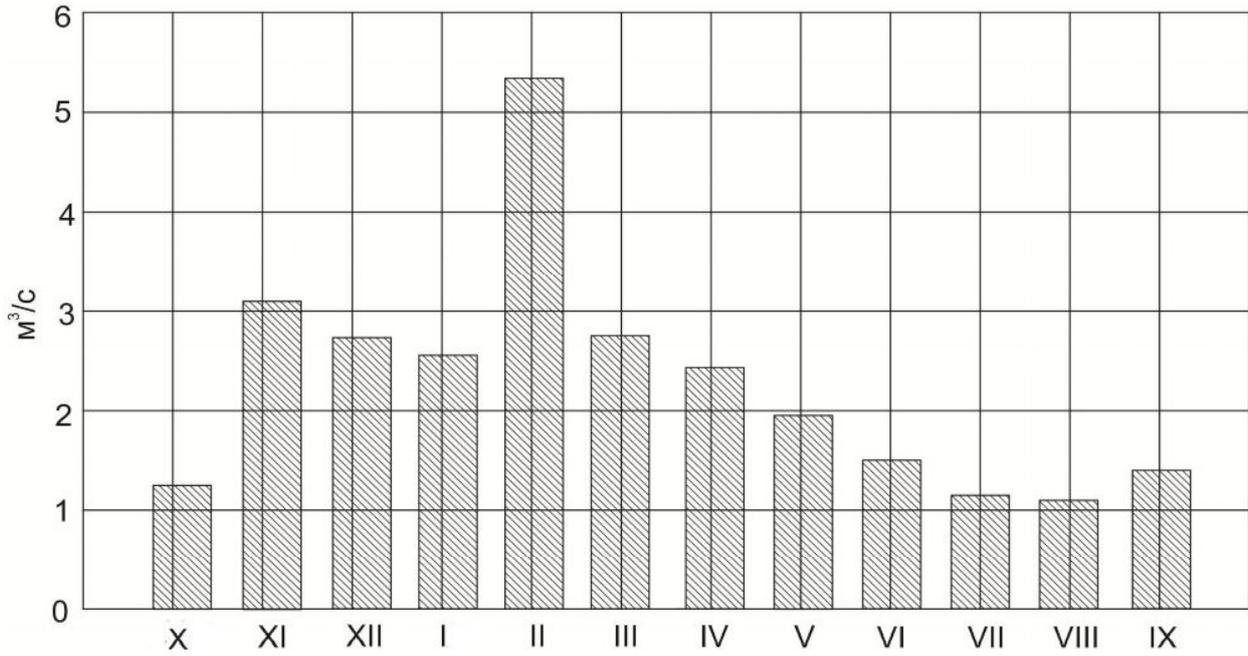
северной границы и разгружается в озеро Махарлу. Длина реки 45 км. В 6 створах расход реки измеряется такими величинами (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Расход р. Хошкруд в шести створах

№ створа	Расход каналов, $\text{дм}^3/\text{с}$	Расход реки, $(\text{дм}^3/\text{с})$	Сума расхода, $(\text{дм}^3/\text{с})$
1	353	915	1268
2	686	1333	2019
3	619	684	1303
4	–	400	400
5	–	100	100
6	–	600	600

В верхнем течении реки до створа № 2 несколько притоков (кяризов, родников) питают реку, поэтому расход увеличивается. Со створа № 2 до створа № 5 река питает подземные воды, подается для орошения садов и земледелия с помощью каналов ($1658 \text{ дм}^3/\text{с}$) и разгружается в разломы. Со створа № 5 до озера река дренирует подземные воды.



Расход реки Хошкруд (Ченар sute пост. Ширазкая впадина)
(2011 - 2012 г)

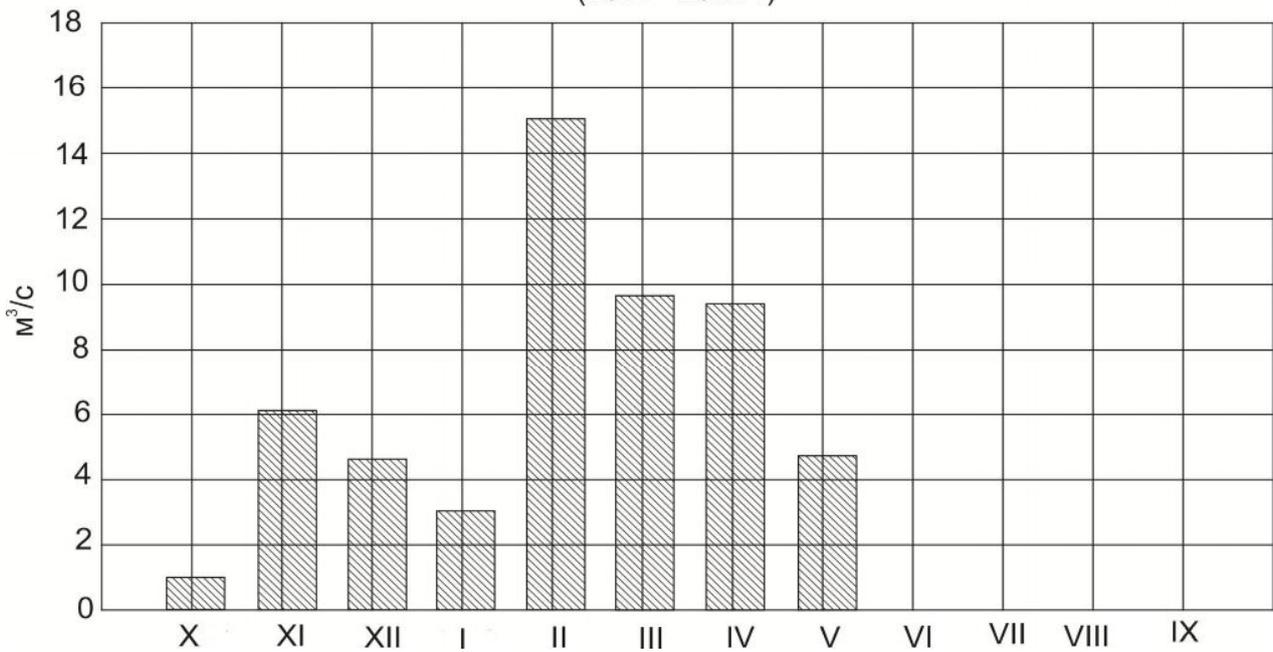
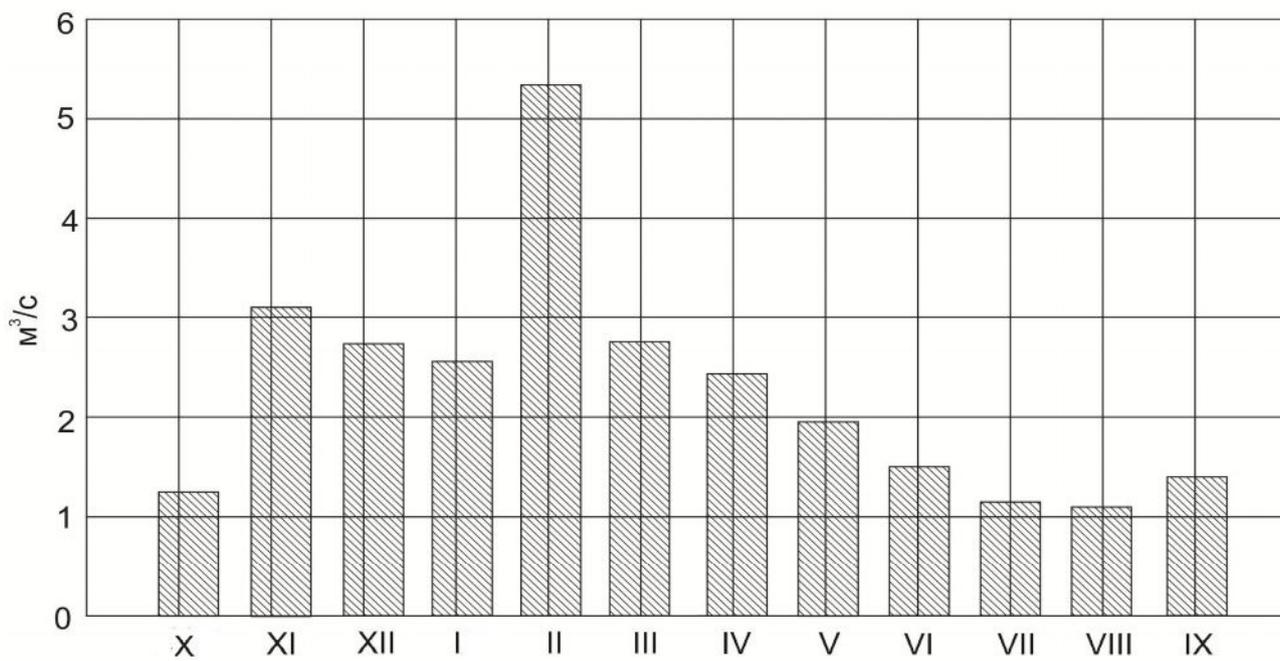


Рис. 2.8. Расход реки Хошкруд в Ширазской впадине

Река Рахдар это временная река, которая протекает с северо-запада на юго-восток через южную часть г. Шираз. В летний период река в верхнем течении (створ № 1) имеет средний расход около 220 дм³/с. После этого створа около 80% расхода реки (170 дм³/с) используется на орошение земель в г. Шираз и его окраин. Через 3 км вода в реке исчезает за счет инфильтрации и испарения.



Расход реки Хошкруд (Ченар sute пост. Ширазкая впадина)
(2011 - 2012 г)

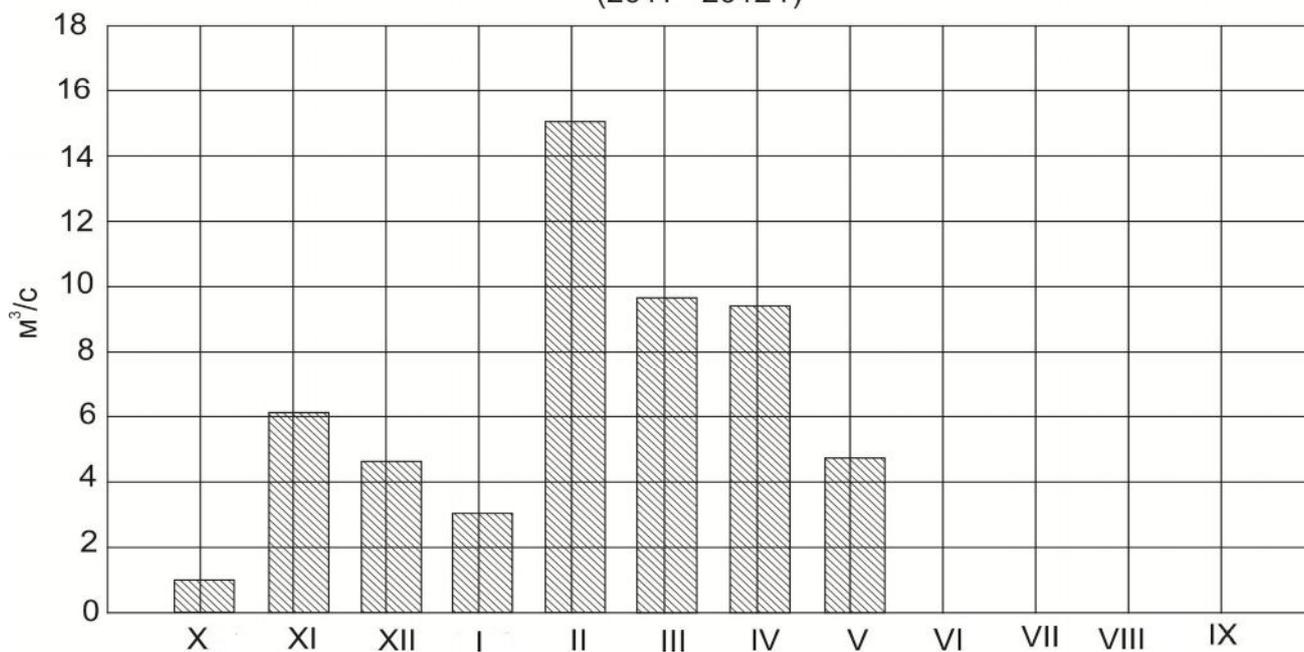


Рис. 2.9. Расход рек Полфаса и Рахдар в Ширазской впадине

В 5 км по течению от створа № 1 река дренирует подземные воды г. Шираз, обретая снова постоянный водоток. На территории Ширазского бассейна постоянный сток эта река имеет только зимой и ранней весной. В районе Карабаха река соединяется с рекой Бабахаджи-1 и впадает в озеро Махарлу.

В районе Карабаха с гор Сабзпушана 15 водотоков (кяризов, родников) стекают в Ширазскую впадину. Эти водотоки образуют родники Бабахаджи-1 и Бабахаджи-2. Реки Бабахаджи-1 и Бабахаджи-2 –дренируют избыточные подземные воды района. Средний расход родников и кяризов более 1060 дм³/с.

Реки Бабахаджи-1 и Бабахаджи-2 от истоков на протяжении около 3 км питают подземные воды и подаются на орошение, однако после этого роль рек меняется. Эти реки уже дренируют подземные воды и, наконец, разгружаются в озеро Махарлу; в створе Полфаса средний расход рек – более 2400 дм³/с (рис. 2.1, 2.9, 2.10).

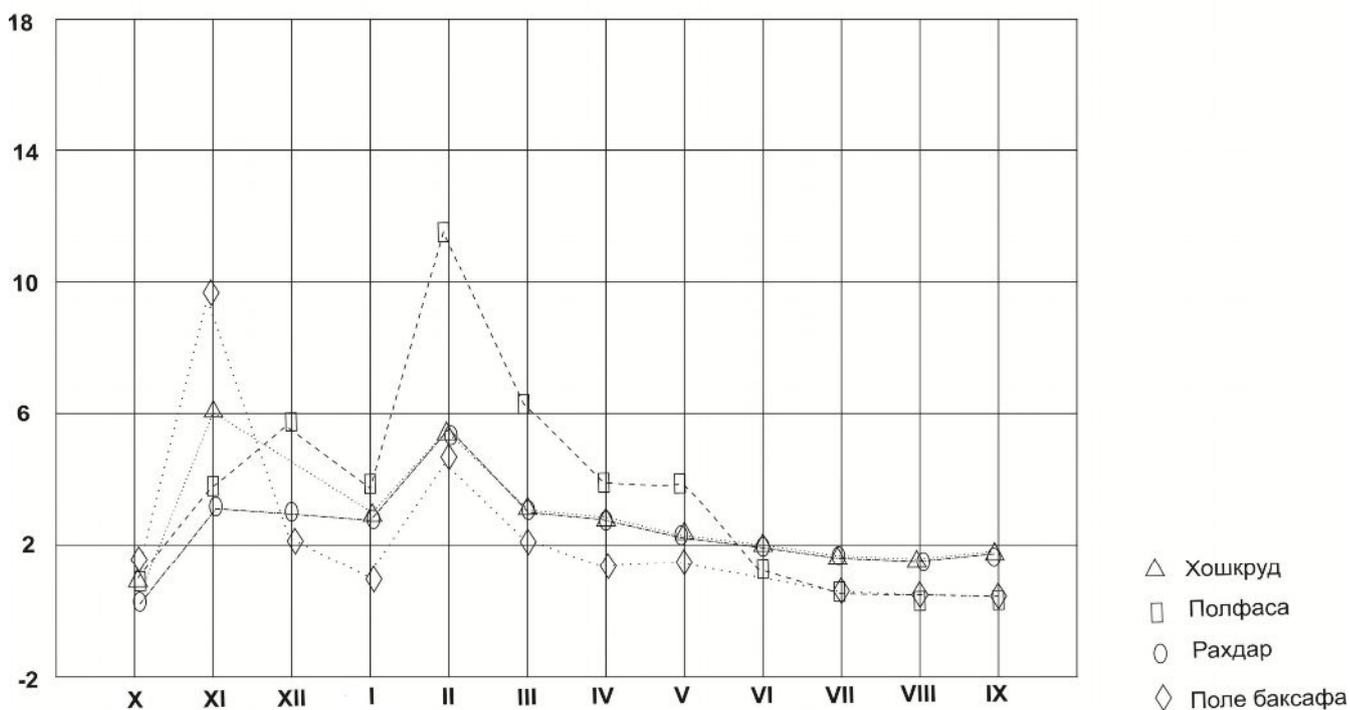


Рис. 2.10. Расход рек в Ширазской впадине

Рассольное озеро *Махарлу* находится на востоке Ширазского бассейна, его площадь в зависимости от атмосферных осадков и интенсивности испарения составляет от 230 320 и более км², абсолютная отметка – 1460 м (рис. 2.1). Средняя глубина озера колеблется от 0,1 до 0,4 м. Наибольшая глубина наблюдается зимой и ранней весной и достигает 2,0 м. Минерализация воды в этом озере колеблется от 30 до 354 г/дм³, вода имеет хлоридный натриевый

состав. Запасы соли (NaCl) в озере составляют 50 млн. тонн. Из озера каждый год добывают около 180000 тонн соли.

Озеро Махарлу образовалось в синклинали между горами Ахмади и Кара, относящейся к тектонической депрессии.

2.5 Почвенно-растительный покров

Большинство почв Хоррамабадской и Ширазской впадин это аллювиальные отложения, являющиеся продуктом эрозии, размывания и переотложения горных пород в результате деятельности водотоков из горного обрамления. На этих отложениях развились песчаные, глинистые и известковистые почвы, обладающие средней проницаемостью.

В Хоррамабадской и Ширазской впадинах и окружающих горах нет густых лесов. Но в этих впадинах много густых садов (около 60 км²). Дикие кусты лесных фруктов распространены в горах. Высота кустов достигает 3–4 м.

Сельское хозяйство развито на 240–395 км² территории впадин. Возделываются пшеница, люцерна, ячмень и кунжут. Большие территории возделываемых земель занимают сады и виноградники, поля для выращивания овощей и т. д. В некоторых местах впадин возможно земледелие, но оно ограничено дефицитом водных ресурсов, и хороший урожай здесь получают только в относительно многоводные годы. В последние годы строительство жилых домов интенсивно возросло за счет сокращения площади садов.

Поэтому оптимальное использование водных ресурсов – это рациональное использование подземных и поверхностных вод, охрана и защита их от загрязнения и истощения.

РАЗДЕЛ 3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Геологическое строение

Большой вклад в изучение геологического строения Ирана внесли такие исследователи: Али Дервиш Заде [36], Магфури Могадам И., Пазуки. А., Зареи Сахамие [62], Овчинников А. М. [66], Петров М. П. [68], Яншин А. Л. [80], Штеклин Й. [88], Aghanabati A. [89], Boulourchi M. H. [102], Braud J. [104], Cambardella C. A. [106], Gill W. D. [118], Hessami K. [124], Mostofi B. [136], Motiei H. [137], Murriss R. J. [138], O'Brien C. A. E. [140], Oveisi B. [141] Payrowan E. [142]. Rahimi M. [144], Stocklin, J. [147, 148], Talbot C. J. [150] и др.

В соответствие с геолого-структурным районированием Ирана территория исследований относится к крайнему юго-западному району в горной системе Загроса, обрамленного его отрогами, образующими Ширазскую синклиналь, в которой выделяются Хоррамабадская и Ширазская межгорные впадины [66].

В работах Штеклина Й. [89, 147, 148] в Загросе выделено три фазы геологического развития:

- 1) образование фундамента (докембрий);
- 2) платформенная (кембрий – триас);
- 3) орогенез альпийский (юра – голоцен).

Геологические карты-схемы и схематические стратиграфические колонки Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадин приведены на рис. 3.1, 3.2 и 3.3 и в табл. 3.1, 3.2. Состав отложений докембрийского фундамента очень сложен. Отложения представлены метаморфическими породами. В районе исследования эти породы отсутствуют на поверхности земли, а по геофизическим данным находятся на глубине 11–13 км [36, 62].

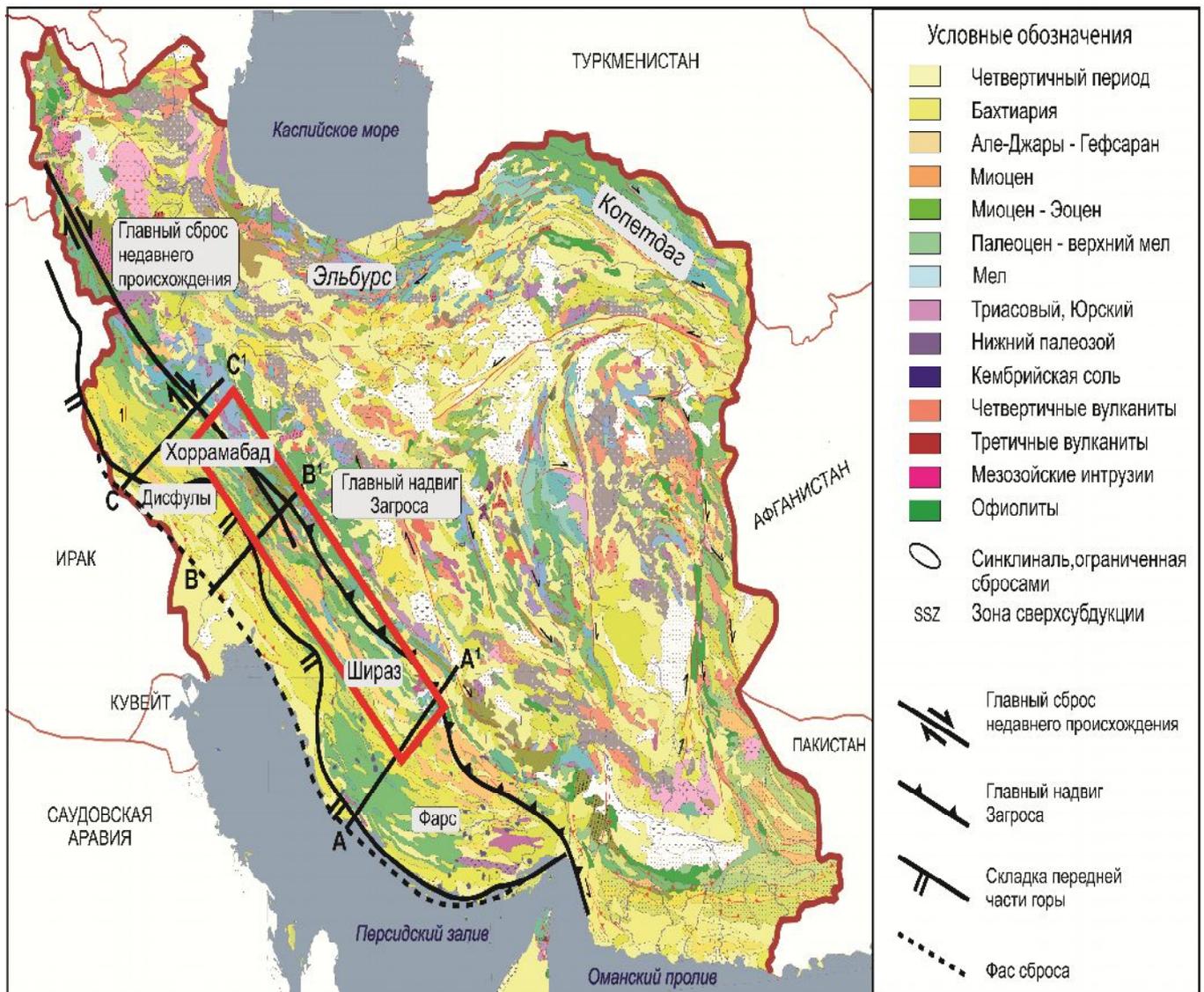


Рис. 3.1. Геологическая карта территории исследований

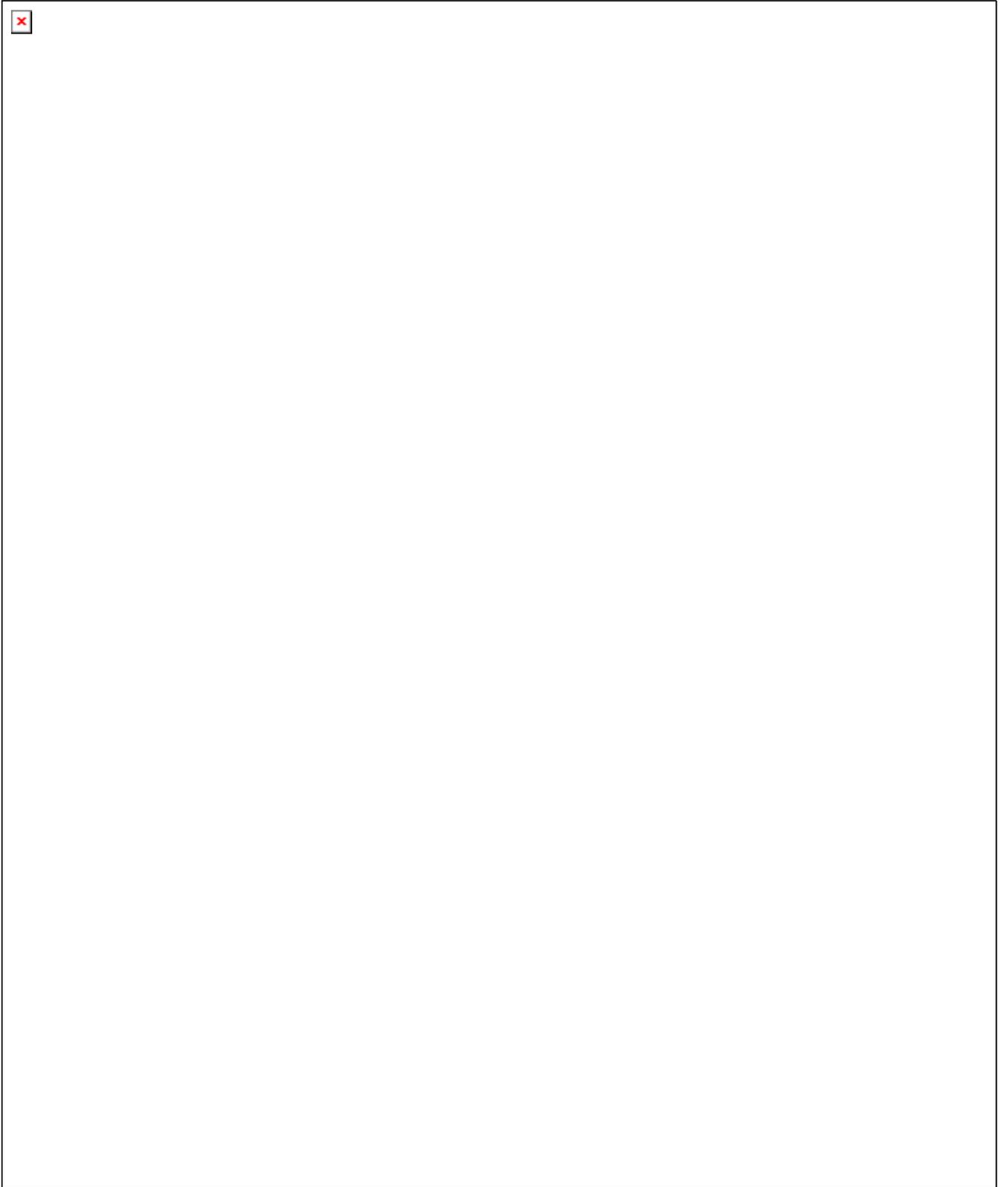


Рис. 3.2. Геологическая карта-схема Хоррамабадской межгорной впадины

Таблица 3.1

Стратиграфическая колонка Хоррамабадской межгорной впадины

Наименование формации	Геологический индекс	Площадь, км ²	Литологический состав
Аллювий	<i>Q</i>	994,42	Старые и новые аллювиальные отложения террас, конусов выноса и речных осадков.
Бахтияри	<i>Q₁bk</i>	94,88	Конгломерат, каменный песчаник, Aston Silt,
Агаджари	<i>N₂aj</i>	6,8	Известняк песчанистый, мергель, каменный песчаник
Гачсаран	<i>N₁Gs</i>	77,86	Мергель, гипс, ангидрит, соль из слоями глины
Асмари	<i>P₂as</i>	173,41	Белый известняк массивный
Асмари – шахбазан	<i>P₂as-sb</i>	274,41	Доломитизированный известняк и доломит кристаллический
Кашкан	<i>P₂kn</i>	93,54	Конгломерат, песчаник, красные алевролиты
Талезанг	<i>P₂tz</i>	5,87	Среднезернистый серый и коричневый известняк
Амиран	<i>P₁am</i>	193,96	Алевролиты, песчаник, кремнистый конгломерат и известняки Chile
Гурпи	<i>K₂Gu</i>	7,1	Светло-голубой и серый мергель и мергелистый известняк
Тирбур	<i>K₂tb</i>	0,5	Светло-серый известняк
Илам	<i>K₂il</i>	0,3	Кристаллизованный темный известняк с жилами кальцита и кремния
Илам-сургах	<i>K₂il-sg</i>	16,2	Известняк и сланцы
Сарвак	<i>K₂sv</i>	30,22	Песчаник, мел, известняк
Бангестан групп	<i>K₁bg</i>	3,3	Известняк с кальцитом и включениями кремния из слоями Chile
Геру	<i>K₁Gr</i>	4,81	Чередование темных известняков, глины, содержащий радиолярии, и черных сланцев Бытвмин, коричневых, илистых сланцев, мелкозернистых и кремнистых известняков и глауконитовых известняков
Хами групп	<i>K₁gp</i>	1,52	Мергелистый известняк, сланец глинистый известняк (лонжерон).
Осадочные породы мелового периода	<i>K₁</i>	128,12	Тонкий слой известняка Синие мергелистые известняки.

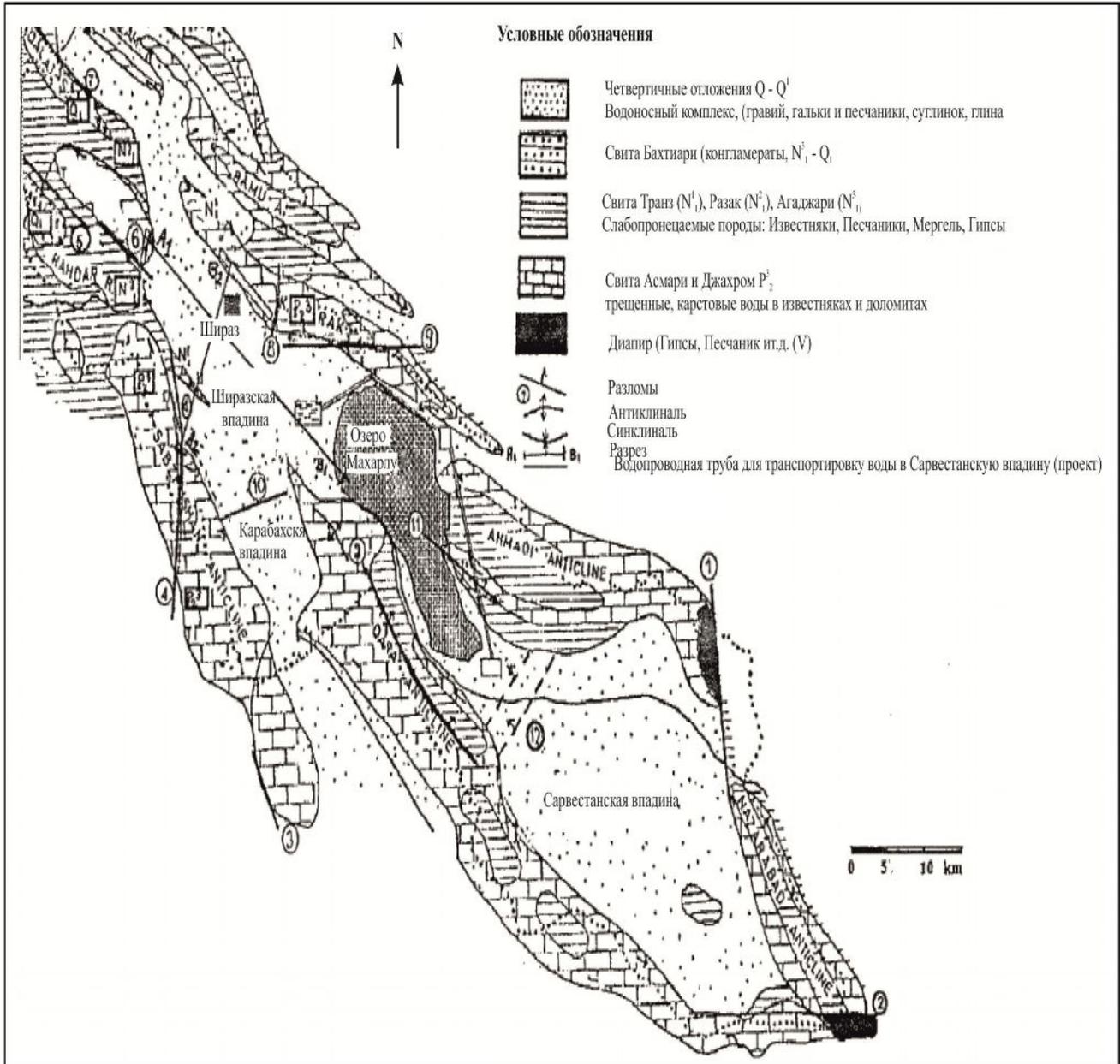


Рис. 3.3. Геологическая карта-схема Ширазской межгорной впадины

Таблица 3.2

Стратиграфическая колонка Ширазской межгорной впадины

Периоды (системы)	Геологический индекс	Эпохи (отделы)	Геологический индекс	Продолжительность в млн. лет	Свиты	Геологический индекс	Литол. состав	Генезис отложений
Четвертичный	Q	Современная Верхняя Средняя Нижняя	Q ₄ Q ₃ Q ₂	1		Q ₄ Q ₃ Q ₂	гравий, пески гальки, и глины	аллювий, пролювий, озерные отложения
					Бахтиари	Q ₁ +N ₃	Конгломерат	
Неогеновый	N	Плиоценовая Миоценовая	N ₂ N ₁	25 - 30	Агаджари	N ₃ ₁	песчаник	озерные отложения, морские отложения
					Резак Транз	N ₂ ₁ N ₁ ₁	мергель мергель	
Палеогеновый	P	Олигоценвая	P ₃	30 - 35	Аасмари	P ₃	известняки	морские
		Эоценовая	P ₂		Джахром	P ₂ ³	доломит	
		Палиоценовая	P ₁		Сачун Тарбур Пабде	P ₂ ² P ₁ ² P ₁	гипсы известняки мергель	
Меловой	K	верхнемеловая	K ₂	55 - 60	Гурги	K ₂	мергель	отложения
		нижнемеловая	K ₁		Бангестан	K ₁	сланцы известняки	
	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////
Верхний протерозой	V		V	600?	диапиры хормоз		гипсы, галит песчаник...	?

3.1.1. Стратиграфия

Стратиграфическое расчленение отложений выполнено согласно Стратиграфического кодекса Ирана, утвержденного Национальным стратиграфическим комитетом [36, 44, 62, 126, 129, 130, 142].

На территории исследований выделены породы докембрия, мелового, палеогенового, неогенового и четвертичного периодов.

Докембрий. Докембрийские породы на территории исследований представлены отложениями верхнего протерозоя, который представлен свитой Хормоз.

Свита Хормоз

Наиболее древней геологической формацией, выходящей на поверхность в районе исследований, является свита Хормоз, залегающая по геофизическим данным на глубинах более 10000 м [62]. Породы этого века наблюдаются в выходящих на дневную поверхность соляных куполах (диапирах). Здесь эта свита представлена гипсом, доломитом, известняком, сульфатными породами и различными солями. Некоторые крупные купола поднимаются на поверхность мощными антиклиналями (табл. 3.1, 3.2). Один из таких диапиров присутствует на востоке озера Махарлу, а другой залегает под антиклиналью Кара.

На породах докембрия с большим стратиграфическим несогласием залегают породы мезозойской эратемы.

МЕЗОЗОЙСКАЯ ЭРАТЕМА (МЗ)

К мезозойской эратеме на территории исследований относится меловая система (табл. 3.2, 3.3 и рис. 3.2).

Меловая система (К)

Меловая система представлена нижним и верхним отделами.

Нижний отдел (К₁) на территории Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадин представлен свитой Бангестан.

Свита Бангестан (К₁bg) на территории Ширазской впадины не расчленена и представляет собой морские отложения (известняки) большой толщины.

На территории Хоррамабадской впадины в этой свите выделяются группы Хами, Геру и собственно Бангестан.

Группа Хами (К₁kt) представлена мергелистыми известняками, сланцами и глинистыми известняками «лонжерон».

Группа Геру (K_{1gr}) представлена чередованием темных известняков и глин, содержащих черные сланцы «Бытвмин», коричневые илистые сланцы и мелкозернистый кремнистый известняк, а местами и глауконитовый темно-серый известняк.

Группа собственно Бангестан (K_{1bg}) в Хоррамабадской впадине представлена известняками с включениями кальцита и кремней «Chile».

В Ширазской впадине в северном направлении наблюдается постепенное уменьшение толщины стратиграфического разреза свиты Бангестан. В центральной части Загроса к этой свите приурочены основные месторождения нефти.

Верхний отдел (K_2) на территории Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадин представлен свитой Гурпи [44, 89].

Свита Гурпи (K_2Gu) в Хоррамабадской впадине представлена морскими отложениями: формациями Сарвак, Илам-сургах, Илам и собственно Гурпи.

Формация Сарвак (K_{2sv}) альб-туронского века является одним из важнейших бассейнов карстовых вод в синклинали Загроса. Формация Сарвак согласно напластована на формацию Куждуми и несогласно перекрывается формацией Илам. Эта формация состоит из серого устойчивого мелководного морского известняка, зернистого известняка и песчанистого мелового известняка.

Формации Илам-сургах (K_{2il}) и Илам (K_{2il}) является карбонатным комплексом серии Бангестан, перекрывающим формацию Сарвак с параллельным несогласием в изучаемой области. Фациальные исследования свидетельствуют о том, что карбонатный пласт Илама сформировался в приливно-отливных зонах, лагунах и на отмели. Шесть микрофаций формации Илам состоят из аргиллита с мелкокавернозными структурами, биокластами карбонатной осадочной породы спутанного строения, биокластами аргиллита и зернистыми известняками спутанного строения, оолитовыми известняками и

обломочными оолитовыми известняками. Сходство литологического состава формаций Сарвак и Илам, а также отсутствие формации Сурга в изучаемой области препятствует четкому определению границы между этими формациями. Для определения границы между формациями Илам и Сарвак в районе Танг-Е Рашида использовались изотопы углерода и кислорода.

Формация собственно Гурпи (K_2Gu) представлена светло-голубыми и серыми мергелями и мергелистыми известняками, тонкослоистым мергелем и мергельными известняками и аргиллитами.

В Ширазской впадине свита Гурпи сложена синими закарстованными известняками и мергелистыми известняками, мергелями и сланцами.

На породах верхнего отдела меловой системы со стратиграфическим несогласием залегают отложения кайнозойской эратемы.

КАЙНОЗОЙСКАЯ ЭРАТЕМА (KZ)

Кайнозойская эратема представлена палеогеновой, неогеновой и четвертичной системами.

Палеогеновая система (P)

Отложения палеогенового периода представлены палеоценовым, эоценовым и олигоценовым отделами.

Палеоценовый отдел (P_1) представлен свитой Пабдех.

Свита Пабдех (P_{1px}) в Ширазской впадине представлена морскими отложениями. Это отложения мергелей, известковых аргиллитов и тонкослоистых известковых сланцев.

В Хоррамабадской впадине свите Пабдех соответствует формация Амиран. Формация **Амиран (P_{1am})** представлена алевролитами, песчаниками и кремнистыми конгломератами и известняками.

Эоценовый отдел (P_2) представлен свитами Тарбур, Сачун и Джахром.

Свита Тарбур (P_2tr) в синклинали Загроста, в основном, состоит из массивного пласта рифового известняка с большим количеством рудистов. Свита Тарбур, преимущественно состоящая из карбонатных пород, является литостратиграфической единицей, выявленной в синклинали Загроста, между главным обратным сбросом и верхним Загростом и восточной частью сбросов Сабзпушан (табл. 3.2.).

В Хоррамабадской впадине свите Тарбур соответствует свита Талезанг, представленная среднезернистыми серыми закарстованными известняками.

Свита Сачун (P_2sc) прорывает все отложения от раннего протерозоя до настоящего времени и является наиболее древней свитой, выходящей на дневную поверхность (кроме свиты Хормоза). Она распространена на площади около 100 км² на западе и на северо-востоке Ширазской впадины, ее возраст – ранний эоцен. Состав отложений – известняки, гипс, доломит, мергели. Свита Сачун наблюдается в антиклиналях Кара на юге озера Махарлу, Ахмади на севере озера, Назарабад на востоке озера, Кафтарак и Баму на севере Ширазского бассейна (табл. 3.1, 3.3). Здесь в виде прослоев в известняках, мергелях отмечаются гипсы и галиты. В Хоррамабадской впадине свите Тарбур соответствует свита Кашкан, представленная конгломератами, песчаниками, красными алевролитами и известняками [36, 62, 89, 104, 130].

Свита Джахром (P_2jt) представлена в обнажениях западного Ирана (горы Загроста) обрывами из серого доломита и доломитового известняка

Олигоценый отдел (P_3) представлен свитой Асмари.

Свита Асмари (P_3as). В разрезе этой свиты выделяют две части: нижняя и верхняя.

Нижняя часть лучше всего наблюдается на севере Ширазской межгорной впадины. Ее толщина составляет около 400 м. Преобладающий состав – известняки средне- и толстослоистые, местами раковинообразные,

оолитовые известняки, содержащие нуммулиты, и доломиты. Иногда вместе с этими отложениями наблюдаются галит и сульфатные породы.

В Хоррамабадской впадине нижней части свиты Асмари соответствует формация Асмари-Шахбазан.

Формация *Асмари-Шахбазан (P_{3as-sb})* представлена доломитизированными известняками и кристаллическими доломитами.

В направлении совместной оси синклиналей между Тафиан и Голчере преобладает ион магния в морских отложениях. Места происхождения этого иона находятся на северо-востоке впадины (на расстоянии более 100 км), где произошел процесс субдукции между плитами Африко-Аравии и Ирана. В связи с этим значительные ультраосновные массивы вышли на поверхность земли [106].

В Ширазской впадине *верхняя часть* этой свиты представлена преимущественно мергелями с подчиненным количеством известняков. Ее толщина гораздо меньше, чем у пород нижней части, и в ней повышается количество мергеля. В свите Асмари наблюдаются карстовые процессы. Трещиноватые породы залегают до глубины 25–30 метров от поверхности земли.

В Хоррамабадской впадине верхняя часть свиты Асмари соответствует формация Асмари, которая представлена белыми закарстованными известняками. Существенное развитие карста в этой формации объясняется наличием щелей и полостей и, как следствие, очень высокой пористостью этих известняков [62].

Свита Асмари, в основном, образует коренное ложе неогеновых и четвертичных отложений в Хоррамабадской и Ширазской впадинах.

В районе исследования к свите Асмари приурочены многие нефтяные и газовые месторождения Ирана.

Над свитой Асмари в горах Загроса залегают разные отложения. На юго-западе Ирана они представлены свитой Гачсаран, которая состоит из

слабопроницаемых гипсов, образующих «покрышку» для месторождений нефти и газа, приуроченных к отложениям свиты Асмари. В Ширазской межгорной впадине свита Гачсаран отсутствует. Над отложениями свиты Асмари часто залегает свита Разак (табл. 3.1, 3.2, рис. 3.1, 3.2, 3.3).

Неогеновая система (N)

На территории исследований неогеновая система представлена миоценовым и плиоценовым отделами.

Миоценовый отдел (N_1) представлен свитами Транз и Разак, которые относятся к раннему миоцену.

Свита Транз (N_{1ts}) развита преимущественно на севере, западе и в меньшей степени – на востоке Ширазской межгорной впадины. Некоторые геологи считают, что она является частью свиты Асмари, а другие – что эти отложения отвечают зоне фациального перехода между свитами Асмари и Разак. Литологически свита Транз состоит из известняков, мергелей, песчаников. Эта свита часто выходит непосредственно под четвертичные отложения.

В Хоррамабадской впадине свите Транз соответствует свита Гачсаран, которая расположена большей частью на антиклиналях и представлена мергелями, ангидритами, тонкими пластами известняков и битуминозных сланцев. К этой свите приурочены крупные эвапориты (гипс, ангидрит, галит). На основании сейсмических данных некоторые геологи считают вероятным то, что значительные надвиги Ирана продвинуты от базальных нижнепалеозойских срывов к триасовым эвапоритам и даже вплоть до миоценовой формации Гачсаран [36, 89].

Свита Разак (N_{1rk}). Разрез свиты в Ширазской впадине довольно пестрый и представленный мергелями, известняками, доломитами, разноцветными песчаниками и гипсами. Распространена свита Разак на востоке

гор Калат и Дерак. На западе впадины толщина отложений составляет около 750 м. В этом районе эта свита находится под свитой Агаджари.

В Хоррамабадской впадине свита Разак имеет повсеместное распространение.

Плиоценовый отдел (N_2) на территории исследований представлен только одной свитой Агаджари.

Свита Агаджари (N_2aj) представлена красноцветными песчаниками, мергелями, коричневыми известняками. Иногда встречаются конгломераты. Тонкие слои гипса и красных мергелей были обнаружены в некоторых местах Ширазской впадины. Некоторые геологи относят эту свиту к нерасчлененным отложениям (верхний миоцен – нижний плиоцен). В основном это морские отложения и в меньшей степени континентальные. В составе свиты Агаджари обнаружены морские, и озерные, и аллювиальные отложения (табл. 3.1, 3.2, рис. 3.1, 3.2, 3.3).

Нерасчлененные отложения неогенового и четвертичного периодов (N_2-Q_1).

К нерасчлененным отложениям неогенового и четвертичного периодов относится свита Бахтиари.

Свита Бахтиари (N_2-Q_1bk) представлена песчаниками и мелкими крупногалечными конгломератами. Эти континентальные отложения присутствуют на западе Ширазской впадины (Калат и Чармакан). Толщина отложений достигает до 2000 м. Свита Бахтиари образовалась в период альпийского орогенеза в районе Загроса (последняя фаза Пасадниан) (табл. 3.2 рис. 3.3). В Хоррамабадской впадине эта свита представляет собой флювиальные пласты, сложенные из многокомпонентного конгломерата, диагонально-слоистого песчаника и алевролита (табл. 3.1, рис. 3.2).

Четвертичная система (Q)

Четвертичная система на территории исследований представлена нижним, средним, верхним и современным отделами, сложенными аллювиальными, пролювиальными и озерными отложениями.

Ширазская впадина представляет собой седиментационную мульду, в которую вложен конус выноса р. Хоршкрут и р. Бабахаджи. Этот конус образован аллювиально-пролювиальными отложениями этих рек. Кроме этого на севере впадины с гор Кафтарак и Саади произошло образование мощных пролювиальных, делювиальных и коллювиальных отложений.

Стратиграфическое расчленение четвертичных отложений Ширазской межгорной впадины проведено по материалам 20 разведочных скважин глубиной от 18 до 300 м (табл. 3.3) [43, 89].

Таблица 3.3

Схема стратиграфического расчленения четвертичных отложений
Ширазской впадины

Система	Отдел	Индекс	Состав отложений	Толщина, м
Четвертичная	Современный	Q ₄ ³	Песок, супесь, суглинок	1–5
		Q ₄ ²	Суглинок, песок	10–15
		Q ₄ ¹	Галька, песок	10–20
	Верхний	Q ₃ ²	Суглинок, глина	15–20
		Q ₃ ¹	Галька, песок	10–15
	Средний	Q ₂	Глина, суглинок, супесь	20–30
			Галечник	10–20
	Нижний	Q ₁	Суглинок, глина	До 160
Песок, гравий, галька, конгломерат				

Как видно на рис. 3.4 и в табл. 3.2 и 3.3 каждый цикл четвертичных отложений имеет двучленное строение. Начинается он галечными отложениями и заканчивается супесчано-суглинистыми и глинистыми. Большая мощность суглинистых и глинистых отложений наблюдается на западе и на востоке впадины. Разрез четвертичных отложений Ширазской впадины имеет ярко выраженный ритмичный характер: в нем чередуются песчано-галечниковые и суглинистые отложения. Образование этой ритмичности обусловлено, по всей видимости, неотектоническими движениями, влияющими на изменение

продольного и поперечного уклона кровли дочетвертичных отложений и поверхности земли.

В связи с тем, что четвертичные отложения в Хоррамабадской межгорной впадине изучены скважинами слабо и их очень трудно расчленить на отделы, то мы объединили их в три подгруппы: нижнюю, среднюю и верхнюю.

Нижняя подгруппа (Q_1-Q_2) объединяет нижний отдел и нижнюю часть среднего отделов. Эти отложения аллювиально-пролювиального происхождения и представлены крупнообломочным гравийным и валунно-галечниковыми отложениями. В периферийных частях Хоррамабадской впадины в их составе преобладают крупно-глыбовые включения. Это древний коллювий, накопившийся в основании коренных склонов впадин. Толщина нижней части четвертичных отложений колеблется от 25 до 190 м.

Средняя подгруппа (Q_2-Q_3) объединяет верхнюю часть среднего отдела и нижнюю часть верхнего отдела. Генезис этих отложений – аллювиальный, аллювиально-озерный. Состав отложений средней части разреза очень пестрый; они представлены толщей разнозернистых песчаных и песчано-глинистых пород. Эти породы распространены преимущественно в центральных частях Хоррамабадской впадины, где их толщина составляет 20–70 м.

Верхняя подгруппа (Q_3-Q_4) объединяет верхнюю часть верхнего отдела и современный отдел. Эти отложения, в основном, представлены пойменными фациями отложений р. Хоррамабад. Их состав преимущественно мелкозернистые глины и суглинки. Толщина верхней части четвертичных отложений колеблется от 40 до 55 м.

Отложения озера Махарлу (Q_{1-4}). В этом бессточном озере, которое находится в Ширазской впадине, происходит аккумуляция разных веществ извне или формирующихся в самом озере.

По данным бурения в разрезе озерных отложений сверху вниз были обнаружены [156, 159]:

1. Слой солей (горизонт солей) толщиной от 5 до 70 см. Этот слой на 85-97% представлен галитом (NaCl).

2. Иловые отложения мелкозернистого песка и глины неоднородного строения. Толщина этого слоя составляет 20 см. Иловые отложения имеют лечебные свойства и широко применяются в бальнеологии.

3. Отложения серых и черных мергелей и глин с гипсами. Минеральный состав отложений – галит, гипс, кальцит, арагонит. Толщина их достигает 5 м.

4. Отложения серых, черных и зеленоватых мергелей, тонкие слои гипса. Минеральный состав отложений – галит, гипс, кальцит, арагонит, кварц, басанит. Толщина этих отложений достигает до 450 м.

3.1.2. Тектоника района исследования

По представлению большинства геологов Ирана складчатая горная цепь Загроса по тектонической обстановке делится на 4 морфотектонических участка (Харбер [72], Stocklin J. [88, 147] и др.):

1. Предгорье.
2. Складчатый пояс.
3. Пояс разлома.
4. Трастная зона.

Предгорье находится на юго-западе складчатого пояса, а пояс разлома и трастная зона на севере. Направление складчатой горной цепи Загроса – с северо-запада на юго-восток по азимуту 120–130°. Она образована параллельной системой крупных антиклинальных и синклинальных складок. В пределах синклинальных структур существует много больших и малых бассейнов.

Ширазская и Хоррамабадская межгорные впадины относятся к одной синклинальной складке зоны складчатого Загроса. Она расположена на крайнем юго-западе горной системы Загроса и обрамлена его отрогами. Южную ее часть занимает Ширазский бассейн, а северную – Хоррамабадский бассейн. В юго-

восточной части впадины широко развиты нерасчлененные мезозойские осадочно-эффузивные и интрузивные отложения. Среди них установлены серпентиниты, амфиболиты, порфириты, диабазы и кремнистые сланцы. Толщина отложений колеблется от 1000 до 4000 м и более. Палеогеновые (преимущественно эоценовые) отложения, распространенные во внешней области питания юго-западной части бассейна, сложены известняками и глинистыми сланцами. Толщина этих отложений составляет 200–1200 м (Маринова Н. А.) [64].

В Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадинах с помощью геофизики, полевых исследований, анализа топографических карт и космоаэроснимков обнаружено 16 тектонических разломов (рис. 3.2, 3.3). Крупные разломы в большинстве случаев подчиняются направлению 11–125°. Есть также разломы параллельные и перпендикулярные с антиклиналями и синклиналями.

Внутри зоны складчатого Загроса магматизма нет. В этом районе наблюдается лишь солянокупольная (диапировая) тектоника.

На юге Ирана площадь распространения соляных отложений свиты Хормоз составляет 250 x 650 км. Свита залегает обычно на глубинах более 10000 м. В 150 пунктах отмечаются выходы соляных куполов на поверхность. Возраст пород соляных куполов – докембрий. Эти купола обычно оказывают негативное воздействие на состав и минерализацию поверхностных и подземных вод (рис. 3.2, 3.3.)

Ороген Загроса известен своей ярко выраженной складчатой структурой (Фархуди, Летузей и др.) [36]. Толстый осадочный чехол с антиклиналями, сложенными широко распространенными массивными известняками формируют так называемую масштабную «китовую спину», которая характеризует структуру района исследования. Эта структура складчато-надвигового пояса Загроса очевидно унаследовала структуры фундамента. Если это соответствует действительности, то древняя деформация фундамента в

границах Загроса очень влияла на характер деформаций складчато-надвигового пояса. Хорошо известно, что несколько донеогеновых тектонических движений, повлиявших на фундамент, воздействовали и на платформу Загроса (Бербериян и Кинг [84], Куп и Стонли [62], Шеркати и Летузи [36,156]).

Тектонические нарушения фундамента на рубеже пермского и триасового периодов во время континентального рифтинга сыграли важную роль в образовании солянокупольных структур и распространении деформации на складчатый пояс Загрос и его вершины. Многие главные сбросы в Загросе приписывались вторичной активности этих разломов в фундаменте. Фундамент в основной части Загроса рассматривался как продолжение панафриканского фундамента, обнаженного на Аравийской платформе и разбитого на блоки теми же сбросами (Бахруди и Тальбот [62, 156]).

Деформация фундамента в складчато-надвиговых поясах обычно разделяется на две категории (Йонки и Митра [88]):

- а) толсточешуйчатые надвиги с относительно крутопадающими сбросами (30–60°), на которых располагаются мелкие (1–5 км) выступы;
- б) тонкочешуйчатые надвиги, которые проходят на несколько десятков километров вдоль региона.

3.1.3. Тектоника складчато-надвигового пояса Загроса

Тектоника района исследования детально освещена в работах Яншина А. Л. [80], Короновского И. В. [49], Понинарова В. П. [66], Овчинникова А. М. [66], Штеклина Й. [88], Alavi M. [92], Bahroudi A. [99], Berberian M. [100], Dunnington H. V. [110], Edgell H.S. [111], Stocklin J. [147, 148] и др. Тектоника Ирана сложная. До сих пор существуют две теории, особенно относительно тектоники Загроса и возникновения около 40–50 миллион лет назад океана Тетис в этом регионе [89, 147, 148]:

1. Геосинклинальная.
2. Теория тектоники плит.

Одни исследователи придерживаются теории геосинклинали и считают, что Тетис был узким бассейном, а другие, которые отстаивают теорию тектоники плит, что это был гигантский океан.

По геосинклинальной теории считается, что Тетис образовался в результате опускания земной коры и что он включал в себя глубоководную и мелководные осадки, причем характер подстилающей коры не принимается во внимание. Сама концепция о геосинклинали исходила из ее симметричной формы. Согласно той же геосинклинальной концепции Тетис с момента его появления представлял собой единую орогеническую зону.

Складчатые отложения в геосинклинали Загроса образовались в последней фазе альпийского орогенеза. Размеры этих систем складок достигают 10–100 км. В этой геосинклинали фиксируется около десяти крупных разломов. Большой сброс, протягивающийся с юга Ирана до впадины Фирузабада, имеет 120 км в длину и амплитуду около 500 м. Предполагается, что он более древний, чем складчатость Загроса.

Другие связывают происхождение океана Тетис с апвеллингом и подъемом мантийного материала и считают его специфической океанической структурой, сложенной океанической корой и океаническими осадками. По представлениям тектоники плит океан Тетис резко асимметричен, причем все орогенические процессы были сосредоточены на его северной активной окраине. В этом орогене совмещены две различные континентальные окраины, которые до их столкновения отстояли друг от друга на тысячи километров и в структурном отношении не имели ничего общего друг с другом (Штеклин Й.) [88, 147].

Вначале мезозойской эратемы возник новый океан в районе Загроса, который называют Новым Тетисом. Океаническая оболочка формировалась в течение нескольких миллионов лет. В позднюю меловую эпоху и раннюю кайнозойскую эратему плиты Африки и Аравии под воздействием

тектонических сил закрыли Новый Тетис. Тогда и сформировалась горная складчатая цепь Загроса (рис.3.3).

Действие тектонических сил продолжается до сих пор, что подтверждается наличием многих очагов землетрясений в районе Загроса. 10 августа 1972 г. произошло самое большое землетрясение силой 6,9 баллов по шкале Рихтера. Эпицентр землетрясения находился в 165 км от Хоррамабадской впадины. В период между 1900 и 1990 г. насчитано 146 землетрясений различной степени интенсивности.

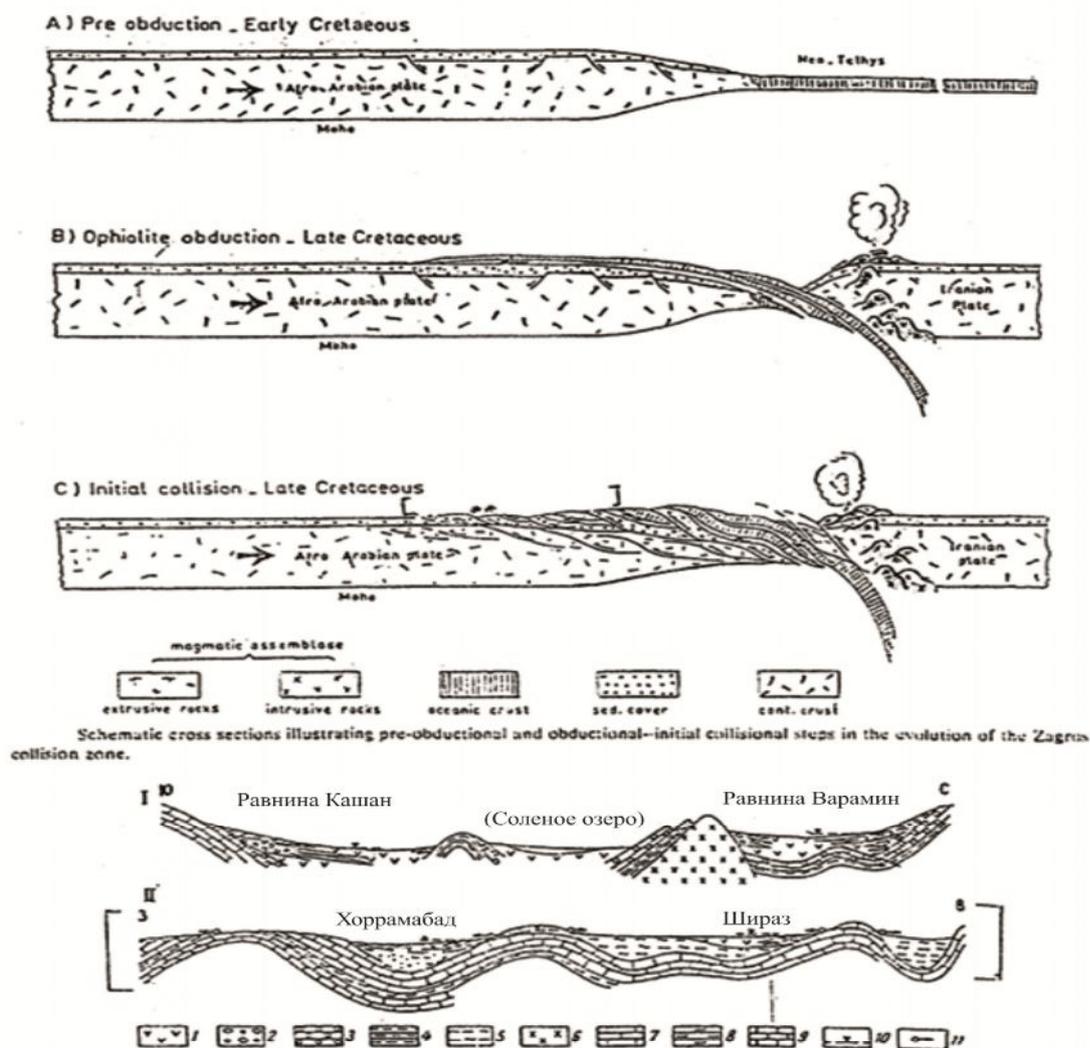
Существует несколько показателей, которые подтверждают теорию тектоники плит, т. е. когда возник океанический Неотетис? Ответ на этот кардинальный вопрос мог бы, очевидно, вытекать из состава древнейших пород, слагающих офиолитовый пояс. Определение возраста офиолитовых свит остается одной из самых сложных проблем. Однако, недавно Геологической службой Ирана в Макране были получены важные результаты, подтверждающие теорию тектоники плит. (Штеклин Й, GSI Iran) [88, 148].

Океаническая кора в Новом Тетисе, представлена офиолитовым поясом, сложена преимущественно перидотитами. Под воздействием тектонических сил эта оболочка была разорвана и погрузилась под Иранскую центральную плиту (процесс субдукции) (рис. 3.4) Толщина континентальной оболочки по геофизическим данным здесь составляет от 40 до 50 км, а в нескольких местах достигает 65 км, что соответствует удвоенной мощности континентальной коры. Офиолиты (перидотиты и в них месторождения хромитов), а также магматизм существуют в районе Загроса.

3.1.4. Тектоника большого сброса Загроса

Складчато-надвиговой пояс Загроса состоит из большого ряда осадочных пластов с разными характеристиками пород.

Основа осадочного пласта Загроса, в особенности в районе формации Фарс, сложена толстым (1–2 км) слоем кембрийской соли свиты Хормоз, которая выступала как разрыв во время поздней палеогеновой деформации.



Схематические геолого-гидрогеологические разрезы через Центральное Иранское плато (I) и Загросские горы (II). (Issar, 1969)

1- глины и илы (Q); 2 - гравий и песок (Q); 3 - конгломерат (N₁ - Q); 4 - мергели и гнейсы (N); 5 - мергель, глины и гнейсы (N); 6 - вулканогенные образования (P₂ - N); 7 - известняки (Pg - N); 8 - мел и известняки (C₁); 9 - известняки (C₁); 10 - уровень подземных вод; 11- источники.

Рис. 3.4. Схема образования Хоррамабадской и Ширазской межгорных впадин в цепи Загроса (Alavi M. / Tectonophysics 229, 1994) с. 211–238.

Другие слои, такие как триасовая формация Даштак (эвапорит), меловая формация Куждуми (глинистый сланец) и нижнемиоценовая формация Гачсаран (эвапориты), возникают в осадочном массиве (рис. 3.2 и табл.3.3).

Существование слоев базального срыва указывает на возможный разрыв между фундаментом и покрывающей породой, а также между различными элементами внутри покрывающего слоя. Он играет важную роль в определении типа и направления распространения деформации (Сепер и Косроув) [36].

В седиментационной последовательности на особенности тектонической структуры влияли как эокембрийские эвапориты формации Хормоз, так и миоценовые соляные слои Гачсарана (табл. 3.1, 3.2, рис. 3.2, 3.3).

Сейсмические механизмы формирования разлома в поясе Загрос свидетельствуют о том, что на данный момент фундамент периодически поднимается по направлению к северу. Это возможно посредством уменьшения амплитуды складок основания (Маккуари) [156]. В отличие от этого, неогеновый гипс и мергель в формации Гачсаран отрывают тонкочешуйчатую деформацию в неоген-четвертичных отложениях от нижних пород. Поэтому существует несоответствие между сокращением фундамента и покрывающих пород, в связи с наличием базального срыва в нижнем палеозойском пласте.

Выводы

Ширазская и Хоррамабадская межгорные впадины образовались в период тектонических эпох орогенеза Альп в южной (Шираз) и северной (Хоррамабад) частей цепи складчатого Загроса. Впадины включают в себя мощные аллювиальные и пролювиальные четвертичные отложения, имеющие в разрезе четко выраженный ритмичный характер с чередованием песчано-галечных и суглинистых пород.

3.2. Гидрогеологические условия территории исследований

Гидрогеологические условия Ширазского и Хоррамабадского бассейнов детально изучались такими исследователями и фирмами: Камали Г. [43], Колодий В. В. [48], Красильщиков Л. А. [54], Куваев А. А. [55], Листенгартен В. А. [57], Шестаков В. М. [86], Aghdam J. A [90, 91], Ashley R.P. and Lloyd J.W. [93], Bower H. [103], Issar A. [99], Feng-Guang Y. [112], Claasen H. [119], Goovaerts P. [120], Raeisi E. [143], Todd D. K. [151], Vahidi I. [152], Wright Alan. [153], Paygowan E. A. [157], фирмами Параб, Махабкодс, NRRC [158, 159] и др.

Территория исследований приурочена к Ширазской синклинали, расположенной на крайнем юго-западе складчатой горной системы Загроса, обрамленной его отрогами. Почти вся южная часть синклинали занята Ширазской межгорной впадиной, в которой расположен Ширазский бассейн, а на северо-западе – Хоррамабадской межгорной впадиной, занятой Хоррамабадским бассейном. Эти межгорные впадины разделены между собой коротким горным хребтом.

3.2.1. Общие закономерности гидрогеологических условий горной системы Загроса

Общие закономерности подземного стока района северо-западного Загроса, в котором расположены Ширазский и Хоррамабадский бассейны, определяется особенностями гидрогеологической структуры Загроса.

До позднего миоцена здесь существовал морской режим осадконакопления, после чего в орогенетических условиях накапливались континентальные четвертичные отложения.

Четвертичный грунтовый водоносный горизонт приурочен, в основном, к континентальным аллювиальным и пролювиальным отложениям, которые занимают почти всю равнину. Толщина аллювиально-пролювиальных отложений составляет в среднем 72 м [103, 125, 151, 152].

Изменчивость литологического состава осложняет строение четвертичного водоносного горизонта. Строение гидрогеологического разреза осадочного чехла равнины и условия формирования подземных вод являются типичными для межгорных равнин и конусов выноса.

На северо-востоке Хоррамабадской равнины грунтовый водоносный горизонт имеет максимальные абсолютные отметки около 1318 м, а на юго-западе – минимальные 1130 м.

3.2.2. Гидрогеодинамические условия Хоррамабадского бассейна

По направлению от периферии к центральной части в Хоррамабадском бассейне выделяются четыре гидродинамические зоны: питания, частичной разгрузки, транзита и региональной разгрузки [2, 152, 159].

Первая гидродинамическая зона Хоррамабадского бассейна, приуроченная к относительно приподнятым участкам предгорной равнины, рассматривается как область питания или формирования потока подземных вод.

Благоприятные в целом условия питания определяются здесь преобладанием крупно и грубообломочных высокопроницаемых отложений (коэффициент фильтрации до 4–20 м/сут и более) и относительно глубоким залеганием уровня грунтовых вод (до 4–30 м и более).

Питание подземных вод формируется за счет местной инфильтрации атмосферных осадков, антропогенных родников питания (орошение) и за счет подземного притока из пород горного обрамления: трещинно-грунтовых вод верхней зоны экзогенной трещиноватости и потоков трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений и закарстованности. Наиболее интенсивный приток воды в четвертичные отложения наблюдается в центральной и юго-западной частях бассейна, где в горном обрамлении развиты карбонатные породы.

Во второй гидродинамической зоне поток грунтовых вод, поступающий из периферийной области, расчленяется слабопроницаемыми слоями на систему невыдержанных водоносных слоев, содержащих напорные подземные воды, характер гидравлической связи которых между собой и с грунтовыми водами бассейна может существенно изменяться на коротких расстояниях в зависимости от строения гидрогеологического разреза. Глубина залегания грунтовых вод уменьшается с понижением рельефа.

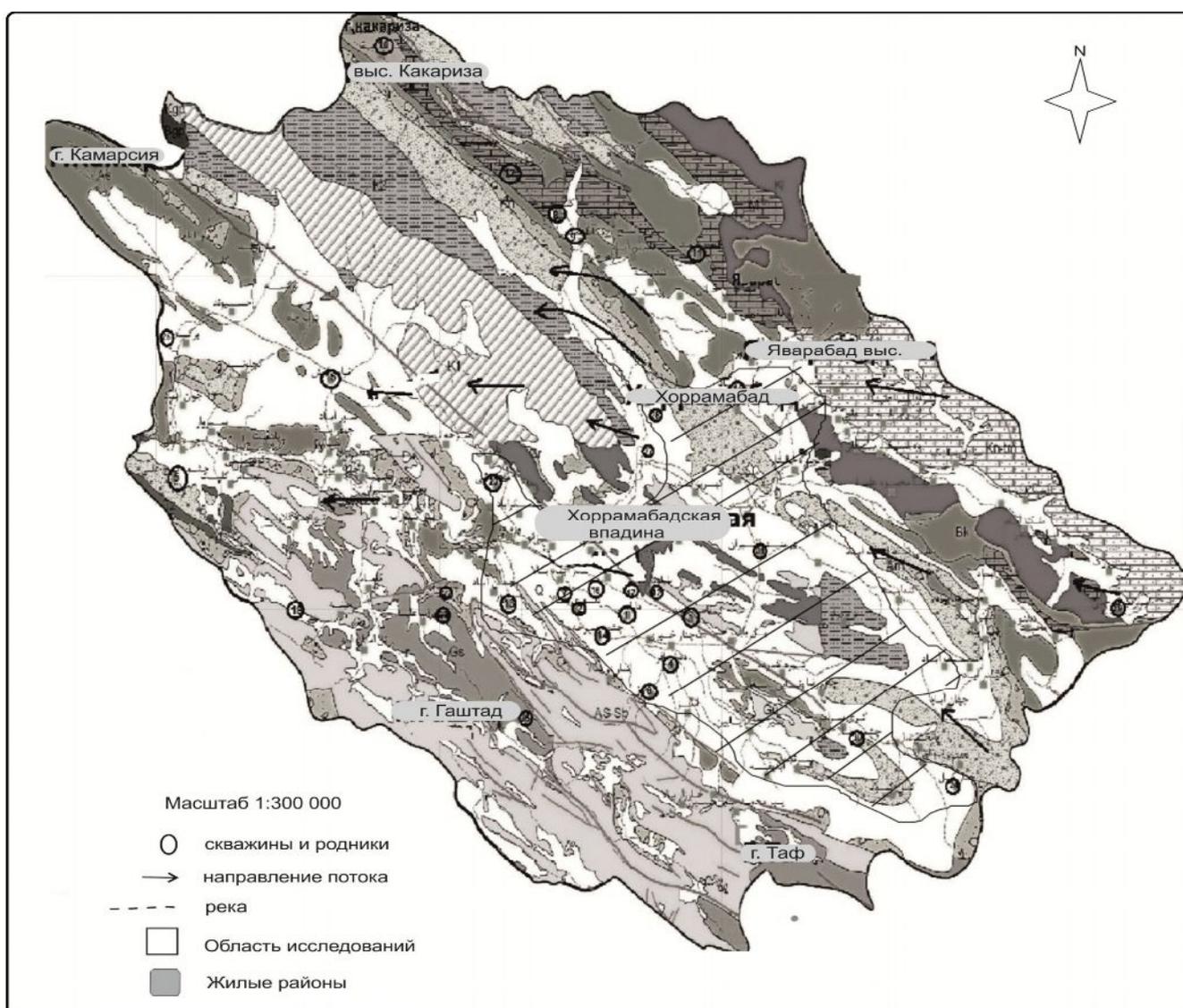


Рис. 3.5. Гидрогеологическая карта Хоррамабадского бассейна подземных вод (запад Ирана), исполнитель NKCR 2010 и А. Амджади [2, 159].

На юго-западе бассейна площадь с залеганием уровня грунтовых вод на глубине меньше 5 м составляет около 23 км². На равнине существуют разнообразные механизмы разгрузки подземных вод: разгрузка в реки, испарение с поверхности грунтовых вод и транспирация, отбор воды водозаборами, родниками и кяризами.

Дебиты родников в ряде случаев достигают десятков и сотен дециметров в секунду (в связи с высокой проницаемостью водовмещающих пород).

В Хоррамабадской впадине известно 280 родников и 11 кяризов и 451 водозаборных скважин. Часть кяризов создана более 1000 лет назад (табл. 3.1, 3.2). В засушливое время года (с июля по октябрь) дебиты некоторых родников резко уменьшаются.

Первая гидродинамическая зона бассейна рассматривается как зона частичной разгрузки и формирования напорных подземных вод.

Вторая гидродинамическая зона бассейна рассматривается как зона слабого взаимодействия грунтовых и напорных подземных вод или как зона транзита. В этой части мощность слабопроницаемых отложений в разрезе повышается.

Третья гидродинамическая зона этого бассейна является областью разгрузки подземных вод в долины постоянных и временных рек (Хоррамабад и др.).

3.2.3. Характеристика водоносных горизонтов и комплексов Хоррамабадского бассейна

В Хоррамабадском бассейне выделяются четвертичный водоносный комплекс и водоносные горизонты, связанные с дочетвертичными отложениями морского генезиса, которые выходят на дневную поверхность за пределами впадины и распространяются под четвертичными отложениями внутри впадины.

Четвертичный водоносный комплекс (грунтовые воды)

Четвертичные отложения Хоррамабадского бассейна имеют неоднородное строение по вертикали, что вынуждает рассматривать их как водоносный комплекс (рис. 3.6, 3.8).

С гидрогеологической точки зрения в разрезе четвертичного комплекса можно выделить три части (толщи):

Нижняя часть включает в себя отложения нижнее- и среднечетвертичного возраста (включая нижнюю часть конгломератов свиты Бахтиари толщиной от 10 до 400 м), имеющие аллювиальный и аллювиально-пролювиальный генезис. Это преимущественно крупнообломочные отложения (гравийные, валунно-галечниковые и др.). В этой части выделяются некоторые безнапорные водоносные и разделяющие пласты.

В периферийной части равнины они выходят непосредственно на дневную поверхность. Это наиболее высокопроницаемая часть четвертичного водоносного комплекса (коэффициент фильтрации колеблется от 4 до 20 м/сут; проводимость – 106–1324 м²/сут).

Средняя часть комплекса представлена чередованием песчаных и песчано-глинистых пород. По данным бурения в разрезе обнаружены пески и глины. В южной бассейна части выделяется водоносный горизонт толщиной от 10 до 100 м и разделяющий слабопроницаемый слой толщиной от 15 до 70 м. Общая проводимость в верхней части разреза меньше, чем в нижней. В южной части впадины (в районе Сорхеде) водоносный горизонт имеет общую проводимость менее 100 м²/сут (Сангаб) [160].

Верхняя часть разреза четвертичного комплекса представлена аллювиальными отложениями и распространена в выходной части равнины. Это относительно слабопроницаемые породы (суглинки и глины) с низкими значениями коэффициента фильтрации. Коэффициент фильтрации покрова водоносного безнапорного пласта изменяются от 1,5 до 10 м/сут. По условиям залегания они имеют наиболее тесную связь с поверхностными водами.

В четвертичных отложениях, впадины пробурено 7 наблюдательных скважин в которых ежемесячно измеряют уровень грунтовых вод (табл. 3.4).

Минимальные уровни воды обычно характерны для октября, а максимальные для апреля.

Глубина залегания грунтовых вод уменьшается с понижением отметок рельефа. Некоторые характеристики наблюдательных скважин приведены в табл. 3.4:

Таблица 3.4

Наблюдательные скважины Хоррамабадского бассейна

№ набл. скв	Абсол. отметка устья, м.	Абсол. Отметка забоя, м.	Миним. напор, м.	Амплитуда, м.	Максим глубина, м.	Мин. глуб., м.	Глубина скв., м	Отметка средне-голет. урв. подз. вод, м.
1	1156,31	1146,50	1145,81	1,31	10,5	9,19	11	1147,12
2	1143,57	1135,17	1134,17	2,0	9,4	7,4	60	1136,17
3	1172,44	1165,69	1165,14	1,1	7,3	6,2	36	1166,24
4	1170,44	1156,19	1155,74	0,9	14,7	13,8	80	1156,64
5	1196,64	1190,07	1189,1	1,94	7,54	5,6	70	1191,04
6	1231,97	1195,82	1194,27	3,1	37,7	34,6	90	1197,37
7	1337,94	1317,50	1315,34	4,3	22,6	18,3	105	1319,64

Глубина скважин колеблется от 11 до 105 метров. Скважина № 6 имеет максимальный уровень в Хоррамабадской равнины (абс. отм. 1197,37 м), скважина № 7 имеет минимальный уровень (абс. отм. 1319,64 м).

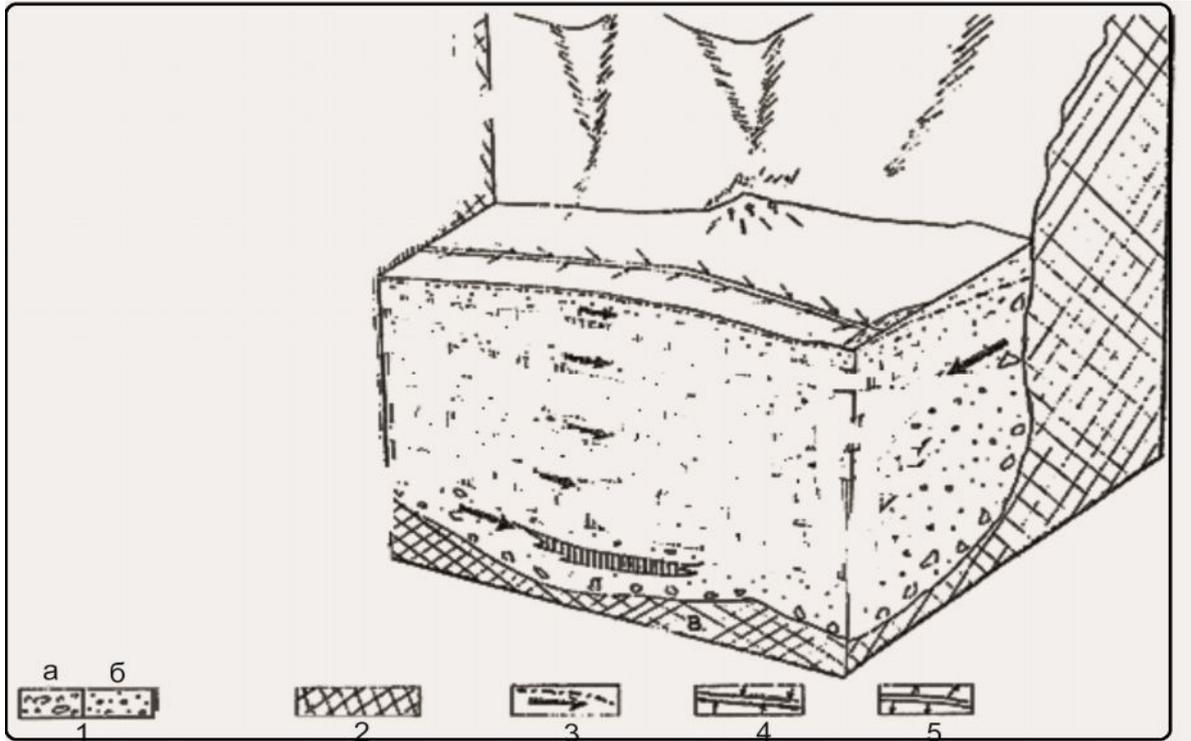


Рис. 3.6. Блок-схема потока подземных вод в речной долине Хоррамабадской равнины: 1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – дочетвертичные отложения с тектоническими разрывами в них; 3 – уровень и направление движения подземных вод; 4 и 5 – участки реки, дренирующие и питающие подземные воды в зоне транзита и разгрузки потока подземных вод.

Напор в скважинах меняется от 0,9 (№ 4) до 4,3 (№ 7) метров. Глубина залегания уровня подземных вод колеблется от 5,6 (скв. № 5) до 34,6 (скв. № 6) м.

Водоносные горизонты дочетвертичных отложений

Подземные воды в дочетвертичных отложениях хорошо изучены. Более 10 скважин вскрывают морские отложения и имеются данные шести разведочных скважин в известняках (табл. 3.5).

Наибольшее хозяйственное значение имеют подземные воды дочетвертичных отложений, особенно свиты Асмари, т. к. она имеет большую проводимость. Другими словами, свита Асмари – месторождение пресных подземных вод Хоррамабадского бассейна.

Скальные породы (известняки и другие) играют большую роль в питании подземных вод четвертичных отложений впадины. Наиболее интенсивный

приток подземных вод из горного обрамления впадины происходит на её юго-западной, северной и восточной границе (свиты Асмари, Шахбазан).

На юго-западе впадины (горы Гаштад) и на востоке (горы Яаварабад) боковой приток со стороны гор слабее, чем на севере, потому что здесь распространены преимущественно слабопроницаемые породы – мергели, глины и песчаники свит Гачсаран, Агаджари, Бахтиари.

Таблица 3.5

Разведочные скважины и гидродинамические характеристики дочетвертичных отложений Хоррамабадского бассейна

номер скваж.	Координаты скважин		Глубина скваж. м.	Мощность потока, м	Водопроницаемость, Т, м ² /сут	Коэффициент водоотдачи, μ
	X	Y				
1	275806	2694603	60	46	106	0,5
2	256178	3700779	90	–	390	0,59
3	248205	3699966	60	–	176	0,57
4	275955	3694119	62	54	184	0,41
5	264950	3704853	102	66	208	0,31
6	252550	2697644	35,5	8	158	0,47
7	245301	3703471	11	4	168	0,6
8	245007	3703265	100	45	162	0,39
9	261471	3707237	120	80	1364	0, 51
10	244316	3702554	100	95	120	0,66

3.2.4. Химический состав грунтовых вод Хоррамабадского бассейна

В Хоррамабадском бассейне, как и во всех межгорных бассейнах, близко расположены области питания и разгрузки подземных вод. Поэтому их химический состав определяется этими гидродинамическими особенностями [125, 133, 156]. В зонах формирования и интенсивного выклинивания водоносного горизонта на Хоррамабадской равнине повсеместно распространены подземные воды с минерализацией до 1 г/дм³. Эти воды имеют сульфатно-хлоридный кальциево-магниевый состав. Тип воды на северо-

востоке, западе и на юго-востоке бассейна – гидрокарбонатный кальциево-магниевый и на юге, а на юго-западе – сульфатный (табл. 5.2).

По нашему мнению на химический состав подземных вод оказывает влияние формация Гачсаран, представленная известняками, гипсами и солью. Общая минерализация подземных вод растет от гор к центру равнины (к юго-западу города Хоррамабад). Слабосоленоватые воды распространены также на некоторых участках на северо-западе и западе бассейна, где они имеют преимущественно хлоридный состав. Поток подземных вод направлен с юго-востока и востока на северо-запад и запад.

Из табл. 5.2 видно, что общая минерализация изменяется от 236 до 669 мг/дм³. Наибольшей минерализацией обладают грунтовые воды покровного слоя, а ниже она повсеместно уменьшается и если в верхнем водоносном пласте на отдельных участках содержатся слабосоленоватые воды, то в среднем и нижнем они сменяются пресными водами, хотя их минерализация близка к предельной для данного типа вод. Такая картина вертикальной зональности минерализации подземных вод сформировалась в связи с процессом континентального засоления в условиях жаркого климата, интенсивного орошения и близкого к поверхности земли залегания уровня грунтовых вод. Кроме того, определенную роль в этом играет поверхностный сток со склонов соляных куполов. Вода со склонов этих куполов фильтруется через морские отложения, растворяет и выщелачивает разные соли. Этот процесс играет большую роль в формировании вод повышенной минерализации.

Таким образом, формирование подземных вод повышенной минерализации в пределах Хоррамабадского бассейна происходит за счет поступления солей и миграции их сверху вниз, а также поступления техногенных вод и испарения.

Повышение минерализации может быть связано также с континентальным засолением грунтовых вод или с антропогенным

загрязнением (удобрения, отходы химического производства на территории Хоррамабадского бассейна).

Под воздействием сбросов городских и промышленных отходов, с удобрением сельскохозяйственных земель и деятельности человека на территории Хоррамабадской бассейна произошло загрязнение грунтовых вод. Поэтому изучение процесса загрязнения стало актуальной задачей.

Климат существенно влияет на химический состав грунтовых вод. Это атмосферные осадки, ветры, температура воздуха. Например, значительное количество осадков, поступающих в водоносные комплексы, вызывает разбавление грунтовых вод и тем самым снижают ее минерализацию. Высокая температура воздуха и почвы летом способствует повышению испарения с зеркала грунтовых вод и транспирации воды растениями. Эти процессы приводят к повышению минерализации грунтовых вод.

3.2.5. Тяжелые металлы в грунтовых водах Хоррамабадского бассейна

Повышенная или пониженная концентрация в воде некоторых химических элементов неблагоприятно сказывается на здоровье человека. К ним относятся такие элементы: свинец, мышьяк, селен, хром, кадмий, фтор, барий, медь, цинк, железо, марганец и др. [13, 147].

В 2012 г. определение тяжелых металлов в подземных водах из 14 скважин и 18 родников Хоррамабадского бассейна выполнил соискатель Амджади А. в Учреждении по охране природы провинции Лурестан Ирана. Результаты этих определений представлены в табл. 3.6.

По этим результатам предварительно можно определить качество подземных вод в разных пластах, и дать рекомендацию по употреблению питьевой воды.

Классификация подземных вод, используемых для питьевого водоснабжения, по микроэлементному составу предусматривает выделение групп вод с различным содержанием ряда микроэлементов.

Таблица 3.6.

Тяжелые металлы в грунтовых водах Хоррамабадского бассейна (мг/дм³),
Амджади Азиз [2]

Тип источника	Cd	Co	Ba	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Fe
1. Рашиди-Дар, Скв.	0,0005	0,004	0,015	0,003	0,00001	0,0004	0,0008	0,005	0,048
2. Мелекшахи, Скв.	0,00008	0,0008	0,074	0,048	0,00001	0,001	0,005	0,00001	0,11
3. Насерванд, Скв.	0,00009	0,001	0,066	0,004	0,0004	0,0013	0,0005	0,007	0,00001
4. Дехбагер, Скв.	0,00005	0,001	0,01	0,002	0,004	0,0016	0,0008	0,0009	0,059
5. Борджалы, Ист	0,0001	0,001	0,192	0,001	0,001	0,003	0,0002	0,014	0,04
6. Сорхе де, Ист.	0,00008	0,003	0,2	0,001	0,001	0,003	0,0001	0,008	0,056
7. Робат намаки, Скв.	0,00009	0,001	0,17	0,001	0,001	0,003	0,0005	0,004	0,021
8. Келмехуб, Ист.	0,0002	0,002	0,21	0,003	0,00002	0,005	0,001	0,0008	0,11
9. Чешмебид, Ист.	0,0001	0,002	0,23	0,003	0,0005	0,005	0,003	0,019	0,04
10. Сараб сага, Ист.	0,0002	0,003	0,09	0,002	0,00001	0,0034	0,0007	0,004	0,07
11. Гале джогд, Ист.а	9,0001	0,001	0,08	0,0009	0,0009	0,003	0,0002	0,006	0,016
12. Чешме чераг, Ист.	0,0002	0,001	0,2	0,002	0,00002	0,002	0,004	0,004	0,001
13. Сабур, Ист.	0,00009	0,008	0,08	0,046	0,00001	0,002	0,005	0,005	0,9
14. Чешме сорхе, Ист.	0,00008	0,0014	0,01	0,002	0,003	0,0017	0,0009	0,0009	0,06
15. Навекеш, Ист.	0,00001	0,002	0,08	0,005	0,0006	0,002	0,006	0,008	0,1
16. Гилуран, Скв.	0,00005	0,003	0,015	0,003	0,00001	0,0005	0,0008	0,005	0,04
17. Сарабеяс, Ист.а	0,00007	0,004	0,01	0,005	0,00002	0,0004	0,00007	0,005	0,04
18. Кахриз, Ист.	0,00008	0,003	0,015	0,006	0,00001	0,004	0,0007	0,004	0,049
19. Алибад, Скв.	0,0001	0,0013	0,01	0,02	0,00004	0,004	0,00001	0,007	0,098
20. Чогаруши, Скв.	0,00001	0,0013	0,07	0,005	0,0005	0,002	0,006	0,008	0,1
21. Сарнамак, Скв.	0,0001	0,002	0,19	0,003	0,0003	0,003	0,0006	0,015	0,04
22. Чангай, Ист.	0,00009	0,008	0,08	0,04	0,00003	0,001	0,04	0,05	0,09
23. Чамгарг, Скв.	0,0001	0,0008	0,08	0,04	3E-06	0,001	0,00005	0,05	0,09
24. Чаркал, Скв.	0,00008	0,002	0,1	0,001	0,001	0,003	0,00001	0,008	0,05
25. Доре, Ист.	0,00005	0,001	0,08	0,006	0,0008	0,002	0,00007	0,009	0,15
26. Гуше, Ист.	0,00008	0,0007	0,07	0,04	0,00001	0,001	0,004	0,004	0,09
27. Гердабсанги, Ист.	0,0002	0,001	0,1	0,002	0,00007	0,004	0,0001	0,0008	0,09
28. Кив, Ист.	0,00002	0,001	0,1	0,002	0,00005	0,003	0,001	0,0007	0,098
29. Чешметала, Ист.	0,00002	0,002	0,2	0,04	0,00001	0,003	0,004	0,003	0,053
30. Сарабгорчи, Ист.	0,0002	0,003	0,08	0,05	0,00001	0,0035	0,005	0,005	0,09
31. Дарбанд, Скв.	0,002	0,001	0,06	0,007	0,0001	0,002	0,0008	0,0006	0,004
32. Балилванд, Скв.	0,004	0,004	0,015	0,003	0,00005	0,0004	0,093	0,006	0,05

В табл. 3.7 приведены нормативы перечисленных микроэлементов в водах по стандартам Украины, Международному, Европейскому и Иранскому.

При сравнении результатов анализа грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (табл. 3.7) со стандартами качества воды (табл. 3.8) было установлено следующее:

- по Европейскому стандарту 1963 г. концентрация кадмия (Cd) в скважинах и источниках меньше чем ПДК.

Таблица 3.7

Стандарты качества воды, используемой для питьевого водоснабжения (Параб) [156, 161]

Элемент (вещество)	Стандарты			
	Украины, СанПиН 2.2.4-171-10	Международный, 1963г.	Европейский, 1998 г.	Иранский ГОСТ, 1974 г.
Свинец	$\leq 0,01$	0,05	0,1	0,05
Мышьяк	$\leq 0,01$	0,05	0,2	0,05
Селен	$\leq 0,01$	0,01	0,05	–
Хром		0,05	0,05	0,01
Кадмий		0,01	0,05	0,01
Барий		1,0	–	1,0
Медь	$\leq 1,0$	1,5	3,0	0,1
Цинк	$\leq 1,0$	15,0	5,0	0,5
Железо общее	0,2	1,0	0,1	0,3
Марганец	$\leq 0,5$	0,5	0,1	0,05
Фтор	$\leq 1,5$	1,0–1,5	1,5	1,4–2,4
Кобальт	$\leq 0,1$	–	–	–
Никель	$\leq 0,02$	–	–	–

- по ГОСТУ Ирана в скважинах и источниках концентрация свинца (Pb) меньше чем ПДК.

- по Украинскому ГОСТУ концентрация железа (Fe) в скважинах Мелекшахи, Чогаруши и в источниках Навекеш, Келмехуб выше ПДК.

- по ГОСТУ Ирана и других стандартов в скважинах бассейна концентрация никеля (Ni) меньше ПДК. Поэтому можно сделать вывод, что грунтовые воды не загрязнены никелем.

- по Европейскому стандарту и ГОСТУ Ирана концентрация бария (Ba) в скважинах Робат намаки, Сарнамак и в источниках Борджалы, Сорхе де, Сорхе де, Чешмебид и Чешме чераг выше ПДК. Эти скважины и источники находятся в зоне разгрузки вод города Хоррамабада, где концентрируются промышленные и коммунальные отходы и шахты, добывающие барий и его соли.

3.2.6. Гидрогеодинамические условия Ширазского бассейна

Общие закономерности подземного стока района восточного Загрота, в котором расположена Ширазская межгорная впадина, определяется особенностями гидрогеологической структуры Загрота, представляющей собой Ширазский бассейн подземных вод (бассейн межгорного типа) [43, 156].

До позднего миоцена здесь существовал морской режим осадко-накопления, после чего в орогенетических условиях накапливались континентальные четвертичные отложения. Толщина четвертичных отложений по сравнению с артезианскими бассейнами платформенного типа относительно большая.

Гидравлические связи существуют между четвертичными и дочетвертичными водоносными горизонтами. Эти связи на окраинах впадины сильнее, чем других ее частях.

Четвертичный водоносный комплекс приурочен, в основном, к континентальным аллювиальным и пролювиальным отложениям, которые занимают всю впадину. Толщина аллювиально-пролювиальных отложений во впадине колеблется от 10 до 350 м, составляя в среднем 200 м (Махабкодс) [157].

Изменчивость литологического состава осложняет строение четвертичного водоносного комплекса и позволяет выделить в нем один грунтовый (безнапорный) и три напорных водоносных пласта, связанных между собой (рис. 3.7, 3.8).

Строение гидрогеологического разреза осадочного чехла впадины и условия формирования подземных вод являются типичными для межгорных впадин (конусов выноса).

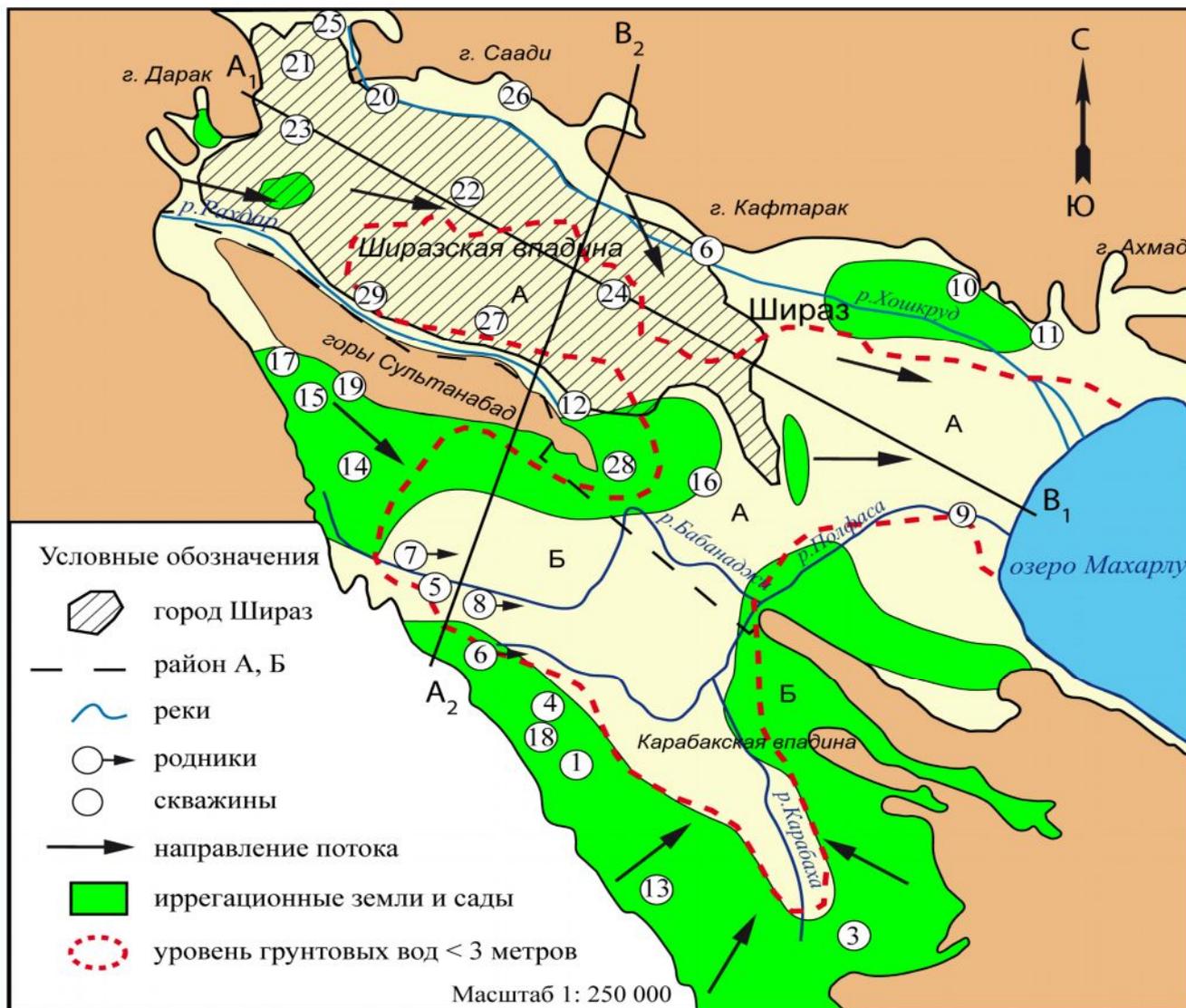


Рис. 3.7. Гидрогеологическая карта Ширазского бассейна (юго-запад Ирана), исполнитель NKCR [109].

По направлению от периферии к центральной части впадины (до озера Махарлу) можно выделить четыре характерные гидродинамические области: питания, частичной разгрузки, транзита и региональной разгрузки. Региональной областью разгрузки подземных вод является озеро Махарлу и долины постоянных и временных рек (Хоршкрут и Бабахаджи).

На северо-западе Ширазского бассейна водоносные пласты имеют максимальные напоры около 1580 м, а на востоке минимальные напоры до 1460 м. (рис. 3.8)

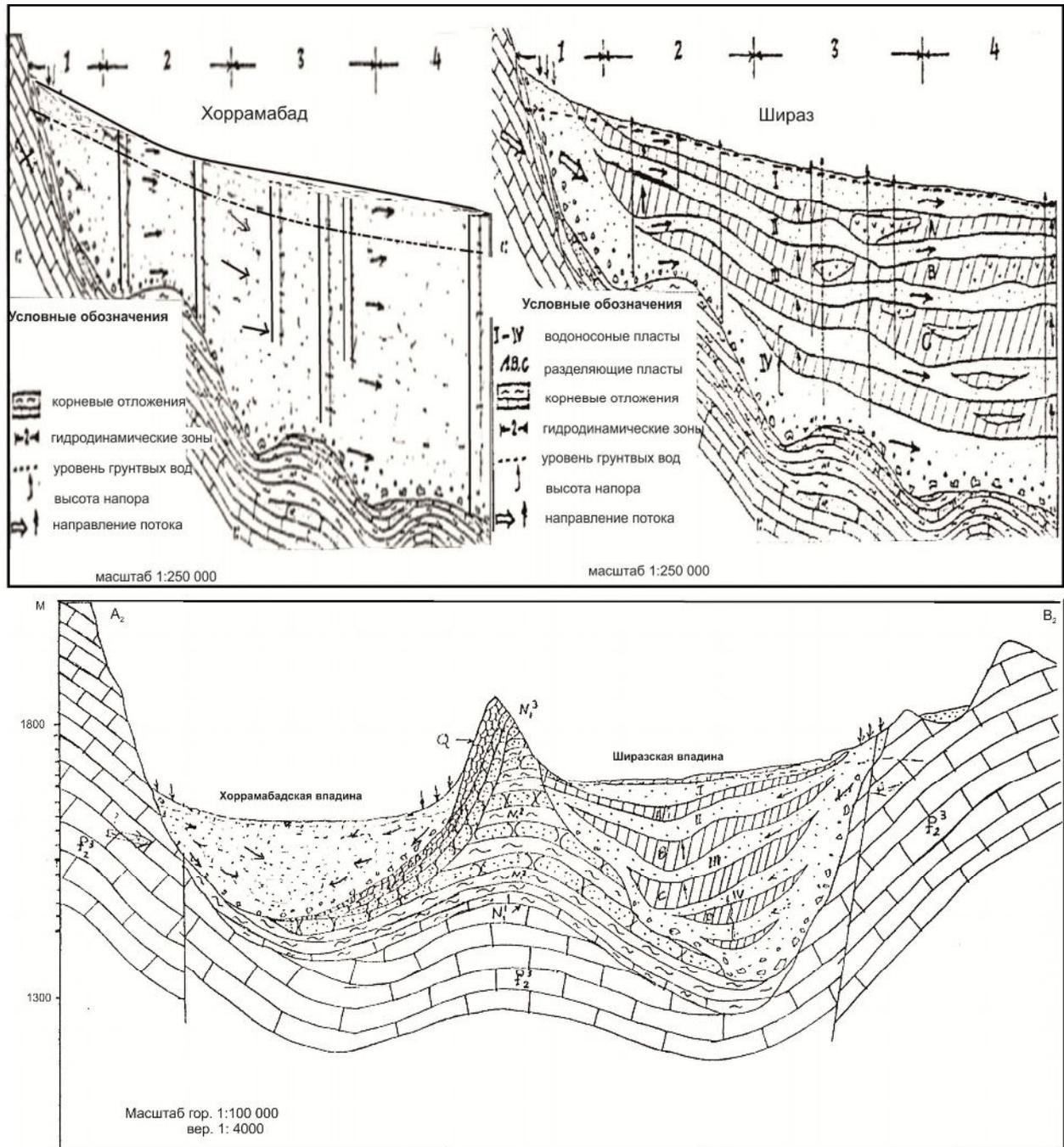


Рис. 3.8. Поперечный гидрогеологический разрез через Хоррамабадскую и Ширазскую впадины, исполнитель Амджади. А. [2].

Выводы

1. По геологическим данным об изменчивости литологического состава четвертичных отложений Хоррамабадского бассейне, а также по данным

распределения не напорных потоков подземные воды выделяются четвертичный водоносный комплекс, содержащий грунтовые воды, ряд дочетвертичных водоносных горизонтов, содержащие карстовые воды.

2. По направлению с северо-востока на юго-запад в потоке подземных вод выделяются области питания, частичной разгрузки, транзита и региональной разгрузки. Основными источниками питания подземных вод являются: подземный приток из горного обрамления, поглощение из водотоков, инфильтрация атмосферных осадков, ирригационных и техногенных вод.

3. Грунтовые воды в зоне питания Хоррамабадского бассейна имеют минерализацию до 1 г/дм³, а в зоне разгрузки минерализация заметно повышается, что связано с растворением солей диапиров атмосферными осадками и антропогенным загрязнением (удобрения, отходы химического производства и шахты).

3.3. Региональные закономерности формирования химического состава подземных вод грунтовых водоносных горизонтов Хоррамабадского и Ширазского бассейнов

Региональные закономерности формирования химического состава подземных вод грунтовых водоносных горизонтов Хоррамабадского и Ширазского бассейнов в разное время изучали такие исследователи: Гвоздецкий Н. А. [23], Шестаков В. М. [26, 86], Камали Г. [43], Aghdam J. A. [90, 91], Bower H. [103], Issar A. [99], Feng-Guang Y. [112], Claasen H. [119], Goovaerts P. [120], Raeisi E. [143], Todd D. K. [151], Vahidi I. [152], Wright A. [153].

Формирование химического состава грунтовых вод в этих бассейнах связано: а) с условиями циркуляции подземных вод в зоне интенсивного водообмена; б) с выщелачиванием солей из известняков и из вышележащих покровных отложений; в) с катионным обменом между водой и породой; г) из смешением вод разных водоносных горизонтов; д) с искусственным загрязнением подземных вод в результате хозяйственной деятельности.

На территории Хоррамабадского и Ширазского бассейнов подземные воды грунтовых водоносных горизонтов в большинстве случаев хорошего качества и пригодны для хозяйственно-питьевых целей.

Общая минерализация воды этих грунтовых водоносных горизонтов в этих бассейнах меняется от 150 до 350 мг/дм³, местами достигая 900–1200 мг/дм³.

Содержание гидрокарбонатов – 75–120 мг/дм³, хлора – 20–150 мг/дм³, сульфатов – 9,9–20,3 мг/дм³, кальция – 35–86 мг/дм³, магния – 2–4 мг/дм³. Общая жесткость воды грунтового водоносного горизонта не превышает 1,9–4,8 мг-экв/дм³, иногда достигая 16,2 мг-экв/дм³.

Наряду с хорошим качеством подземных вод грунтового водоносного горизонта иногда встречаются воды повышенной минерализации (до 1200 мг/дм³), их химический состав характеризуется большой пестротой особенно в зоне выклинивания.

Преобладающим типом вод является гидрокарбонатный кальциевый тип:

$$M_{0,4} \frac{HCO_3 80}{Ca75}$$

На участке среднего течения р. Хошкруд подземные воды грунтового водоносного горизонта имеют низкую минерализацию, но иногда встречаются воды повышенной минерализации, обусловленной инфильтрацией атмосферных и поверхностных вод через засоленные и загипсованные покровные отложения (например, на левом берегу р. Хошкруд).

Зависимость качества грунтовых вод от условий питания подтверждается многочисленными наблюдениями. Установлено, что эти воды в пределах правобережья долины р. Хошкруд содержат повышенное содержание хлора и сульфатов и отличаются повышенной жесткостью.

Общая жесткость грунтовых вод в пределах бассейна р. Хошкруд колеблется от 1,76 до 14,2 мг-экв/дм³.

Воды этого же водоносного горизонта в Хоррамабадском бассейне имеют низкую минерализацию. Сухой остаток не превышает 1500 мг/дм³. Хлор и

сульфат содержится в малом количестве или отсутствуют, а общая жесткость не превышает 1,8 мг-экв/дм³.

Наиболее пресные воды с минерализацией до 500 мг/дм³ распространены в горных обрамлениях межгорных впадин и в пределах выходов карстовых источников. Атмосферные осадки здесь фильтруются через обломочные породы непосредственно на зеркало грунтовых вод.

На водоразделах располагается зона с минерализацией вод от 1000 до 1500 мг/дм³ и более. На участках, где развиты глины неогена и палеогена, минерализация подземных вод грунтового горизонта достигает 3100 мг/дм³.

Четвертичные отложения и отложения неогена содержат растворимые минералы (гипс и монтмориллонит). Поэтому подземные воды в этих отложениях имеют сульфатно-хлоридный натриевый состав. Эти воды, смешиваясь с водами грунтового горизонта, увеличивают их минерализацию до 3100 мг/дм³ не только на водоразделах, но и в долинах Хошкруд и Хоррамабад.

В устье р. Полфаса минерализация достигает 8600–11800 мг/дм³.

Здесь подземные воды грунтового водоносного горизонта имеют застойный режим. Качество вод иногда резко ухудшается вследствие проникновения в водоносный горизонт промышленных вод или загрязненных грунтовых и поверхностных вод.

Формирование химического состава подземных вод грунтового водоносного горизонта в Хоррамабадском бассейне определяется рядом важных взаимодействующих факторов, главными из которых являются – геологическое строение, физико-географические особенности и физико-химические процессы. Основным источником формирования эксплуатационных запасов являются: естественные ресурсы грунтового водоносного горизонта; фильтрация из р. Хоррамабад и оросительных каналов.

По нашему мнению на химический состав подземных вод оказывает влияние формация Гачсаран, представленная известняками, гипсами и солью. Общая минерализация подземных вод растет от гор к центру равнины (к юго-

западу города Хоррамабад). Слабосоленоватые воды распространены также на некоторых участках на северо-западе и западе бассейна, где они имеют преимущественно хлоридный состав. Поток подземных вод направлен с юго-востока и востока на северо-запад и запад.

Общая минерализация родников изменяется от 236 до 507 мг/дм³. Наибольшей минерализацией обладают грунтовые воды покровного слоя, а ниже она повсеместно уменьшается и если в верхнем водоносном пласте на отдельных участках содержатся слабосоленоватые воды, то в среднем и нижнем они сменяются пресными водами, хотя их минерализация близка к предельной для данного типа вод. Такая картина вертикальной зональности минерализации подземных вод сформировалась в связи с процессом континентального засоления в условиях жаркого климата, интенсивного орошения и близкого к поверхности земли залегания уровня грунтовых вод. Кроме того, определенную роль в этом играет поверхностный сток со склонов соляных куполов (диапиров). Вода со склонов этих куполов фильтруется через морские отложения, растворяет и выщелачивает разные соли. Этот процесс играет большую роль в формировании вод повышенной минерализации.

Таким образом, формирование подземных вод повышенной минерализации в пределах Хоррамабадского бассейна происходит за счет поступления солей и миграции их сверху вниз, а также поступления техногенных вод и испарения.

Повышение минерализации может быть связано также с континентальным засолением грунтовых вод или с антропогенным загрязнением (удобрения, отходы химического производства на территории Хоррамабадского бассейна).

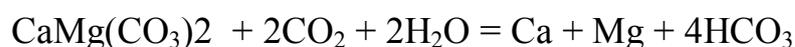
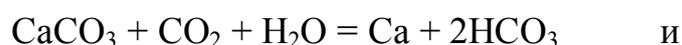
Под воздействием сбросов городских и промышленных отходов, с удобрением сельскохозяйственных земель и деятельности человека на территории Хоррамабадского бассейна произошло загрязнение грунтовых вод. Поэтому изучение процесса загрязнения стало актуальной задачей.

Климат существенно влияет на химический состав грунтовых вод. Это атмосферные осадки, ветры, температура воздуха. Например, значительное количество осадков, поступающих в водоносные комплексы, вызывает разбавление грунтовых вод и тем самым снижают ее минерализацию. Высокая температура воздуха и почвы летом способствует повышению испарения с зеркала грунтовых вод и транспирации воды растениями. Эти процессы приводят к повышению минерализации грунтовых вод

Подземные воды грунтового водоносного горизонта Хоррамабадского бассейна имеют такой химический состав: общая минерализация воды меняется от 180 до 2160 г/дм³, общая жесткость – от 1,9 до 33,8 мг-экв/дм³, кальций – от 60,3 до 275,6 мг/дм³; сульфаты меняются от 72,0 до 714 мг/дм³. Максимальные значения минерализации и общей жесткости встречаются на небольших участках.

Изменению химического состава подземных вод при длительной эксплуатации водозаборов (скважин) способствует и усиление процессов выщелачивания гипсов, сульфидов и карбонатов.

Главным источником поступления в подземные воды гидрокарбоната и кальция являются водовмещающие породы – мергели и известняки. Перевод кальцита в подземные воды идет по таким реакциям:



Карбонатные породы плохо растворимы при существующих в пласте температуре и давлении. Для перевода в воду больших их количеств необходимо присутствие углекислого газа, переводящего карбонаты в растворимые бикарбонаты. Активизация выщелачивания объясняется появлением дополнительного количества углекислого газа. Углекислый газ может поступать в подземные воды разом с загрязненными атмосферными осадками и продуцироваться процессами окисления органического вещества. Появление дополнительного количества углекислого газа и его роль в

образовании карста в карбонатных породах рассматривается у многих работах, в том числе и в работах Гвоздецкого Н. А. [23], Шестакова В. М.[26], Камали Г. [43].

Анализируя химический состав подземных вод во времени, нельзя не обратить внимания на рост содержания нитратов. Это объясняется постоянно увеличивающейся долей загрязненных нитратами воды, фильтрующейся из орошаемых полей в грунтовый водоносный горизонт. Возрастающее во времени загрязнение грунтового водоносного горизонта требует учета биохимических и физико-химических процессов нитрификации, протекающих по схеме:



Для решения задачи прогноза качества грунтовых вод в Ширазском и Хоррамабадском бассейнах нами собран и обработан материал по их химическому составу за 2004–2014 г.г.

4. РАСЧЕТ БАЛАНСОВ ГРУНТОВЫХ ВОД ХОРРАМАБАДСКОГО И ШИРАЗСКОГО БАССЕЙНОВ И ИХ СРАВНЕНИЕ

Методика составления баланса подземных вод детально освещается в работах Листенгартена В. А. [56, 57], Мавлянова Г. К. [60, 61], Плотникова Н. И. [64, 65], Carrillo-Rivera J. J. [107], Аскеров И. С. [64], Ахмедсафин У. М. [54], Гейнц В. А. [54], Исрафиллов И. С. [56], Кац Д. М. [45], Шестакова В. М. [25, 26].

Баланс грунтовых вод АПР (аллювиально-пролювиальные равнины) наиболее целесообразно выражать в единицах расхода, причем он может быть выражен уравнением, связывающем его приходную и расходную части.

$$Q_0^+ + Q_p^+ + Q_{др}^+ + Q_k^+ + Q_{ро}^+ + Q_{по}^+ + Q_{mk}^+ + Q_{kp}^+ + Q_{лс}^+ + Q_{тр.в}^+ = \\ = Q_{рд}^- + Q_{ит}^- + Q_{ср}^- + Q_{гв}^- + Q_c^- + Q_{лс}^- + Q_{вп}^- \pm Q_w \text{ или} \quad (4.1)$$

$$[Q_{прих.} - Q_{расх.}] T = \square \pm \Delta V,$$

где $\pm \Delta V$ – разница между объемом приходных и расходных элементов баланса подземных вод;

$Q_{прих.}$ – объем приходных элементов;

$Q_{расх.}$ – объем расходных элементов;

T – время баланса.

Кроме того, в общем балансе потока должны учитывать изменения сложившихся запасов подземных вод в пределах АПР Q_w^\pm , которые в ненарушенных условиях в многолетнем разрезе равны нулю, а в условиях АПР, нарушенных техногенным воздействием, они могут быть достаточно большими и отражать общее увеличение или реже – уменьшение сложившихся запасов подземных вод (Листенгартен В. А.) [57].

4.1. Баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (2012 г.)

Баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна состоит из приходных и расходных элементов баланса, которые приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Элементы баланса грунтовых вод Хоррамабадского бассейна

Элементы баланса	
Приходные	
Q_0^+	Инфильтрация атмосферных осадков
Q_p^+	Инфильтрация из рек
$Q_{др}^+$	Подземный приток по долинам горных пород
Q_k^+	Инфильтрация конденсационных вод
$Q_{ро}^+$	Инфильтрация поданных на поля орошения речных вод
$Q_{по}^+$	Инфильтрация поданных на поля подземных оросительных вод
Q_{mk}^+	Инфильтрация из магистральных оросительных кяризов
$Q_{кп}^+$	Подземный приток из коренных пород предгорный
$Q_{дс}^+$	Подземный приток из другой зоны
$Q_{тp.b}^+$	Инфильтрация потерь воды, транспортированных из водохранилищ для города
Расходные	
$Q_{рд}^-$	Расходы родников
$Q_{ит}^-$	Эвапотранспирация
$Q_{ср}^-$	Сток подземных вод в реки
$Q_{гв}^-$	Добыча воды кяризами и горизонтальными водозаборами
$Q_{с}^-$	Добыча воды эксплуатационными скважинами
$Q_{дс}^-$	Дренаж подземных вод коллекторно-дренажной сетью
$Q_{вп}^-$	Подземный сток в другую зону
Q_w^\pm	

4.1.1. Приходные составляющие водного баланса

Инфильтрация атмосферных осадков, конденсационных вод и потерь воды из оросительных каналов оцениваются по характерной для данного региона или его отдельных частей величиной коэффициента инфильтрации.

Наиболее распространенными методами оценки величин инфильтрационного питания (Q_0^+) является лизиметрический метод и интерпретация режимных данных колебаний уровней грунтовых вод в одиночных скважинах. При региональных исследованиях определение инфильтрации по колебаниям уровня грунтовых вод дает более обоснованные средние результаты и является предпочтительным.

Коэффициент инфильтрации атмосферных осадков в восточной части Апшеронского полуострова (Азербайджан) составляет 0,22 и 0,34, причем эта

величина зависит от многих факторов (Л. В. Аскеров, И. С. Исрафилов, В. А. Листенгартен) [56]. На наш взгляд территории Таджикистана, Апшеронского полуострова (Азербайджан) и юга Казахстана могут быть аналогами территории исследований учитывая похожие климатические условия.

На территории Таджикистана (Яхсуйская впадина) годовая инфильтрация осадков на различных глубинах принята такая (табл. 4.2) [45, 67]:

Таблица 4.2

Годовая инфильтрация атмосферных осадков на разных глубинах (мм/год)

В 2012 г. инфильтрация – 616,8 млн.м ³ /год	Глубина, м	За год	%
	1,0	320	51
	1,5	255	41
	2,0	105	17
	3,0	173	28

В соответствии с этим, для Хоррамабадского бассейна принят коэффициент инфильтрации 0,20-0,35, причем для четырех районов и двух периодов он рассматривается отдельно.

Надо отметить, что для Хоррамабадского бассейна рассматривается общий баланс подземных вод на два периода А и В (А – зимний период от XI 2011 г. по IV 2012 г.; В – летний период от V 2012 г. по X 2012 г) с использованием данных аналога (Азербайджан, Таджикистан) [45, 73].

Сумма атмосферных осадков Хоррамабадского бассейна в течение XI 2010г. – X 2012 г. составляет 521 мм/год. Около 84% (437 мм/год) этой величины приходится на период А, а 16 % (84 мм/год) на период В. Расчет инфильтрации осадков для различных районов Хоррамабадского бассейна приведен в табл. 4.3.

Различными авторами роль подземного притока из коренных пород горной складчатой зоны ($Q_{кп}^+$) оценивается по-разному. Подавляющее большинство исследователей считают, что он не превышает 10–15 % от суммы приходных статей баланса (У. М. Ахмедсафин, В. А. Гейнц и др. [54]). Однако некоторые придерживаются мнения о возможности более значительных

притоков, потому что они приурочены к системе разломов (Г. Д. Калианиди, Г. М. Леонов и др. [48]).

Таблица 4.3

Инфильтрация атмосферных осадков для различных районов Хоррамабадского бассейна (млн. м³/год)

№ района и его название	Период А	Период В	За год
№ 1 (Доре)	22	6	28
№ 2 (Дехпир)	87	11	98
№ 3 (Ташкан)	133	11	98
№ 4 (Хоррамабад)	153	15	168

Выполненные исследования показали, что величина притока из коренных пород горной зоны для различных АПР Азербайджанской равнины колеблется от незначительной до 27 % и в среднем составляет 25 % . Она полностью зависит от вида контакта отложений, слагающих равнину в привершинных частях и в подошве, а также от литологического состава, наличия тектонических нарушений и обводненности коренных пород в зоне контакта.

Подземный приток из коренных пород ($Q_{кп}^+$) в Азербайджане составляет 16,8 % от суммы приходных элементов баланса всех АПР. Для Хоррамабадского бассейна в целом он равен 14 %, распределяясь по районам следующим образом:

с юго-востока подземный приток составляет 5,58, с северо-востока – 2,92, а с юга – 3,5 %.

Одной из важнейших проблем в условиях АПР является вопрос взаимосвязи между подземными и поверхностными водами в ненарушенных и нарушенных условиях, оптимизация комплексного использования этих вод для нужд водоснабжения и орошения.

Формирование подземных вод АПР в значительной мере осуществляется за счет поверхностных вод рек (Q_p^+), которые в вершинных зонах равнин часто теряют часть стока или полностью. Такие случаи описаны в литературе, например, В. Н. Островский [43] указывает, что р. Аксу в Казахской равнине в

пределах конуса выноса в интервале расходов 3,5–6,0 м³/с теряет на инфильтрацию около 46 % своего стока. Для потоков подземных вод АПР Азербайджанских равнин за счет инфильтрации из рек формируется около 27 % от общей величины сложившихся ресурсов.

Река Хоррамабад, в районе №4 Хоррамабадского бассейна, с северо-востока притекает во впадину. В районе № 3 река Хоррамабад – эфемерная, и далее в районе № 1 подземные воды, сформированные за счет орошения, разгружаются в реку.

В условиях интенсивного орошения земель важным родником пополнения подземных вод становятся потери из магистральных оросительных каналов и инфильтрация оросительных вод поданных на поля (в условиях АПР Азербайджанских равнин – 23 % от сложившихся ресурсов).

Многие исследователи подземных вод АПР Шварцев С. Л. [87], В. А. Листенгартен и др. [56, 57] уделяют большое внимание необходимости учета так называемых «возвратных вод». Речь идет о подземных водах, которые добываются водозаборами, подаются на орошение земель, затем поступают в коллекторно-дренажную сеть, и пополняют подземные воды.

На востоке Хоррамабадского бассейна (районы № 4, № 2) существуют магистральные оросительные каналы воды, которые отбираются из реки Хоррамабад (их расход достигает до 1000 дм³/с), а на юге впадине нет магистральных оросительных каналов, потому что эксплуатационные скважины обычно находятся вблизи орошаемых земель. Вместо магистральных каналов можно рассмотреть кяризы. Потери воды из этих водопроводов составляет приблизительно 27 % общих ресурсов всех районов.

Обычно оросительные речные воды (Q_{po}^+) находятся между скважинами и земельными угодьями и поэтому потери воды из этих речных водотоков должны учитываться в зависимости от типа сети (открытой, закрытой), имея в виду, что некоторый объем воды теряется на фильтрацию в почву и породы зоны аэрации, пополняя грунтовые воды, часть расходуется на испарение с

водной поверхности каналов и прилегающих к ним земель, часть воды не используется и сбрасывается. Показателем технического совершенства оросительной системы является ее коэффициент полезного действия (КПД), равный отношению объема воды, поданной на орошение, к объему воды, изъятый из водоисточников в оросительную сеть. В 2012 году, например, потери оросительной воды на фильтрацию при ее транспортировании от точек водозабора до хозяйств-потребителей, составили 43 км³ или 21 % от водозабора (Кац Д. М.) [45].

Потери речных вод (Q_{po}^+) для Хоррамабадского бассейна и его районов приведены в табл. 4.3–4.6.

Для расчета инфильтрации конденсационных вод на территории Азербайджана были предложены $Q_k^+ = 1/3 Q_0^+$, т.е. инфильтрация конденсационных вод (Q_k^+) в 3 раза меньше, чем инфильтрация атмосферных осадков (Q_0^+). Для расчета баланса Хоррамабадского бассейна принята именно такая зависимость (Листенгартен В. А.) [57].

Элементы баланса инфильтрации поданных на поля оросительных вод ($Q_{по}^+$) для Хоррамабадского бассейна приняты такие (этот элемент зависит от многих факторов: геологии, гидрогеологии, глубины залегания грунтовых вод): район № 1 (Доре) – 20 %; № 2 (Дехпир) – 32 %; № 3 (Ташкан) – 35 % и № 4 (Хоррамабад) 70 %.

Почти 28 км³/год воды из водохранилищ транспортируется для города Хоррамабад ($Q_{tp.b}^+$).

4.1.2. Расходные составляющие водного баланса

В Азербайджане в аналогичных условиях использовались материалы лизиметрических наблюдений для определения величины испарения и транспирации воды растительностью (эвапотранспирация) ($Q_{ит}^-$) в зависимости от глубин залегания уровня грунтовых вод. По экспериментальным материалам для территории АПР равнин Азербайджана с глубинами залегания грунтовых

вод менее 3 м, модули эвапотранспирации оказались равны 6 дм³/с км² или 189 мм/год (К. Г. Ганиев) [60].

Испарение, транспирация с уровня грунтовых вод и ирригационное питание являются важным элементом баланса подземных вод. Для территории Яхсуйской долины (Таджикистан) составляет соответственно 23 и 24 % от суммы расходных и приходных частей. Годовое испарение на различных глубинах для этой территории Таджикистана составило (табл. 4.4): (Шестаков В. М.) [86].

Таблица 4.4

Годовое испарение на различных глубинах, (млн. м³/год)

В 2012 г. (испарение – 1600 млн. м ³ /год)	Глубина, м	За год	%
	1,0	770	48
	1,5	477	30
	2,0	235	15
	3,0	213	13

Хоррамабадский бассейн из-за холодного и сухого климата характеризуются не высокой испаряемостью, которая составляет в среднем за год 32–288 мм. Она резко меняется в течение года, составляя зимой 17–20 мм/месяц, летом 31–34 мм/месяц.

Для разных районов Хоррамабадского бассейна приняты такие величины эвапотранспирации (табл. 4.5):

Таблица 4.5

Величина эвапотранспирации для разных районов Хоррамабадского бассейна, (млн. м³/год)

№ и название района	Период А	Период В	За год
№ 1 (Доре)	12	20	32
№ 2 (Дехпир)	96	192	288
№ 3 (Ташкан)	98	139	237
№ 4 (Хоррамабад)	22	45	67

В Хоррамабадской впадине существуют 11 кяризов и 280 родников (их суммарный расход $Q_{гв}$) и пробурено 618 скважин (их суммарный дебит Q_c) при помощи которых добываются подземные воды, которые используются для

орошения. В табл. 4.6 приведены суммарные расходы и дебиты для разных районов Хоррамабадского бассейна.

Таблица 4.6

Суммарные расходы и дебиты для разных районов Хоррамабадского бассейна, (дм³/с)

№ и название района	Период А	Период В	За год
№ 1 (Доре)	3,0	7,0	10,0
№ 2 (Дехпир)	1,5	2,5	4,0
№ 3 (Ташкан)	1,8	4,2	6,0
№ 4 (Хоррамабад)	10,0	28,0	38

В Хоррамабадском бассейне существуют родники со средним дебитом $Q = 8,4 \text{ дм}^3/\text{с}$ ($Q_{\text{рд}}$). Эти родники находятся, в основном, на востоке района 4 (Хоррамабад). Вода родников используется для орошения, земледелия и водоснабжения населенных пунктов, а остаток разгружается в р. Кашкан.

Дренирование подземных вод осуществляется коллекторно-дренажной сетью на северо-западе Хоррамабадского бассейна. Расход дренажных вод составляет до $411 \text{ дм}^3/\text{с}$ ($Q_{\text{дс}}$).

Суммарное потребление воды в г. Хоррамабаде составляет более $94,3 \text{ дм}^3/\text{с}$, из которых $58,4 \text{ дм}^3/\text{с}$ обеспечивается водозаборными скважинами впадины, магистральными каналами из реки Хоррамабад ($22,23 \text{ дм}^3/\text{с}$) и $13,67 \text{ дм}^3/\text{с}$ транспортируются из водохранилища по трубопроводам.

Часть воды из родников и кяризов используется для водоснабжения населенных пунктов. Количественно эта величина не определена. На каждого жителя г. Хоррамабада определена норма потребления воды, которая равна $200\text{--}230 \text{ дм}^3/\text{сут}$.

Для каждого района отдельно рассчитано суммарное питание и разгрузка подземных вод (табл. 4.10), но два элемента (подземный приток в каждый район и подземный отток из другого района) из них неизвестны. В соответствии с этими данными баланс подземных вод для всего Хоррамабадского бассейна и выделенных 4-х районов рассчитан за год (табл. 4.3–4.11).

Известно, что при усиленной откачке воды водозаборными скважинами уровень подземных вод понижается, а вследствие потерь воды при хозяйственной деятельности, транспортировке воды из водохранилища для питьевых целей и уменьшения площади земледелия, уровень подземных вод опять повышается.

4.1.3. Характеристика баланса грунтовых вод Хоррамабадского бассейна

Хоррамабадская бассейн имеет площадь около 331 км², ее оконтуривают коренные отложения горной системы Загрос [145, 146, 151].

Хоррамабадский бассейн можно разделить на 4 гидрогеологических районов, имеющих свою балансовую характеристику [2]. В связи с тем, что приходные и расходные элементы потока грунтовых вод определены приблизительно, и каждый выделенный район имеет свою особую характеристику, мы рассматривали структуру их баланса отдельно (рис. 4.1, табл. 4.7).

Таблица 4.7

Расчленение гидрогеологических районов Хоррамабадского бассейна и их площадь.

№ района и его название	Площадь района, км ²	Площадь земледелия, км ²	Площадь насел. пунктов, км ²	Площадь залежных земель, км ²
№ 1 (Доре)	18	9	6	3
№ 2 (Дехпир)	33	12	8	13
№ 3 (Ташкан)	58	38	14	6
№ 4 (Хоррамабад)	222	128	67	27
Хоррамабадский бассейн полностью	331	187	95	49
Площадь, %	100%	56%	28%	16%

При рассмотрении элементов баланса, представленных в табл. 4.7–4.10, видно, что в зимний период приходные статьи баланса больше чем в летний период, кроме расходов Q_{po}^+ и $Q_{по}^+$, которые образуются за счет орошения ирригационных земель, причем избыточные воды встречается в зимний период.

Район № 1 (Доре)

Этот район площадью около 18 км² находится на северо-западе Хоррамабадского бассейна и является зоной формирования подземных и поверхностных вод (табл. 4.7). Здесь 9 км² это площади, которые используются для земледелия, 6 км² занято населенными пунктами; и 3 км² – залежные земли. При помощи оросительных каналов и труб вода в этот район подается из реки Хоррамабад. Район Доре представляет собой зону разгрузки подземных и поверхностных вод всех районов, здесь же происходит и разгрузка добавочных вод за счет орошения и осадков. Разгружаются подземные и поверхностные воды района в р. Кашкан.

Район № 2 (Дехпир)

Этот район находится в Хоррамабадской впадине и занимает площадь 33 км². Район Дехпир на севере граничит с высотами Яаварабад, а на юге – с районом № 4 (Хоррамабад). Около 12 км² занимают площади, которые используются для земледелия; 8 км² занято населенными пунктами и 13 км² – залежные земли (табл. 4.7, 4.11).

На севере этого района существуют родники и кяризы (канаты). Большинство воды родников и канатов используется для ирригации. Остальные воды родников и воды за счет орошения сельскохозяйственных земель в этом районе разгружаются через район 4 в р. Хоррамабад.

Район № 3 (Ташкан)

Этот район имеет площадь около 58 км²; 69 %, 38 км² его площади занято под земледелием и 14 км² занято населенными пунктами; и 6 км² – залежные земли. Из коренных отложений, которые располагаются на юге этого района, выходят родники, которые формируют небольшие водотоки. Часть воды из этих водотоков используется для орошения земель, а остальные воды водотоков и воды ирригационных потерь разгружаются в район №1 (табл. 4.7).

Район № 4 (Хоррамабад)

Этот район площадью около 222 км² находится на центре Хоррамабадского бассейна и является зоной формирования подземных и поверхностных вод (табл. 4.7, 4.11). Здесь 128 км² занимают площади, которые используются для земледелия, 67 км² занято населенными пунктами и 27 км² – залежные земли.

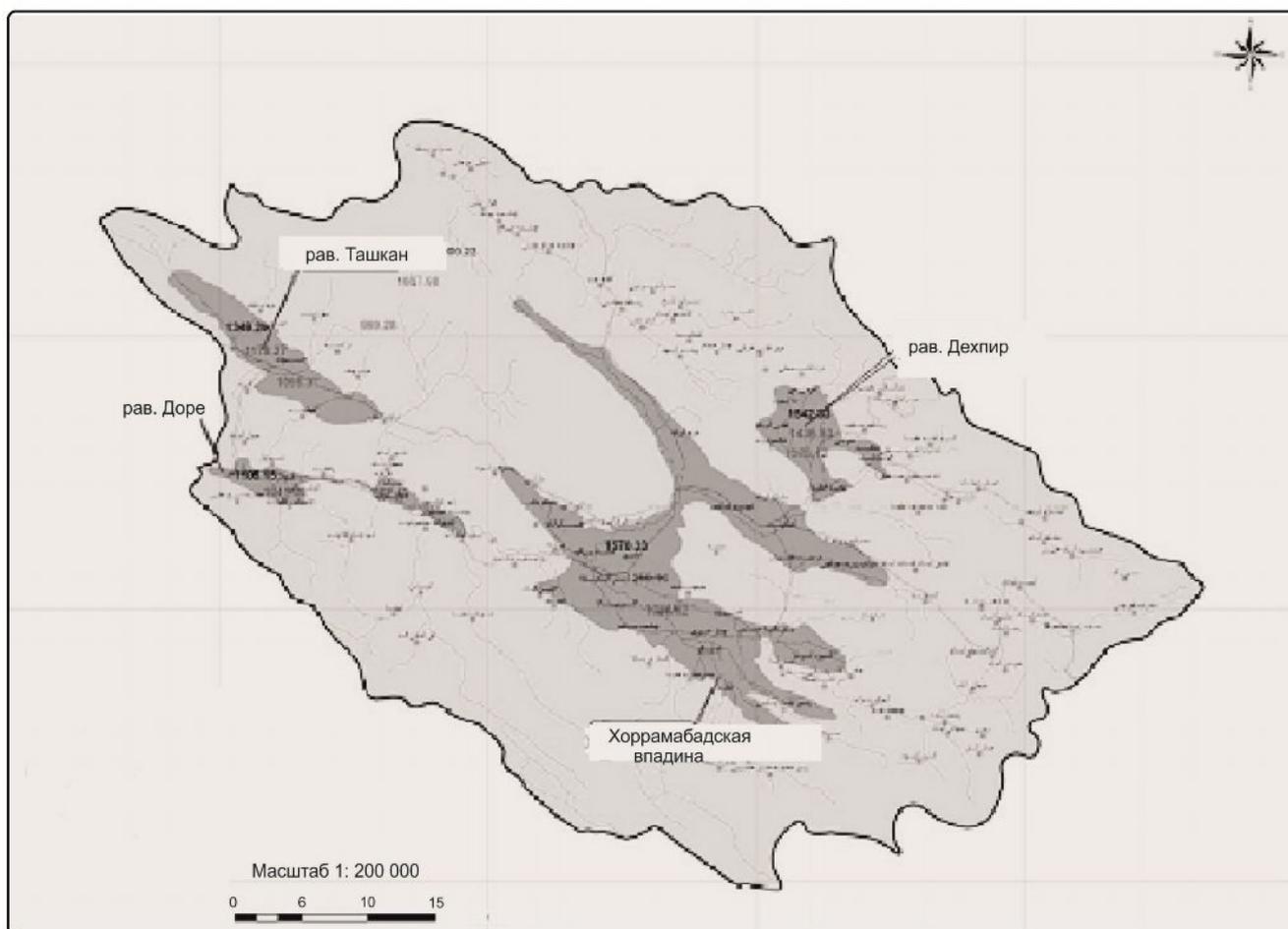


Рис. 4.1. Карта-схема районирования Хоррамабадского бассейна (районы №№ 1–4) (исполнитель Амджади А) [2].

При помощи оросительных каналов и труб большая часть воды из р. Хоррамабад отбирается для орошения садов и сельскохозяйственных земель и для водоснабжения г. Хоррамабад. Неиспользованная часть речной воды ниже г. Хоррамабад инфильтруется на подземные воды. По сравнению с другими районами, этот район № 1 (Хоррамабад) имеет высокую абсолютную отметку (около 1500 м); абс. Отметки уровня воды изменяется от 1170 до 1350 м; а средняя температура ниже, чем в других районах. Уровень воды в течение года колеблется с амплитудой от 0,9 м до 4,3 м, причем эти колебания, в основном,

зависят от количества осадков. Ниже приведены элементы баланса, рассчитанные для каждого района Хоррамабадского бассейна.

Таблица 4.8

Баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (район №1 и район №2),
площадь 51 км², (млн. м³/год)

Элементы баланса	Район № 1	Район № 2	Сумма
Приходные			
Q_0^+	49,76	516,64	566,4
Q_p^+	191,5	82,07	273,57
$Q_{др}^+$	0,0	0,0	0,0
$Q_{дс}^+$	0,0	0,0	0,0
$Q_{гр.в}^+$	0,0	0,0	0,0
$\Sigma_{прих.}$			839,97
Расходные			
$Q_{рд}^-$	2,94	6,6	9,54
$Q_{ит}^-$	208,65	112,36	321,01
Q_c^-	8,57	7,0	15,57
$Q_{дс}^-$	0,0	0,0	0,0
$Q_{др}^-$	12,34	5,3	17,64
Q_p^-	261,92	214,29	476,21
$\Sigma_{расх.}$			839,97
$\pm\Delta v$			0,0

Таблица 4.9

Баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (район №3 и район №4),
площадь 280 км², (млн. м³/год)

Элементы баланса	Район № 3	Район № 4	Количество
1	2	3	4
Приходные			
Q_0^+	609,80	102,26	712,06
Q_p^+	15,57	36,32	51,89
$Q_{др}^+$	0,0	0,0	0,0
$Q_{дс}^+$	0,0	0,0	0,0
$Q_{гр.в}^+$	0,0	0,0	0,0
Сумма $\Sigma_{прих.}$			764,05
Расходные			
$Q_{рд}^-$	5,29	2,86	8,15
$Q_{ит}^-$	161,68	241,8	403,48
Q_c^-	6,56	26,0	32,56
$Q_{дс}^-$	0,0	0,0	0,0
$Q_{др}^-$	0,0	0,0	0,0
Q_p^-	133,23	192,33	325,56
Сумма $\Sigma_{расх.}$			769,75
$\pm\Delta v$			-5,7

Таблица 4.10

Баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна, площадь 331 км²,
(млн. м³/год)

Элементы баланса		Количество
1	2	3
Приходные		
Q_0^+	Инфильтрация атмосферных осадков	17,28
Q_p^+	Инфильтрация из рек	3,51
$Q_{др}^+$	Подземный приток по долинам горных пород	12,0
$Q_{по}^+$	Инфильтрация поданных на поля подземных оросительных вод	5,54
$Q_{пр}^+$	Инфильтрация из питьевых и промышленных вод	7,72
$Q_{кп}^+$	Подземный приток из коренных пород предгорный	0,0
$Q_{дс}^+$	Подземный приток из другой зоны	0,0
$Q_{тр.в}^+$	Расход транспортирования воды из водохранилищ для города	0,0
Сумма $\Sigma_{прих.}$		46,05
Расходные		
$Q_{рд}^-$	Расходы родников	5,0
$Q_{ит}^-$	Эвапотранспирация	0,0
$Q_{ср}^-$	Сток подземных вод в реки	0,0
$Q_{гв}^-$	Добыча воды кяризами и горизонтальными водозаборами	0,78
$Q_{с}^-$	Добыча воды эксплуатационными скважинами	33,0
$Q_{дс}^-$	Дренаж подземных вод коллекторно-дренажной сетью	0,0
$Q_{вп}^-$	Подземный сток в другую зону	12,97
Сумма $\Sigma_{расх.}$		51,75
$\pm \Delta v$		-5,7

4.1.4. Характеристика баланса грунтовых вод Ширазского бассейна

В 1999 г. Камали Голамреза в МГУ защитил диссертацию на тему: «Формирование потоков подземных вод Ширазской впадины (Иран)» [43]. В этой работе он составил обобщенный баланс грунтовых вод Ширазского бассейна и построил гидродинамическую (геофильтрационную) модель для изучения регионального формирования ресурсов грунтовых вод с выявлением балансовых факторов. С помощью такой модели предполагается производить региональную переоценку ресурсов грунтовых вод, а также изучать процессы подтопления и обосновывать работу дренажных систем. Компьютерное моделирование проводилось по программе MODFLOW.

Полный расчет баланса грунтовых вод с обоснованием приходных и расходных частей баланса представлен в работе [43]. В табл. 4.11 представлено общий баланс грунтовых вод Ширазского бассейна.

Таблица 4.11

Баланс грунтовых вод Ширазского бассейна, площадь 605 км², (дм³/с)

Элементы баланса бассейнов		Количество
Приходные		
Q_0^+	Инфильтрация атмосферных осадков	330,0
Q_p^+	Инфильтрация воды из рек	147,0
$Q_{др}^+$	Подземный приток по долинам горных пород	605,0
$Q_{по}^+$	Инфильтрация поданных на поля подземных оросительных вод	245,1
$Q_{пр}^+$	Инфильтрация из питьевых и промышленных вод	124,6
$Q_{кп}^+$	Подземный приток из коренных пород предгорный	280,0
Сумма		1731,7
Расходные		
$Q_{рд}^-$	Расходы родников	58,1
$Q_{ит}^-$	Эвапотранспирация	639,6
$Q_{ср}^-$	Сток подземных вод в реки	294,1
$Q_{гв}^-$	Добыча воды кяризами и горизонтальными водозаборами	268,2
$Q_{с}^-$	Добыча воды эксплуатационными скважинами	728,2
$Q_{дс}^-$	Дренаж подземных вод коллекторно-дренажной сетью	16,1
$Q_{вп}^-$	Подземный сток в другую зону	95,00
Сумма		2099,3
$\pm\Delta v$		-367,6

4.2. Сравнение балансов грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов

Баланс грунтовых вод Хоррамабадского вод и Ширазского бассейнов приведен в табл. 4.12 и на рис. 4.2.

Из табл. 4.12 видно, что приходные части баланса грунтовых вод в Ширазском бассейне составляют 17317,0 дм³/с, а в Хоррамабадском бассейне – 14599,2 дм³/с. Расходные части баланса грунтовых вод в Ширазском бассейне составляют 2099,3 дм³/с, а в Хоррамабадском бассейне – 1794,4 дм³/с.

Таблица 4.12

Сравнение балансов грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов
(дм³/с)

Элементы баланса бассейнов		бассейн	
		Ширазский (605 км ²)	Хоррамабадский (331 км ²)
Приходные			
Q_0^+	Инфильтрация атмосферных осадков	330,0	547,9
Q_p^+	Инфильтрация воды из рек	147,0	111,3
$Q_{др}^+$	Подземный приток по долинам горных пород	605,0	380,5
$Q_{по}^+$	Инфильтрация поданных на поля подземных оросительных вод	245,1	175,7
$Q_{пр}^+$	Инфильтрация из питьевых и промышленных вод	124,6	244,8
$Q_{кп}^+$	Подземный приток из коренных пород предгорный	280,0	139,0
Сумма		1731,7	1459,2
Расходные			
$Q_{рд}^-$	Расходы родников	58,1	158,5
$Q_{ит}^-$	Эвапотранспирация	639,6	309,0
$Q_{ср}^-$	Сток подземных вод в реки	294,1	137,0
$Q_{гв}^-$	Добыча воды кяризами и горизонтальными водозаборами	268,2	124,7
Q_c^-	Добыча воды эксплуатационными скважинами	708,2	636,5
$Q_{дс}^-$	Дренаж подземных вод коллекторно-дренажной сетью	36,1	27,4
$Q_{вп}^-$	Подземный сток в другую зону	95,00	401,3
Сумма		2099,3	1794,4
(±Δv)		-367,6	-195,2

Расходные части баланса в этих бассейнах превышают приходные части. Дефицит грунтовых вод в Ширазском бассейне составляет -367,6 дм³/с, а в Хоррамабадском бассейне – -195,2 дм³/с. Это составляет -0,61 дм³/с из 1 км² в Ширазском бассейне и -0,59 дм³/с из 1 км² – в Хоррамабадском бассейне.

Дефицит грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне приведет к понижению уровня грунтовых вод. Нами был построен график колебания уровня грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне (рис. 4.3). Из этого графика видно, что уровень грунтовых вод ежегодно будет понижаться в среднем на 0,76 м.

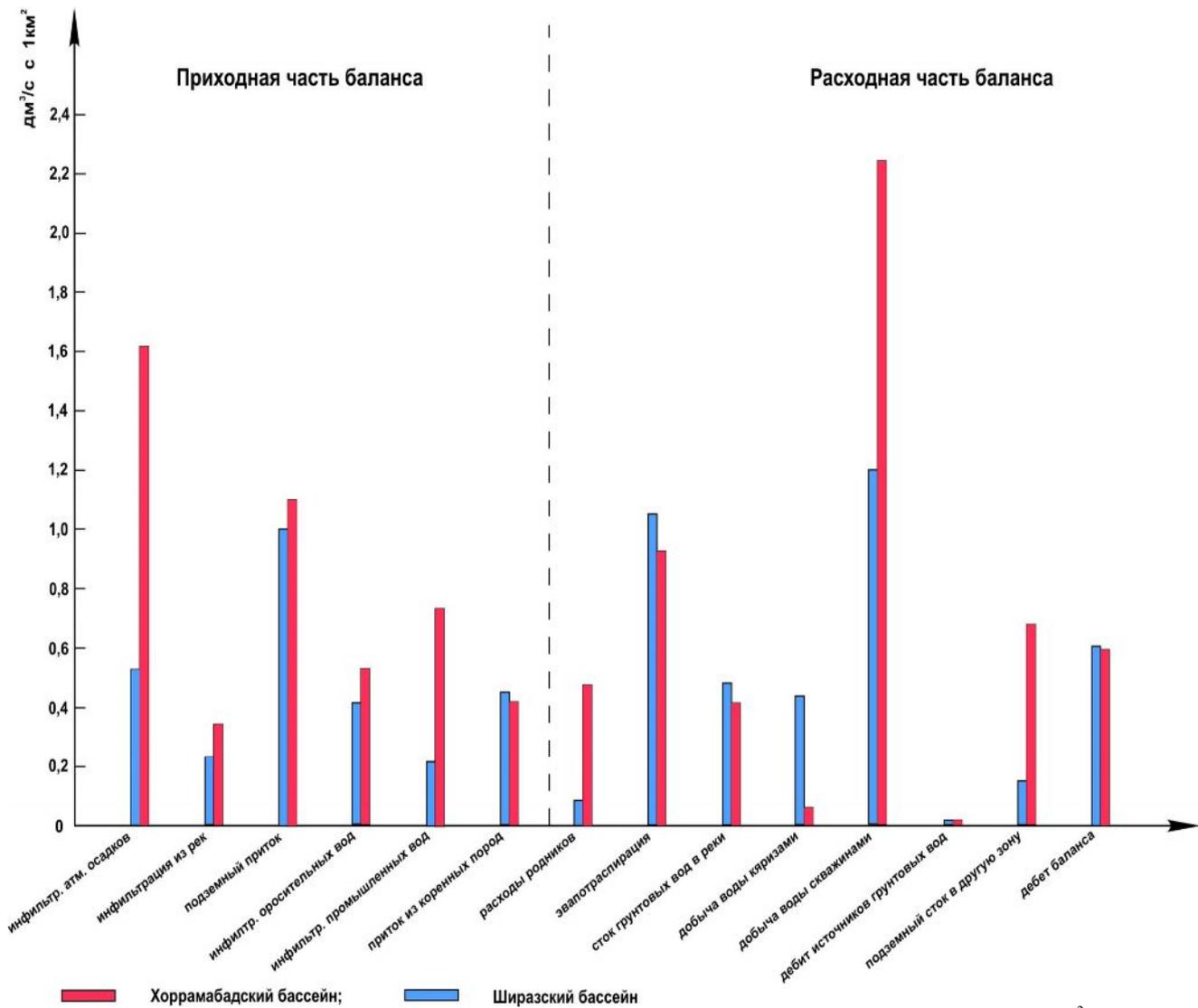


Рис.4.2. Графики баланса грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов (дм³/с)

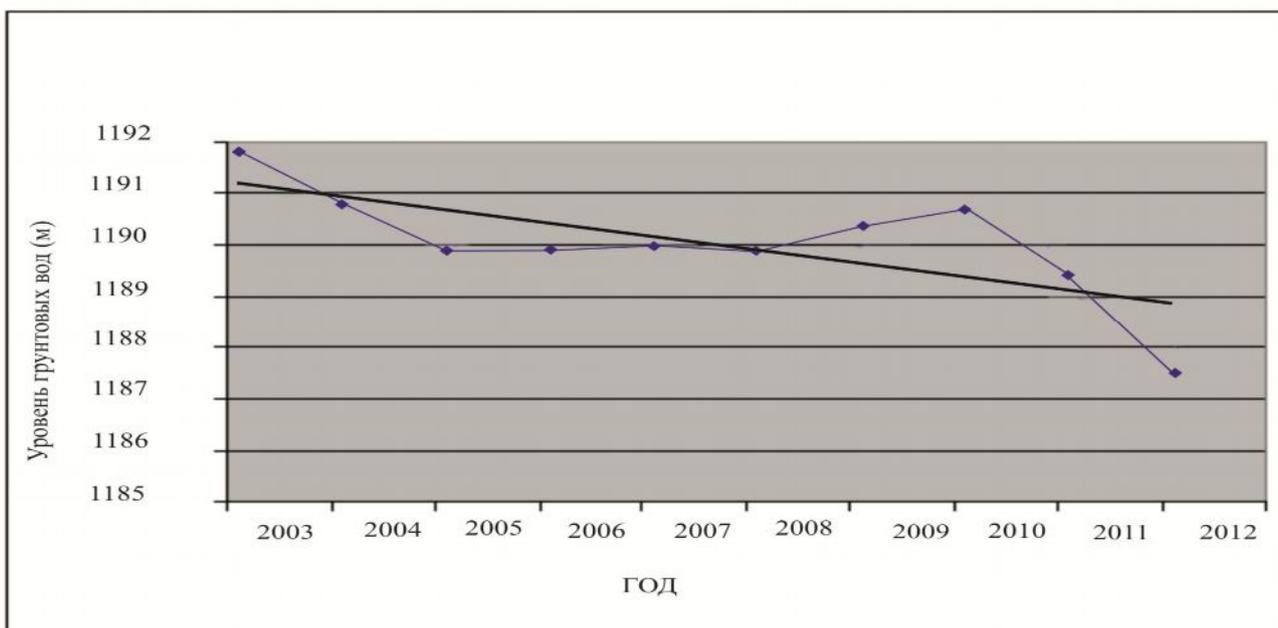


Рис. 4. 3. График колебания уровня грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне

Таким образом, в ближайшие 10 лет это приведет к осушению водозаборных скважин, эксплуатирующих грунтовые воды в Хоррамабадском бассейне, особенно в южной его части.

Основные выводы:

- Причиной дефицита баланса грунтовых вод являются гидрогеологические условия и условия эксплуатации грунтового водоносного горизонта, что определяют элементы баланса та разность в их приходными и расходными элементами;

- дефицит баланса грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне составляет $-195,2 \text{ дм}^3/\text{с}$, что равно $-0,59 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 ;

- дефицит баланса грунтовых вод в Ширазском бассейне составляет $-367,6 \text{ дм}^3/\text{с}$, что равно $-0,61 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 ;

- дефицит баланса грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне на 2,65 % меньше, чем дефицит Ширазского бассейна;

- большой дефицит баланса грунтовых вод Ширазского бассейна объясняется жарким климатом (большая эвапотранспирация) и большим количеством населения (большая добыча воды кяризами и горизонтальными водозаборами);

- дефицит грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне приведет к понижению уровня грунтовых вод;

- уровень грунтовых вод ежегодно будет понижаться в среднем на 0,76 м, что приведет к осушению водозаборных скважин, эксплуатирующих грунтовые воды в Хоррамабадском бассейне, особенно в южной его части.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВЫХ ВОД ХОРРАМАБАДСКОГО И ШИРАЗСКОГО БАССЕЙНОВ МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Методы многомерного статистического анализа являются одними из самых эффективных средств выявления закономерностей, скрытых в больших массивах данных, поскольку в гидрогеологии, как правило, отсутствует возможность непосредственного их наблюдения и измерения. О них можно судить лишь по конечным результатам проявления процессов, отражающихся в значениях различных характеристик, например в химическом составе вод.

Химический состав подземных вод является конечным продуктом воздействия не одного, а целой совокупности природных и техногенных процессов (условий питания и разгрузки, ионного обмена, антропогенного загрязнения и т.д.). Влияние этих процессов в подземных водах сказывается на взаимосвязанном изменении содержания химических компонентов и на характере связей между ними. Однако, эти связи в наблюдаемых компонентах подземных вод в "чистом виде" не сохраняются. Корреляционные зависимости между наблюдаемыми значениями переменных фактически являются конечным результатом действия всей совокупности процессов.

В условиях ненарушенного стока любой водоносный горизонт представляет собой сбалансированную систему.

В наших исследованиях мы применяли кластерный и факторный анализы.

5.1. Кластерный анализ

Для выяснения степени близости химического состава грунтовых вод из скважин и родников в разных частях Ширазского и Хоррамабадского бассейнов мы предлагаем применять кластерный анализ.

Критерием оценки близости химического состава разных вод предлагается евклидово расстояние в n -мерном пространстве. Этот показатель вычисляется для любого количества гидрохимических компонент. Кластерный

анализ выполняется по агломеративной иерархической процедуре с построение дендрограммы (одномерного графа), изображающего взаимные связи между объектами. Сущность агломеративной кластерной процедуры состоит в вычислении функции расстояния между всеми парами объектов и объединении на каждом шаге той пары объектов, для которой достигается минимум евклидова расстояния. Это позволяет в структуре евклидова пространства выделить несколько кластеров, в которые объединяются воды близкого химического состава, т.е. объединение проб воды, близких по химическому составу.

5.1.1. Методика кластерного анализа

Методика кластерного анализа детально разработана в работах [35, 42, 53, 82, 84–86, 93, 94, 108, 116, 145].

Пусть множество $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ образует n объектов (водозаборных скважин), принадлежащих некоторой популяции (артезианскому бассейну) Π_i . Предположим, что существует некоторое множество наблюдаемых показателей (элементы химического состава грунтовых вод из скважин) $C = (C_1, C_2, \dots, C_p)$, которыми обладает каждый объект. Наблюдаемые показатели могут быть как количественными, так и качественными. Количественные данные называются измерениями. Результат измерения i -той характеристики I_j объекта обозначается символом $X_{i,j}$, а вектор $X_j = [x_{i,j}]$ размерности $p \times I$ будет отвечать каждому ряду измерений (для j -го объекта). Таким образом, для множества объектов J располагаем множеством векторов измерений $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, которые описывают множество I . Множество X может быть представлено как n точек в p -мерном евклидовом пространстве E_p .

Пусть m – целое число меньше чем n . Задача кластерного анализа заключается в том, чтобы на основании данных, содержащихся в множестве X , разбить количество объектов J на m кластеров (подмножеств) $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$ так, чтобы каждый объект I_j принадлежал одному и только одному подмножеству и

чтобы объекты, принадлежащие одному и тому же кластеру, были сходными, в то время как объекты, принадлежащие разным кластерам, были разнородными (несходными).

Для того, чтобы решить задачу кластерного анализа, необходимо количественно определить понятия сходства и разнородности (несходства). Что означает: два объекта I_j и I_k различны? Задача была бы решена, если бы i -тый и j -тый объекты попадали в один и тот же кластер всякий раз, когда расстояние (отдаленность) между соответствующими точками X_i и X_j было бы достаточно малым, и, наоборот, попадали в разные кластеры, если бы расстояние между точками X_i и X_j было бы достаточно большим.

Рассмотрим понятие расстояния между точками X_i и X_j из E_p с абстрактных позиций.

Неотрицательная вещественнозначимая функция $d(X_i \text{ и } X_j)$ называется функцией расстояния (метрикой), если:

- a) $d(X_i; X_j) \geq 0$ для всех X_i и X_j из E_p ;
- b) $d(X_i; X_j) = 0$ тогда и только тогда, когда $X_i = X_j$;
- c) $d(X_i; X_j) = d(X_j; X_i)$;
- d) $d(X_i; X_j) \leq d(X_i; X_k) + d(X_k; X_j)$ где X_i, X_j, X_k – любые три вектора из E_p .

Значения $d(X_i; X_j)$ для заданных X_i и X_j называется расстоянием между X_i и X_j и эквивалентно расстоянию между I_i и I_j соответственно выбранным характеристикам $(C_1, C_2, \dots, C_p)^T$.

Существует пять методов определения функций расстояния. Евклидово расстояние (метрика) очень популярна и наиболее употребительна и определяется по формуле:

$$d_2(X_i, X_j) = \left[\sum_{k=1}^p (X_{ki} - X_{kj})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

Евклидово расстояние используется тогда, когда выполняется следующее:

- Наблюдения X извлекаются из генеральных совокупностей описываемых многомерным, нормальным законом и компоненты X взаимно независимы и имеют одну и ту же дисперсию;

- Компоненты X_1, X_2, \dots, X_n вектора наблюдений X однородны по своему физическому смыслу и они одинаково важны с точки зрения решения вопроса об отнесении объекта к тому или иному кластеру;

- Факторное пространство совпадает с геометрическим пространством нашего бытия и понятие близости объектов соответственно совпадает с понятием геометрической близости в этом пространстве.

Понятием, противоположным расстоянию между X_i и X_j , является понятие сходства между двумя объектами I_i и I_j n измерений (X_1, X_2, \dots, X_n) могут быть представлены в виде матрицы данных размером $p \times n$:

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{p1} & X_{p2} & \dots & X_{pn} \end{pmatrix} = (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5.2)$$

Аналогичным образом расстояния между парами векторов $d(X_i; X_j)$ могут быть представлены в виде симметричной матрицы расстояний:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{p1} & d_{p2} & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Диагональные элементы $d_{ii} = 0$ для $i = 1, 2, \dots, n$.

Неотрицательная вещественная функция $s(X_i; X_j) = s_{ij}$ называется мерой сходства если:

- $0 \leq s(X_i; X_j) < 1$ для $X_i \neq X_j$;
- $s(X_i; X_j) = 1$;
- $s(X_i; X_j) = s(X_j; X_i)$.

Пары значений мер сходства объединяются в матрицу сходства:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & 1 & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Величина S_{ij} называется коэффициентом сходства.

Процедура кластеризации совершается ступенчато. Это означает, что два наиболее близко расположенных объекта I_1 и I_2 объединяются и рассматриваются как один кластер. Это приводит к тому, что число объектов уменьшается и становится равным $n-1$, причем один кластер будет содержать два объекта, а $n-2$ остальных по одному. Процесс повторяется до тех пор, пока все объекты не сгруппируются в один кластер. В этой последовательной процедуре используется интуитивное представление о расстоянии между объектом и кластером и расстоянии между двумя кластерами.

Неотъемлемой частью задачи кластерного анализа является понятие оптимального критерия (целевой функции), которое позволяет установить, когда достигается желательное разбиение на кластеры. Для введения этого критерия необходимо найти меру внутренней однородности кластера и меру разнородности кластеров между собой.

Пусть $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ и $J = (J_1, J_2, \dots, J_n)$ обозначают два кластера объектов, принадлежащих некоторой популяции π . Пусть $C = (C_1, C_2, \dots, C_p)^T$ будет множеством характеристик, которые генерируют два множества измерений $X = (X_1, X_2, \dots, X_{n1})$ и $I = (I_1, I_2, \dots, I_{n2})$, соответствующие I и J .

Обозначим через $D = \{d(X_i; Y_j), i=2, \dots, n_1; j=1, 2, \dots, n_2\}$ множество всех расстояний. Величина $D_1(I, J) = \min d(X_i, Y_j), i=1, \dots, n_1; j=1, \dots, n_2$. (5.5)

называется минимальным локальным расстоянием между кластерами I и J , соответствующим данной функции расстояния d .

Если $D = \{d(X_i; Y_j)\}$ определено также, тогда

$$D_2 = \max d(X_i, Y_j) \quad i=1, \dots, n_1; j=1, \dots, n_2. \quad (5.6)$$

называется максимальным локальным расстоянием между кластерами I и J .

$$\text{Величина } D_3 = \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} d(X_i, Y_j) / n_1 n_2 \quad (5.7)$$

есть среднее расстояние между кластерами I и j , соответствующее данной функции расстояния d .

$$\text{Величина } D_4 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{X} - \bar{Y})^T (\bar{X} - \bar{Y}), \quad (5.8)$$

где: $\bar{X} = \sum_{i=1}^{n_1} x_i / n_1$, $\bar{Y} = \sum_{i=1}^{n_2} y_i / n_2$, называется статистическим расстоянием между кластерами I и J . Величина D_4 пропорциональна квадрату расстояния между центрами рассеяния множеств X и Y .

Кластеризация построена на минимизации внутригрупповых сумм квадратов отклонений. Они выражаются в терминах евклидовых расстояний и называются методами минимальной дисперсии.

Рассмотрим матрицу наблюдений $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$. Квадрат евклидова расстояния между X_i и X_j определяется по формуле:

$$d_{ij}^2 = (X_i - X_j)^T (X_i - X_j). \quad (5.9)$$

Метод полных связей заключается в том, что два объекта, принадлежащих к одной и той же группе (кластеру), имеет коэффициент сходства, который меньше некоторого порогового значения S . В терминах евклидова расстояния d это означает, что расстояние между двумя точками (объектами) кластера не должно превышать некоторого порогового значения r . В этом случае r определяет максимально допустимый диаметр подмножества, образующего кластер.

С этим методом много общего имеет метод максимального, локального расстояния. Каждый объект рассматривается здесь как одноточечный кластер. Объекты группируются последовательно по следующему правилу: два кластера объединяются, если максимальное расстояние между точками одного кластера и точками другого минимально. Процедура состоит из $n-1$ шагов, а результатом являются разбиения, которые совпадают со всевозможными разбиениями в методе полных связей для любых пороговых значений.

Метод внутригрупповой суммы квадратов (ВСК) отклонений представляет собой последовательную процедуру, на каждом шаге которой объединяются такие два кластера, которые приводят к минимальному увеличению целевой функции, т.е. ВСК. При объединении кластеров I (n_1 элементов) и J (n_2 элементов) это увеличение равно:

$$D_{IJ} = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{X} - \bar{Y})^T (\bar{X} - \bar{Y}), \quad (5.10)$$

где: \bar{X} и \bar{Y} обозначают векторы средних по кластерам I и J . Этот метод направлен на объединение близкорасположенных кластеров.

Расстояние между двумя кластерами I и J в центроидном методе определяется как евклидово расстояние между центрами (средними) этих кластеров, т.е. как $d_{IJ}^2 = (\bar{X} - \bar{Y})^T (\bar{X} - \bar{Y})$. Кластеризация осуществляется поэтапно: на каждом из $n-1$ шагов объединяются два кластера I и J , имеющие минимальное значение d_{IJ}^2 .

Двухгрупповой метод опирается на связь между объектом i и кластером I . Эта связь выражается в виде среднего коэффициента сходства между объектом i и всеми объектами, входящими в кластер I . Для того чтобы средний коэффициент выразить через евклидово расстояние, обозначим векторы входящие в кластер I , соответственно через X_1, X_2, \dots, X_{n_I} , а через \bar{X} – центр кластера I . Тогда среднее значение D_{iI} между объектами $i \notin I$ и всеми объектами из I будет равно:

$$D_{iI} = \frac{1}{n_I} \sum_{j=1}^{n_I} (X_j - Y)^T (X_j - Y), \quad (5.11)$$

где: Y обозначает вектор, соответствующий $i \notin I$.

Далее:

$$\begin{aligned} D_{iI} &= \frac{1}{n_I} \sum_{j=1}^{n_I} (X_j - \bar{X} + \bar{X} - Y)^T (X_j - \bar{X} + \bar{X} - Y) = \\ &= \frac{1}{n_I} \sum_{j=1}^{n_I} (X_j - \bar{X})^T (X_j - \bar{X}) + (\bar{X} - Y)^T (\bar{X} - Y) \end{aligned}, \quad (5.12)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (5.12) обозначается S_I^2 и называется внутригрупповой дисперсией объектов из I ; второе слагаемое представляет собой квадрат расстояния между объектом i и центром кластера I . Процедура последовательной кластеризации заключается в том, что объект $i \notin I$, для которого D_{iI} минимально, присоединяются к кластеру I . Из уравнения видно, что если два кластера имеют сравнимые дисперсии, то среднее расстояние D_{iI} минимизирует расстояние между объектом i и центром кластера I . Для кластеров с различными дисперсиями объединение происходит в первую очередь с кластером меньшей дисперсии.

В методе групповых средних определяется среднее сходство между двумя кластерами I и J как среднее сходство между всеми парами объектов из I и J . Кластеры строятся последовательно: два кластера с минимальным средним коэффициентом сходства объединяются. Для того чтобы среднее сходство выразить в терминах евклидова расстояния обозначим через \bar{X} и \bar{Y} соответственно средние кластеров I и J . Средний квадрат расстояний между объектами кластеров I и J будет равен:

$$D_{ij}^2 = \frac{1}{n_I n_J} \sum_{i=1}^{n_I} \sum_{j=1}^{n_J} (X_i - Y_j)^T (X_i - Y_j) = \frac{1}{n_I} \sum_{i=1}^{n_I} \left\{ \frac{1}{n_J} \sum_{j=1}^{n_J} (Y_j - \bar{Y})^T (Y_j - \bar{Y}) + (\bar{Y} - X_i)^T (\bar{Y} - X_i) \right\} \quad (5.13)$$

$$= \frac{1}{n_J} \sum_{j=1}^{n_J} (Y_j - \bar{Y})^T (Y_j - \bar{Y}) + \frac{1}{n_I} \sum_{i=1}^{n_I} (\bar{Y} - X_i)^T (\bar{Y} - X_i)$$

первое слагаемое правой части уравнения (5.13) есть внутригрупповая дисперсия кластера j , а второе слагаемое – средний квадрат расстояний между X_i и \bar{Y} , $i = 1, 2, \dots, n_I$. Второе слагаемое может быть переписано как:

$$S_I^2 + d^2(\bar{X}, \bar{Y}) = \frac{1}{n_I} \sum_{i=1}^{n_I} (X_i - \bar{X})^T (X_i - \bar{X}) + (\bar{Y} - \bar{X})^T (\bar{Y} - \bar{X}), \text{ откуда}$$

$$D_{ij}^2 = S_I^2 + S_J^2 + d^2(\bar{X}, \bar{Y}), \quad (5.14)$$

т.е. минимизация среднего сходства эквивалентна минимизации.

Основная причина популярности евклидовой метрики в кластерном анализе заключается в том, что она наиболее близка к интуитивному

представлению о расстоянии и тесно связана с внутригрупповой суммой квадратов отклонений.

Схема последовательной кластеризации описывается следующим образом. Рассмотрим $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ как множество кластеров $\{I_1\}, \{I_2\}, \dots, \{I_n\}$; выберем два из них I_i, I_j которые наиболее близки друг другу и объединим их в один кластер. Новое множество кластеров, состоящее уже из $n-1$ кластеров, будет таким $\{I_1\}, \{I_2\}, \dots, \{I_i\}, \{I_j\}, \dots, \{I_n\}$. Повторяя процесс, получим последовательное множество кластеров, состоящее из $n-2, n-3$ и т.д. кластеров. В конце этой процедуры получится кластер, состоящий из n объектов и совпадающий с первоначальным множеством $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$. В качестве меры расстояния принимается квадрат евклидовой метрики d_{ij}^2 .

Для вычисления матрицы расстояний используется рекурсивная процедура, которая использует значения расстояний в предыдущей матрице.

Объединение кластеров i и j ведет к увеличению внутригрупповой суммы квадратов (ВСК) на величину W_{ij} , которая задается равенством:

$$W_{ij} = \frac{n_i n_j}{n_i + n_j} (\bar{X}_i - \bar{X}_j)^T (\bar{X}_i - \bar{X}_j) = \frac{n_i n_j}{n_i + n_j} d_{ij}^2, \quad (5.15)$$

где: $d_{ij}^2 = (\bar{X}_i - \bar{X}_j)^T (\bar{X}_i - \bar{X}_j)$.

Если кластер $I \cup J = L$ объединяется с K , то можно показать, что:

$$d_{KL}^2 = (\bar{X}_K - \bar{X}_L)^T (\bar{X}_K - \bar{X}_L) \text{ и } d_{KL}^2 = \frac{n_i}{n_L} d_{KI}^2 + \frac{n_j}{n_L} d_{KJ}^2 - \frac{n_i n_j}{n_L^2} d_{IJ}^2. \quad (5.16)$$

Из уравнения (5.15) следует, что $W_{KL} = \frac{n_K n_L}{n_K + n_L} d_{KL}^2$. (5.17)

Подставляя выражение (5.17) для каждого d^2 в уравнение (5.16), получим:

$$W_{KL} = \frac{1}{n_K + n_L} \{ (n_i + n_K) W_{KI} + (n_j + n_K) W_{KJ} - n_K W_{IJ} \} \quad (5.18)$$

Уравнение (5.18) определяет величину приращения ВСК при объединении K и $I \cup J$.

Начиная с матрицы квадратов евклидовых расстояний, $D = \{d_{ij}^2, i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n\}$ процедура заключается в объединении таких

кластеров I_p и I_q , для которых $d_{pq}^2 = 2W_{pq}$ минимально. Кластер I_p , состоящий из одного объекта, заменяется на $I_p \cup I_q$ а расстояния $d_{ip}^2, i=1,2,\dots,n; i \neq p, q$ в матрице D заменяется на $d_{ip}^2 = 2W_{ip}$. Элементы q -того столбца и строки равны нулю, т.е. S_q становится недействительным. Соответственно n_p заменяется на n_p+n_q , а n_q приравнивается нулю. Равенство $d_{ip}^2 = 2W_{ip}$ (5.19) выполняется для всех $\{d_{ij}^2\}, i, j \neq q$.

Подставляя W_{ip} из уравнения (5.18) в уравнение (5.19), получим:

$$\begin{aligned} d_{ip}^2 = 2W_{ip} &= \frac{2}{n_i + n_r} [(n_i + n_p)W_{ip} + (n_i + n_q)W_{iq} - n_i W_{pq}] = \\ &= \frac{1}{n_i + n_r} [(n_i + n_p)d_{ip}^2 + (n_i + n_q)d_{iq}^2 - n_i d_{pq}^2] \end{aligned} \quad (5.20)$$

где: $n_r = n_p + n_q$.

Если на каждом шаге объединения p -е столбцы и строки матрицы D преобразовываются по формуле (5.20), то равенство (5.19) будет выполняться для всех d_{ij}^2 и всех действительных множеств S_i и S_j .

Алгоритм группировки окончательно записывается следующим образом:

1. Находим $d_{pq}^2 = \min\{d_{pq}^2\}, i=1, \dots, j-1; j=2, \dots, n; n_i > 0; n_j > 0;$

2. Увеличение целевой функции при объединении двух кластеров I_p, I_q равно $W_{pq} = \frac{1}{2}d_{pq}^2$;

3. I_p заменяется на $S_p \cup S_q$; строка $\{d_{ip}^2\}$ и столбец $\{d_{pj}^2\}$ матрицы D пересчитываются по формуле (4.20), $i=1, 2, \dots, p-1; n_i > 0; j=p+1, \dots, n; j \neq q; n_j > 0;$

4. Полагаем $n_p = n_p + n_q$ и $n_q = 0$, превращая S_q в недействительное множество;

5. Записываем элементы кластера S_q в кластер S_p , возвращаемся к (5.1) и повторяем процедуру $n-2$ раз.

Одним из важнейших вопросов при решении кластерной проблемы является выбор необходимого числа кластеров. В некоторых случаях число кластеров m может быть выбрано априорно, однако в общем случае это число определяется в процессе разбиения множества на кластеры.

В задачах с большим числом наблюдений применяется метод случайного отбора для вычисления числа кластеров. Оптимальное число разбиений является функцией заданной доли β «наилучших» или в некотором смысле допустимых разбиений в множестве всех возможных.

При решении задачи кластерного анализа принимается, что:

- 1) выбранные характеристики в принципе допускают желательное разбиение на кластеры;
- 2) единицы измерения (масштаб) выбраны правильно.

Первая проблема называется проблемой выбора свойств или характеристик объектов, которая решается до начала процесса кластеризации.

Другой вопрос, который всегда сопутствует измерению, – выбор масштаба – также играет большую роль. Как правило, данные нормализуют вычитанием среднего и делением на стандартное отклонение; так что дисперсия оказывается равной единице. В случае, когда исходят из непосредственных (обычных) единиц измерения, возникает проблема интерпретации.

Задачи кластерного анализа решаются как в терминах матрицы расстояний D , так и в терминах матрицы сходства S .

Последовательный процесс кластеризации начинается с рассмотрения n объектов; затем два наиболее удаленных (ближайших) объекта объединяются в один кластер и число кластеров становится равным $n-1$. Процесс повторяется до тех пор, пока все n объектов не попадут в один кластер, содержащий все объекты.

Наиболее известный способ представления матрицы расстояний (разнородности) или сходства основан на идее дендрограммы или дендрограммы-дерева.

Дендрограмма определяется как графическое изображение результатов процесса последовательной кластеризации, который осуществляется в терминах матрицы расстояний или сходства. С помощью дендрограммы

графически или геометрически изображать процедуру кластеризации при условии, что эта процедура оперирует только с элементами матрицы расстояний или сходства.

Существует много способов построения дендрограмм-деревьев, соответствующих этой дендрограмме. В дендрограмме-дереве данные располагаются горизонтально, а результаты кластеризации по вертикали. Значения расстояний или сходства, отвечающие построению новых кластеров, изображаются на вертикальной прямой слева дендрограммы. Имея n объектов, можно построить большое количество дендрограмм-деревьев, которые соответствуют данной процедуре кластеризации, однако для данной конкретной матрицы расстояний или сходства, существует только одна дендрограмма-дерево. В дальнейшем рассматриваются дендрограммы-деревья только одного вида, и поэтому дендрограмма и дендрограммы-деревья отождествляются.

Вид дендрограммы зависит от выбора меры сходства или расстояния между объектом и кластером и методом кластеризации.

В соответствии с подразделением задач кластеризации на типы выделяются три основных типа обслуживающих их кластер-процедур:

- Процедуры иерархические (агломеративные и дивизимные) предназначенные для решения задач, когда число кластеров не известно, но его определение и не входит в условия задачи; требуется построить иерархическое дерево исследуемой совокупности, состоящей из n объектов, многомерных наблюдений. Иерархические процедуры применимы для задач классификации сравнительно небольших по объему совокупностей наблюдений, состоящих, как правило, из нескольких десятков наблюдений.
- Процедуры параллельные предназначены для решения тех же задач, что и иерархические процедуры. Они реализуются с помощью итерационных алгоритмов, на каждом шаге которых одновременно используются все имеющиеся наблюдения.

- Процедуры последовательные предназначены в основном для решения классификации достаточно больших массивов многомерных наблюдений (n -порядка нескольких сотен и тысяч наблюдений). Они реализуются с помощью итерационных алгоритмов, на каждом шаге которых используется лишь небольшая часть, например одно из исходных наблюдений, а также результат разбиения на предыдущем шаге.

Рассмотрим иерархические агломеративные процедуры, которые мы использовали при анализе грунтовых вод четвертичного водоносного горизонта Хоррамабадского бассейна грунтовых вод и Ширазского артезианского бассейна.

Принцип работы иерархических агломеративных процедур состоит в последовательном объединении групп элементов сначала близких (далеких), а затем все более отдаленных друг от друга. При этом агломеративные процедуры начинаются обычно с объединения отдельных элементов всей исходной совокупности наблюдений.

Иерархические процедуры, по сравнению с другими кластер-процедурами, дают более полный и тонкий анализ структуры исследуемого множества наблюдений. Привлекательной стороной подобных алгоритмов является возможность наглядной интерпретации проведенного анализа.

К недостаткам иерархических процедур относится громоздкость их вычислительной реализации. Соответствующие алгоритмы на каждом шаге требуют вычисления всей матрицы расстояния, а, следовательно, большой машинной памяти и времени, реализация которых возможна только на современной вычислительной технике.

Приведем некоторые примеры иерархических алгоритмов, которые использовались нами при исследовании:

- Агломеративный иерархический алгоритм “ближнего соседа” (или “одной связи”). Этот алгоритм исходит из матрицы расстояний между

наблюдениями, в которых расстояние между кластерами определено по формуле:

$$D_{\min}(S_e, S_m) = \min_{X_i \in S_e, X_j \in S_m} d(X_i, X_j) \quad (5.21)$$

На первом шаге алгоритма каждое наблюдение X_i ($i=1, 2, \dots, n$) рассматривается как отдельный кластер. Далее на каждом шаге работы алгоритма происходит объединение двух самых близких кластеров и соответственно по формуле (5.1) пересчитывается матрица расстояний, размерность которой изменяется на единицу. Работа алгоритма заканчивается, когда все исходные наблюдения объединены в один класс. Поскольку расстояние между любыми двумя кластерами в этом алгоритме равно расстоянию между двумя самыми близкими элементами, представляющими свои классы, то получаемые в итоге кластеры могут иметь достаточно сложную форму. В частности они не обязаны быть выпуклыми, ведь два элемента (наблюдения) попадают в один кластер, если существует соединяющая их цепочка близких между собой элементов.

Для устранения опасности появления случайных, не характерных для исследуемого явления объединений предложена модификация алгоритма «ближайшего соседа». Эта модификация состоит в том, что элементы исследуемой совокупности включаются в рассмотрение в порядке убывания плотности наблюдений в их окрестности, причем плотность оценивается как величина, обратная расстоянию до самого дальнего из m элементов, ближайших к данному. Целое число m назначается заранее из некоторых априорных соображений и, по смыслу использования в процедуре, определяет число элементов (в количестве $m+1$) в кластере, являющемся наиболее представительным, наиболее “населенным” среди всех кластеров, образующихся на первом шаге процедуры. А кластеры эти образуются по следующему правилу. Из элементов исследуемой совокупности (X_i) зарегулированные в порядке возрастания расстояния $R_i(m)$ от каждого из них до самого дальнего из m ближайших к нему соседей, выбираются вначале m точек,

попавших в окрестности точки X_1 радиуса $R_1(m)$, и из этих $m+1$ точек формируется первый кластер S_1 . Затем берется следующая по порядку точка X_{j_2} из числа $n-m-1$ оставшихся, т.е. не попавших в кластер S_1 , и к ней “притягиваются” для образования следующего класса все точки из числа не попавших в кластер S_1 , попадающие в ее окрестность радиуса $R_{j_2}(m)$, и т.д.

- Агломеративный иерархический алгоритм “дальнего соседа” (или “полной связи”) отличается от описанного выше алгоритма “ближнего соседа” лишь способом вычисления расстояния между классами. В алгоритме “дальнего соседа” это расстояние определяется как расстояние между двумя самыми отдаленными друг от друга представителями своих классов, т.е. они вычисляются по формуле:

$$D_{\min}(S_e, S_m) = \max_{X_i \in S_e, X_j \in S_m} d(X_i, X_j) \quad (5.22)$$

Существуют и другие иерархические процедуры, но мы их не рассматриваем.

Предлагаемый метод позволяет в структуре евклидова пространства выделить несколько групп, в которые объединяются химические составы грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.

5.1.2. Применение кластерного анализа для выделения участков грунтовых вод из подобным химическим составом

Грунтовые воды Ширазского бассейна широко используются для водоснабжения, в промышленности, для полива сельскохозяйственных культур и других целей. Грунтовые воды впадины в зоне питания имеют минерализацию до 1 г/дм^3 , а в зоне разгрузки минерализация заметно повышается, что связано с континентальным засолением и антропогенным загрязнением (удобрения, отходы химического производства и отливы из шахт). Грунтовые воды сульфатно-хлоридного кальциево-магниевого состава, удовлетворяющие питьевым нормам. Тип воды на северо-западе и на юго-

востоке впадины гидрокарбонатный кальциево-магниевый. Грунтовые воды содержат также тяжелые металлы.

В настоящее время планируется более широко использовать и грунтовые воды Хоррамабадского бассейна подземных вод.

Применение этого анализа позволяет находить в разных районах и участках грунтовые воды со сходным химическим составом и оконтуривать их. Это позволит выявить подобия или различия условий питания и разгрузки, процессов, определяющих формирование химического состава грунтовых вод, их возможного загрязнения и истощения, разработать мероприятия по их предотвращению.

Для определения сходства химического состава подземных вод разных районов и водоносных горизонтов в настоящее время используются различные аналитические методы и математическое моделирование. Но эти методы используют массивы данных с очень малым количеством данных. В настоящее время для этих целей все чаще применяются методы многомерного статистического анализа [35, 42, 85, 86, 101].

Эти методы являются одними из самых эффективных средств выявления закономерностей, скрытых в больших массивах данных, поскольку в гидрогеологии, как правило, отсутствует возможность непосредственного их наблюдения и измерения. О них можно судить лишь по конечным результатам проявления процессов, отражающихся в значениях различных характеристик, например в химическом составе вод.

Химический состав подземных вод является конечным продуктом воздействия не одного, а целой совокупности природных и техногенных процессов (условий питания и разгрузки, ионного обмена, антропогенного загрязнения и т.д.). Влияние этих процессов в подземных водах сказывается на взаимосвязанном изменении содержания химических компонентов и на характере связей между ними. Однако, эти связи в наблюдаемых компонентах подземных вод в "чистом виде" не сохраняются. Корреляционные зависимости

между наблюдаемыми значениями переменных фактически являются конечным результатом действия всей совокупности процессов.

В условиях ненарушенного стока любой водоносный горизонт представляет собой сбалансированную систему.

Критерием оценки близости химического состава разных вод предлагается евклидово расстояние в n -мерном пространстве. Этот показатель вычисляется для любого количества гидрохимических компонент. Кластерный анализ выполняется по агломеративной иерархической процедуре с построением дендрограммы (одномерного графа), изображающей взаимные связи между объектами. Сущность агломеративной кластерной процедуры состоит в вычислении функции расстояния между всеми парами объектов и объединении на каждом шаге той пары объектов, для которой достигается минимум евклидова расстояния. Это позволяет в структуре евклидова пространства выделить несколько кластеров, в которые объединяются воды сходного химического состава, т.е. объединение проб воды, близких по химическому составу.

Для реализации этой методики использованы данные химических анализов грунтовых вод, расположенных в разных местах Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадинах (табл. 5.1, 5.2).

Определения химического состава грунтовых вод выполнены в одной аккредитованной лаборатории в Тегеране на один момент времени (июль 2012 г.).

Для расчетов принимались такие показатели химического состава грунтовых вод: Ca, Mg, Na, HCO_3 , SO_4 , Cl, pH, Eh, минерализация, Cd, Co, Ba, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn и Fe (мг/дм^3). Таким образом, каждый 61-ого из этих химических анализов грунтовых вод интерпретируется как точка в 18-ти мерном пространстве.

Результаты химического состава грунтовых вод, приведенные в табл.(5.1, 5.2), запишем в виде матриц и проведем кластерный анализ.

Первая матрица (Хоррамабадский бассейн) содержит химические анализы грунтовых вод из 14 скважин и 18 родников, вторая (Ширазский бассейн) – из 23 скважин и 6 родников, Они охарактеризованы 18-ю химическими элементами и соединениями.

Кластерный анализ выполнялся по программе CLUSTER, разработанной на кафедре гидрогеологии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина и выполнялся по способу «полной связи».

Способы «ближнего» и «дальнего соседа» дают сходные результаты.

Таблица 5.1

Химический состав грунтовых вод Ширазского бассейна (мг/дм³)

Тип источника	Cd	Co	Ba	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Fe	PH	Cl	HCO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	Tds	ЕС _{умо}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Пирбона.ск	0.007	0,00001	0.001	0.014	0,00001	0.01	0,00001	0.393	0.032	8,3	43	165	202	68	50	28	530	740
Пол беренджи.ра	0.007	0,00001	0.028	0.015	0.017	0.004	0,00001	0.425	0.214	8,3	391	195	79	72	28	201	940	1670
Бабахаджи.ск	0.004	0.005	0,00001	0.003	0.008	0.03	0.001	0.145	0.027	8,3	53	185	231	78	50	41	580	937
Полфаса.ск	0.008	0,00001	0.002	0.019	0,00001	0.02	0,00001	0.398	0.038	8,2	58	201	210	74	51	38	605	904
Бармедаде.ра	0.004	0.011	0.003	0.014	0,00001	0.01	0,00001	0.388	0.039	7,8	56	238	189	72	54	36	617	873
кафтарак.ск	0.005	0.013	0.005	0.005	0.005	0.015	0.023	0.039	0.038	8,2	57	256	192	74	54	33	630	869
Бармеделак.ра	0.008	0.015	0.004	0.006	0.006	0.014	0.026	0.04	0.037	7,8	57	305	154	82	55	33	640	869
Барметаер.ра	0.008	0.015	0.004	0.006	0.006	0.014	0.026	0.04	0.037	7,5	184,9	305	205	104	67	378	1571	2290
Бармешур.ск	0.006	0.01	0.001	0.01	0.014	0.016	0.007	0.244	0.162	7,9	185	305	230	117	77	548	1974	3050
Бармехан.ра	0.006	0.03	0.015	0.377	0.051	0.044	0.046	0.122	1.472	8,3	1018	244	255	120	80	718	2380	3810
Бармебабунак.ра	0.002	0.01	0.014	0.012	0.007	0.004	0.023	0.04	0.12	8,3	1206	244	264	160	61	856	2700	4346
Солтанабад.ск	0.002	0.012	0.035	0.006	0.014	0.01	0.016	0.018	0.096	8,2	85	194	283	94	64	58	760	1132
Шапур.ск	0.002	0.015	0.03	0.017	0.048	0.004	0.23	0.057	0.298	8	85	180	283	98	43	50	665	1035
Круни.ск	0.006	0.01	0.025	0.024	0.059	0.087	0.041	0.315	1.391	8,5	92	207	288	118	58	57	700	1170
Джарестан.ск	0.007	0.02	0.006	0.009	0.005	0.009	0.002	0.196	0.203	8	71	195	264	90	52	45	686	1000
Гачи.ск	0.004	0.018	0.004	0.015	0.012	0.039	0.032	0.051	0.099	7,4	64	220	231	98	47	40	665	936
Махмудабад.ск	0.005	0.015	0.023	0.021	0.056	0.085	0.038	0.305	1.384	8,2	64	220	250	94	47	40	677	918
Пирмохамад.ск	0.007	0,00001	0.029	0.016	0.018	0.005	0,00001	0.429	0.218	7,9	185	225,5	154	71	39	25	518	703
Хатунак.ск	0.006	0.009	0.024	0.017	0.017	0.082	0.027	0.025	0.047	7,88	184,9	225,52	107	58	36	17	435	509
Монабад.ск	0.006	0.005	0,00001	0.013	0,00001	0,00001	0.039	0.13	0.054	7,3	21	214	59	46	33	10	351	486
Хабир.ск	0.006	0.004	0.016	0.011	0,00001	0.021	0.024	0.147	0.002	7,6	18	232	62	60	28	13	376	520
Шамс.ск	0.002	0.003	0.018	0.035	0.008	0.004	0.016	0.063	0.046	7,3	25	299	106	84	34	21	501	695
Мансурабад.ск	0.01	0.014	0.004	0.018	0.032	0.019	0.042	0.065	0.219	7,4	21	226	67	56	27	13	367	537
Мохамед.ск	0.004	0.036	0.037	0.036	0.025	0.049	0.045	0.092	0.264	7,6	25	226	73	52	30	19	384	545
Касрогше.ск	0.007	0.027	0.043	0.039	0.012	0.036	0.019	0.09	0.128	7,8	333	226	1047	349	27	213	2130	2950
Саади.ск	0,00001	0.01	0,00001	0.011	0.003	0.019	0.02	0.173	0.295	7,4	142	232	744	221	61	171	1327	2280
Абхан.ск	0,00001	0.017	0.038	0.039	0.095	0.038	0.023	0.146	1.338	8,1	301	275	288	94	75	201	1190	1820
Алнабад.ск	0.006	0.02	0.005	0.019	0.016	0.04	0.036	0.065	0.01	7,3	50	281	180	80	49	32	624	854
Баграм.ск	0,00001	0.021	0.013	0.027	0.018	0,00001	0.027	0.073	0.047	8	234	238	317	92	90	133	1715	2500

Таблица 5.2

Химический состав грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (мг/дм³)

Тип источника	Cd	Co	Ba	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Fe	PH	Cl	HCO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	Tds	ЕС _{μмо}
Рашиди-Дар Ск	0,0005	0,004	0,015	0,003	0,00001	0,0004	0,0008	0,005	0,048	7,28	80	300	60	230	170	13	384	600
Мелекшахи ск	0,00008	0,0008	0,074	0,048	0,00001	0,001	0,005	0,00001	0,11	7,02	30	510	57	350	240	6	441	690
Насерванд ск	0,00009	0,001	0,066	0,004	0,0004	0,0013	0,0005	0,007	0,00001	7,41	60	400	157	280	220	108	364	570
Дехбагер ск	0,00005	0,001	0,01	0,002	0,004	0,0016	0,0008	0,0009	0,059	7,21	130	570	3	390	280	29	643	990
Борджалы ист	0,0001	0,001	0,192	0,001	0,001	0,003	0,0002	0,014	0,04	7,41	20	320	20	180	200	1	236	370
Сорхе де ра	0,00008	0,003	0,2	0,001	0,001	0,003	0,0001	0,008	0,056	7,83	330	390	178	340	240	290	650	1000
Робатнамаки ск	0,00009	0,001	0,17	0,001	0,001	0,003	0,0005	0,004	0,021	7,71	160	460	55	350	300	20	507	780
Келмехуб ра	0,0002	0,002	0,21	0,003	0,00002	0,005	0,001	0,0008	0,11	7,4	80	530	143	360	250	108	409	640
Чешмебид ра	0,0001	0,002	0,23	0,003	0,0005	0,005	0,003	0,019	0,04	7,38	40	350	14	390	10	4	188	450
Сараб сага ра	0,0002	0,003	0,09	0,002	0,00001	0,0034	0,0007	0,004	0,07	7,5	40	530	92	430	200	26	416	650
Гале джогд ра	9,0001	0,001	0,08	0,0009	0,0009	0,003	0,0002	0,006	0,016	7,32	20	360	5	330	50	6	294	460
Чешме чераг ра	0,0002	0,001	0,2	0,002	0,00002	0,002	0,004	0,004	0,001	7,23	70	430	11	330	110	65	371	580
Сабур ск	0,00009	0,008	0,08	0,046	0,00001	0,002	0,005	0,005	0,9	7,54	40	380	52	340	110	18	294	460
Чешме сорхе ра	0,00008	0,0014	0,01	0,002	0,003	0,0017	0,0009	0,0009	0,06	7,97	70	330	71	300	110	39	275	430
Навекеш ра	0,00001	0,002	0,08	0,005	0,0006	0,002	0,006	0,008	0,1	7,18	30	390	24	360	80	3	326	510
Гилюран ск	0,00005	0,003	0,015	0,003	0,00001	0,0005	0,0008	0,005	0,04	7,26	120	490	5	390	200	24	624	960
Сарабеяс ра	0,00007	0,004	0,01	0,005	0,00002	0,0004	0,00007	0,005	0,04	7,34	70	490	127	370	210	90	435	680
Кахриз ра	0,00008	0,003	0,015	0,006	0,00001	0,004	0,0007	0,004	0,049	7,64	30	270	98	250	8	56	224	350
Алибад ск	0,0001	0,0013	0,01	0,02	0,00004	0,004	0,00001	0,007	0,098	7,52	50	340	142	290	160	73	313	490
Чогаруши ск	0,00001	0,0013	0,07	0,005	0,0005	0,002	0,006	0,008	0,1	7,16	70	690	64	210	510	95	494	760
Сарнамак ск	0,0001	0,002	0,19	0,003	0,0003	0,003	0,0006	0,015	0,04	7,18	160	600	65	450	360	16	669	1030
Чангаий ра	0,00009	0,008	0,08	0,04	0,00003	0,001	0,04	0,05	0,09	7,23	80	470	9	380	160	16	468	720
Чамгарг ск	0,0001	0,0008	0,08	0,04	3E-06	0,001	0,00005	0,05	0,09	7,18	160	600	65	450	360	16	669	1030
Чаркал ск	0,00008	0,002	0,1	0,001	0,001	0,003	0,00001	0,008	0,05	7,47	285	810	193	260	440	600	838	1270
Доре ра	0,00005	0,001	0,08	0,006	0,0008	0,002	0,00007	0,009	0,15	7,02	30	610	57	350	240	96	441	690
Гуше ра	0,00008	0,0007	0,07	0,04	0,00001	0,001	0,004	0,004	0,09	7,66	10	290	90	350	40	1	236	370
Гердабсанги ра	0,0002	0,001	0,1	0,002	0,00007	0,004	0,0001	0,0008	0,09	7,38	40	350	14	390	10	4	288	450
Кив ра	0,00002	0,001	0,1	0,002	0,00005	0,003	0,001	0,0007	0,098	7,56	20	380	1	290	8	2	294	4650
Чешметала ра	0,00002	0,002	0,2	0,04	0,00001	0,003	0,004	0,003	0,053	8,16	60	450	9	350	150	9	345	540
Сарабгорчи ра	0,0002	0,003	0,08	0,05	0,00001	0,0035	0,005	0,005	0,09	7,41	60	400	157	280	220	108	364	570
Дарбанд ск	0,002	0,001	0,06	0,007	0,0001	0,002	0,0008	0,0006	0,004	7,54	70	370	106	320	170	63	342	523
Балилванд ск	0,004	0,004	0,015	0,003	0,00005	0,0004	0,093	0,006	0,05	7,4	60	530	143	360	250	108	409	640

Хоррамабадский бассейн

По результатам кластерного анализа второй матрицы построена диаграмма расстояний объединения по шагам (рис. 5.1), и дендрограмма (рис. 5.2).

На рис. 5.1 видно, что объединение всех химических анализов грунтовых вод произошло за 32 шага. Минимальное расстояние объединения (евклидовое расстояние) на первом шаге равно 0,000 и максимальное – 4275,257 на

последнем тридцать втором шаге. Основное количество анализов (28) объединилось между собою на расстояниях от 0,000 до 495,264. Это, по нашему мнению, свидетельствует об однородности химического состава грунтовых вод, отобранных в Хоррамабадской впадине.

На дендрограмме (рис. 5.2) видно, что в результате кластерного анализа все химические анализы грунтовых вод из скважин и родников, расположенных на различных участках Хоррамабадского бассейна, разбиты на **шесть кластеров** (групп), которые в свою очередь распадаются на более мелкие подгруппы.



Рис. 5.1. Диаграмма расстояний объединения по шагам (Хоррамабадский бассейн)

Первый кластер состоит из 2-х подкластеров (подгрупп) и объединяет грунтовые воды гидрокарбонатного кальциевого состава.

В *первом подкластере* объединены анализы химического состава грунтовых вод, отобранных из 4 скважин (Рашид-Дарани, Насерванд, Алиабад, Дарбанд,) и 1 родника (Сарабгорчи), отобранных на разных участках Хоррамабадского бассейна грунтовых вод. Объединение этих анализов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,000 до 129,373).

Во *2-й подкластер* объединены на евклидовом расстоянии 102,36 анализы химического состава грунтовых вод, отобранных из двух родников Самше черагали и Чешметала. Эти родники выходят из карста.

Объединение этих двух подкластеров в первый кластер произошло на евклидовом расстоянии 239,403. Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических анализов грунтовых вод Хоррамабадского бассейна в первом кластере, свидетельствует об их большой близости.

Все скважины первого подкластера расположены в юго-западной части Хоррамабадского бассейна. И только один родник Сашме черагали находится в северной части впадины.

Таким образом, нами выделено два участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся к первому кластеру (рис. 5.3).

Второй кластер состоит из двух подкластеров (подгрупп) и объединяет грунтовые воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава (рис. 5.2).

В *первый подкластер* входят химические составы проб грунтовых вод из родников Борджалы, Кахриз и Гуше, которые объединились между собой на малом евклидовом расстоянии 250,265. Эти родники расположены в западной части впадины.

Во *второй подкластер* входят пробы грунтовых вод из родников Чешмебид, Гале джогд, Гардабсанги, Навакеш, Чешме сорхе и скважины Сабур на малом евклидовом расстоянии 241,712.

Объединение этих двух подкластеров во второй кластер произошло на евклидовом расстоянии 297,548. Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических анализов грунтовых вод Хоррамабадского бассейна во втором кластере, свидетельствует об их большой близости.

Родники Чешмебид, Гале джогд и Гардабсанги на участке, который находятся в северной части впадины, родники Борджалы, Навакеш и Кихриз – на участке в западной части впадины, а родники Чешме сорхе, Гардабсанги и скважина Сабур, расположены на участке в южной части впадины. Таким

образом, нами выделено три участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся ко второму кластеру (рис. 5.3).

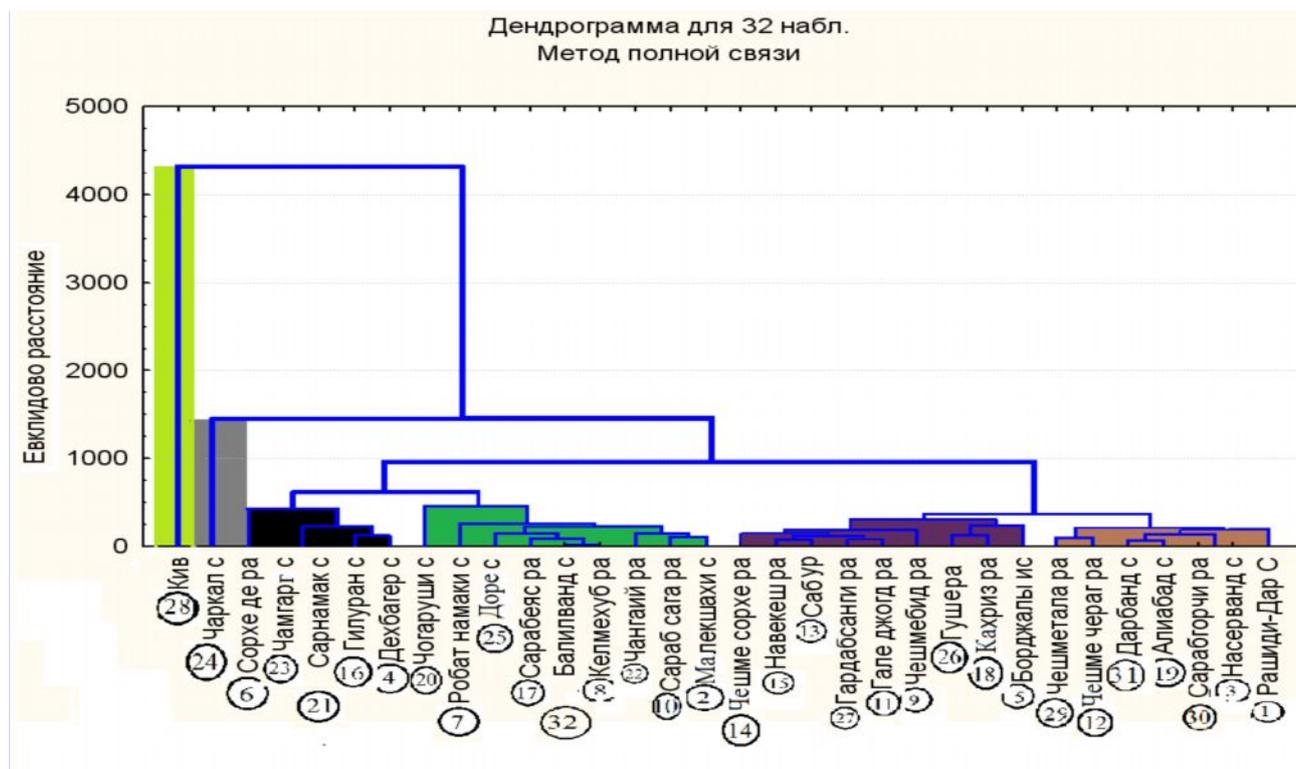


Рис. 5.2. Дендрограмма объединения 32 анализов химического состава грунтовых вод Хоррамабадского бассейна (18 химических элементов и соединений)

Третий кластер состоит из четырех подкластеров и объединяет грунтовые воды сульфатно-хлоридного кальциево-магниевого состава (рис. 5.2).

В *первом подкластере* произошло объединение химических составов проб грунтовых вод из двух родников Сараб саха, Чангаий и скважины Малекшахи, которые объединились между собой на малом евклидовом расстоянии 131,431.

Во *втором подкластере* объединились химические составы проб грунтовых вод из трех родников Келмехуб, Сарабеяс, Доре и скважины Балилванд на близком евклидовом расстоянии 134,131.

Эти два подкластера объединились между собой на евклидовом расстоянии 246,655. К ним на евклидовом расстоянии 250,065 примыкает химический состав пробы воды из скважины Робат намаки (*третий*

подкластер). К этим пробам на евклидовом расстоянии 489,785 примыкает химический состав проб воды из скважины Чогаруши (четвертый подкластер).

Все родники и скважины третьего кластера расположены на участке в центре Хоррамабадского бассейна и только родник Доре находится на востоке этой впадины. Таким образом, нами выделено два участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся к третьему кластеру (рис. 5.3).

Четвертый кластер объединяет грунтовые воды хлоридного натриевого состава и состоит из химических анализов проб грунтовых вод из 3-х скважин (Дехбагер, Гилуран, Сарнамак) и родников Чамгарх и Сорхе де. Химические анализы проб из скважин объединились на евклидовом расстоянии от 0,0 до 248,91. К ним на евклидовом расстоянии 416,72 присоединился химический анализ пробы воды из родника.

Четвертый кластер объединяется с третьим на евклидовом расстоянии 602,851, которые в свою очередь объединяются с первым и вторым кластерами на евклидовом расстоянии 989,218.

Скважина Дехбагер и родник и Сорхе де этого кластера расположены на участке в южной части впадины, а скв. Сарнамак – на участке, который находится в северо-западной части, родник Чамгарх находится на юго-восточном участке, а скв. Гилуран – в центральной части Хоррамабадской впадины и окружена скважинами третьего кластера.

Таким образом, нами выделено четыре участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся к четвертому кластеру (рис. 5.3).

Анализуя химический состав грунтовых вод выделенных участков установлено что: на участках, которые относятся к первому кластеру, грунтовые воды имеют гидрокарбонатный кальциевый состав; на участках, которые относятся ко второму кластеру, – гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав; на участках, которые относятся к третьему кластеру, – сульфатно-хлоридный кальциево-магниевый состав; на участках, которые относятся к четвертому кластеру, – хлоридный натриевый состав.

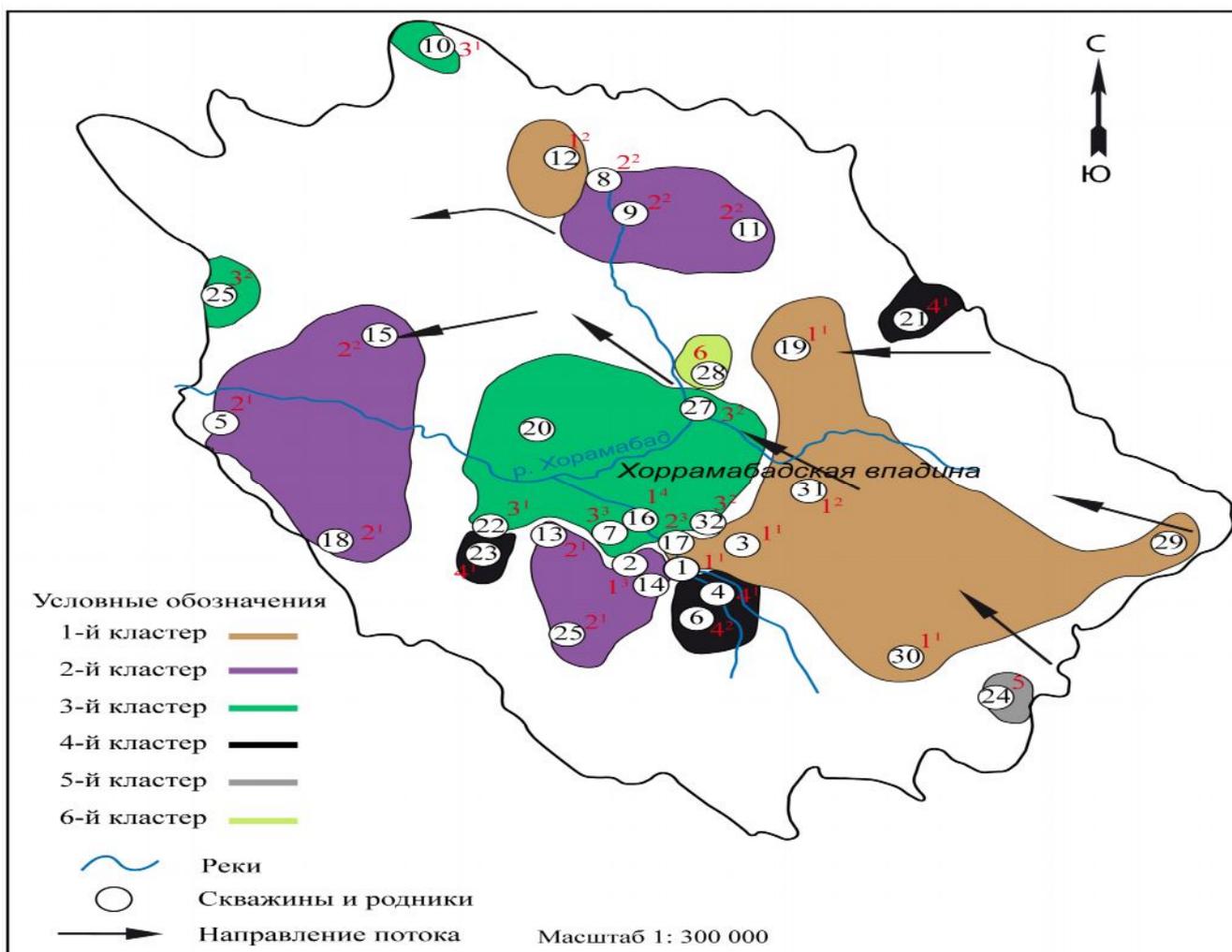


Рис. 5.3. Гидрогеологическая карта Хоррамабадского бассейна с выделенными участками грунтовых вод с близким химическим составом

Эти результаты не противоречат региональным закономерностям формирования химического состава грунтовых вод межгорных бассейнов [22, 44, 79].

К **пятому кластеру** относится химический состав проб воды из скв. Чаркал, который на евклидовом большом расстоянии (1386,12) объединяется с первыми четырьмя кластерами. Эта скв. находится на участке в юго-западной части Хоррамабадской впадины.

К **шестому кластеру** относится химический состав пробы воды из родника Кив, который на очень большом евклидовом расстоянии (4079,0) объединяется с остальными кластерами. Этот родник расположен в центральной части впадины. Это свидетельствует о том, что химический состав вод этого родника резко отличается от остальных химических анализов и имеет совсем другую природу.

Ширазский бассейн

По результатам кластерного анализа первой матрицы построена диаграмма расстояний объединения по шагам (рис. 5.4), и дендрограмма (рис. 5.5).

На рис. 5.4 видно, что объединение всех химических составов грунтовых вод произошло за 29 шагов. Минимальное расстояние объединения (евклидовое расстояние) на первом шаге равно 0,000 и максимальное – 4750,28 на последнем двадцать девятом шаге. Основное количество химических анализов (21) объединилось между собою на расстояниях от 0,000 до 375,012. Это, по нашему мнению, свидетельствует об однородности химического состава грунтовых вод, отобранных в Ширазской впадине.

На дендрограмме (рис. 5.5) видно, что в результате кластерного анализа все химические анализы грунтовых вод из скважин и родников, расположенных на различных участках Ширазского бассейна, разбиты на **пять кластеров** (групп), которые в свою очередь распадаются на более мелкие подгруппы.

Первый кластер состоит из 2-х подкластеров (подгрупп) и объединяет грунтовые воды гидрокарбонатного кальциевого состава.

В *первом подкластере* объединены анализы химического состава грунтовых вод, отобранных из 3 скважин (Пирона, Пирмохамад, Шамс), отобранных на разных участках Ширазского бассейна. Объединение этих анализов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 180,185 до 187,453).



Рис. 5.4. Диаграмма расстояний объединения по шагам (Ширазский бассейн)

Во 2-й подкластер объединены анализы химического состава грунтовых вод, отобранных из 5 скважин (Хатунак, Мониабад, Хабур, Мансурабад, Мохамед). Объединение этих анализов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,0 до 184,673).

Объединение этих двух подкластеров в первый кластер произошло на евклидовом расстоянии 370,043. Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических анализов грунтовых вод Ширазского бассейна в первом кластере, свидетельствует об их большой близости.

Все скважины первого подкластера расположены в Карабахской впадине.

Три скважины второго подкластера расположены у подножья горы Дара и одна скважина (Мохамед) находится в долине р. Хошкруд, протекающей в Ширазской впадине.

Таким образом, нами выделено три участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся к первому кластеру (рис. 5.5).

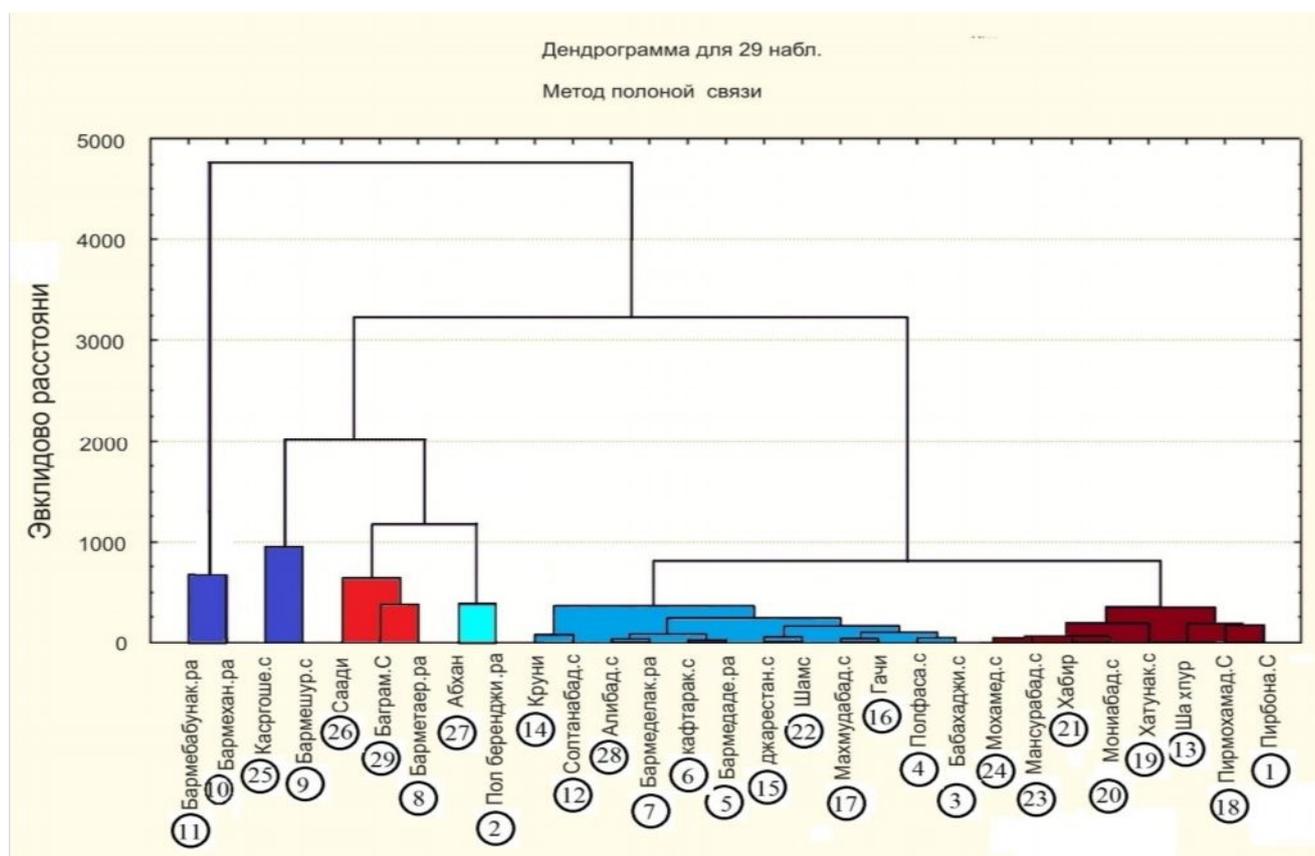


Рис. 5.5. Дендрограмма объединения 29 анализов химического состава грунтовых вод Ширазского бассейна (18 химических элементов и соединений)

Во *втором кластере* объединены химические составы проб грунтовых вод, отобранных из 10-и скважин и 2-х родников на разных участках Ширазского бассейна.

Второй кластер состоит из трех подкластеров (подгрупп) и объединяет грунтовые воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава (рис. 5.5).

В *первый подкластер* входят пробы грунтовых вод из скважин Бабахаджи, Полфаса, Гачи, Махмудабад, Шамс, Джарестан, Объединение этих химических составов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,000 до 120,717).

Во *второй подкластер* входят пробы грунтовых вод из скважин Кафтарақ, Алибад, и родники Бармедаде и Бармеделак. Объединение этих химических составов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,000 до 50,01).

В *третий подкластер* входят пробы грунтовых вод из скважин Солтанабад, Круни. Объединение этих химических составов произошло также на очень малом евклидовом расстоянии (68,77).

Грунтовые воды, относящиеся ко второму кластеру, располагаются на двух участках с одинаковым химическим составом грунтовых вод. Первый участок находится в долине р. Бабахаджи у подножья гор Султанабад, а второй участок выделяется у подножья гор Кафтарак в долине р. Хошкруд.

Таким образом, нами выделено два участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся ко второму кластеру (рис. 5.6).

Третий кластер состоит из двух подкластеров и объединяет грунтовые воды сульфатно-хлоридного кальциево-магниевого состава.

В *первом подкластере* произошло объединение химических составов грунтовых вод из скважины Абкан и родника Пол беранджина на евклидовом расстоянии 402,541.

Во *второй подкластер* входят пробы грунтовых вод из родника Бартметаер и скважин Абхан и Саади, которые объединились на евклидовом расстоянии 754,064.

Первый и второй подкластеры объединяются между собой на евклидовом расстоянии 1206, 754.

Грунтовые воды, относящиеся к третьему кластеру, располагаются на трех участках с одинаковым химическим составом грунтовых вод. Первый участок находится в долине р. Бабахаджи у подножья гор Султанабад, второй участок выделяется у подножья горного массива Загрос в долине реки Рахдар, на третьем участке у подножья горы Саади располагается одна скважина Саади.

Четвертый кластер объединяет грунтовые воды хлоридного натриевого состава и состоит из химических анализов грунтовых вод скважин Бармешур и Карсгоше, которые объединяются на евклидовом расстоянии 954,08 (рис. 5.6). Скважина Бармешур находится в долине р. Полфаса недалеко от озера

Махарлу, а скв. Касргоше находится на севере Ширазского бассейна между горами Саади и Дарак.

Третий и четвертый кластеры объединяются между собою в один кластер на евклидовом расстоянии 2005,087, который объединяется с первыми двумя на расстоянии 3236,512. Это свидетельствует о том, что химические составы грунтовых вод входящие в эти кластеры сильно отличаются от химического состава грунтовых вод первых кластеров.

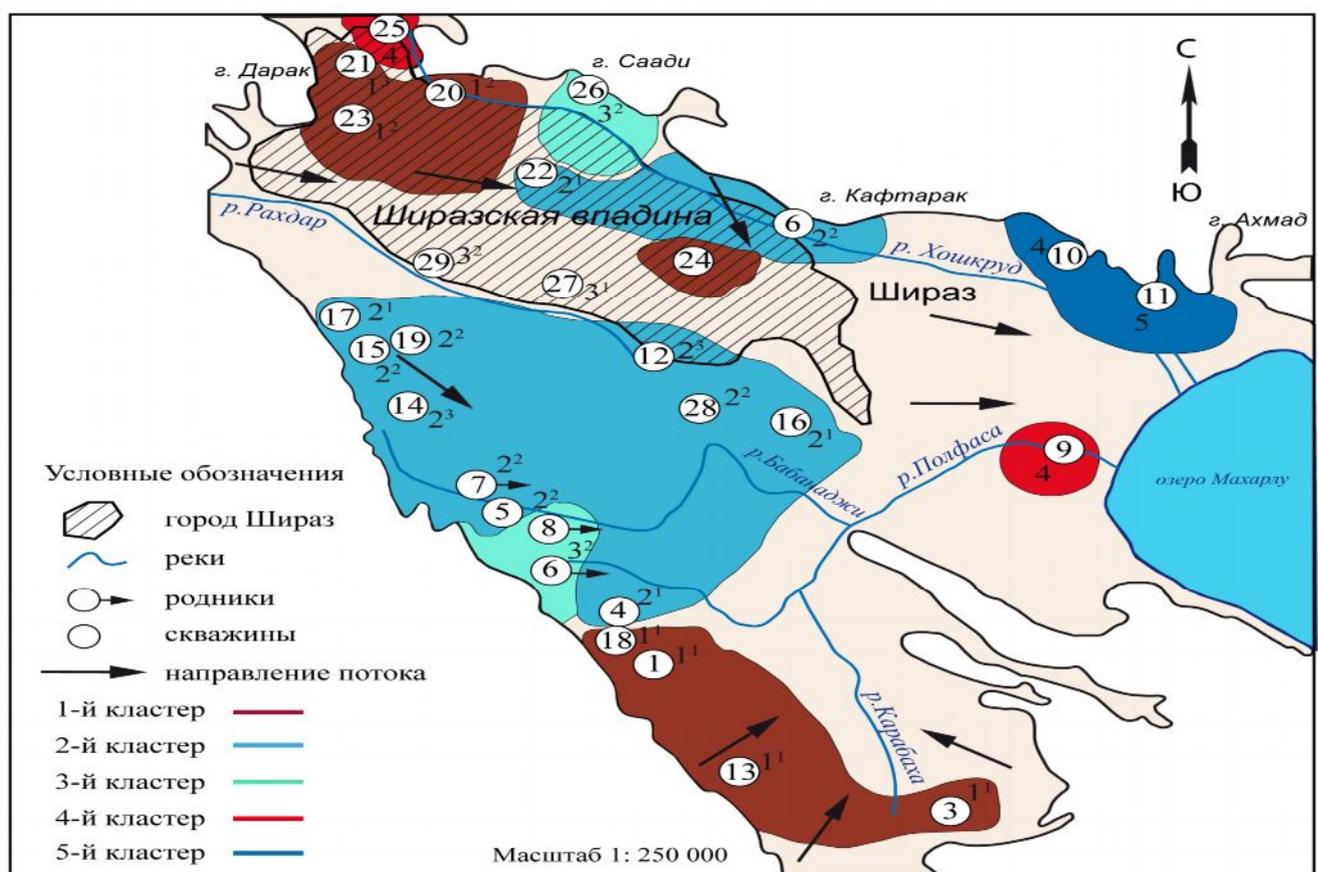


Рис. 5.6. Гидрогеологическая карта Ширазского бассейна с выделенными участками грунтовых вод с близким химическим составом

Анализируя химический состав грунтовых вод выделенных участков установлено что: на участках, которые относятся к первому кластеру и расположены в северной и южной частях бассейна, грунтовые воды имеют гидрокарбонатный кальциевый состав; на участках, которые относятся ко второму кластеру и расположены южной и центральных частях, – гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав; на участках, которые

относятся к третьему кластеру и расположены в центральной и северной частях, – сульфатно-хлоридный кальциево-магниевый состав; на участках, которые относятся к четвертому кластеру и расположены западной части, – хлоридный натриевый состав. Эти результаты не противоречат региональным закономерностям формирования химического состава грунтовых вод межгорных бассейнов [22, 44, 79].

К пятому кластеру относятся химические составы проб двух родников Бармехан и Бармебабунак (рис. 5.6), которые находятся у подножья гор Кафтарак и Ахмад. Пятый кластер примыкает к остальным кластерам на очень большом расстоянии 4753, 095. По нашему мнению воды этих двух родников имеют совсем иную природу.

Выводы

- Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических составов грунтовых вод первого и второго кластеров, свидетельствует об их большой близости как в Хоррамабадском, так и Ширазском бассейнах.

- Пробы грунтовых вод третьего кластера по химическому составу немного отличаются от проб первого и второго кластеров. Они объединяются между собой на немного большем евклидовом расстоянии, чем расстояние, на которых происходит объединение химических анализов первого и второго кластеров.

- Химический состав грунтовых вод четвертого кластера довольно сильно отличается от химического состава вод, входящих в первые три кластера.

- Пятый кластер Ширазского и шестой кластер Хоррамабадского бассейнов состоят из трех разнородных подкластеров, химический состав грунтовых вод которых резко отличается друг от друга и от химического состава вод, входящих в первые четыре кластера. Эти грунтовые воды сильно загрязнены и находятся в зоне разгрузки, где минерализация заметно повышается, что связано с тем, что связано с током вод из соляных диапиров,

влиянием соленого озера Махарлу, континентальным засолением и антропогенным загрязнением (удобрения, отходы химического производства и отливы из шахт)..

Из приведенного выше анализа можно сделать выводы, что кластерный анализ позволяет:

- определить сходство и различие химического состава проб воды, отобранных из грунтовых водоносных горизонтов в разных Хоррамабадского и Ширазского бассейнов;

- сравнить между собой химический состав грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов и выделять участки с подобным химическим составом грунтовых вод и очерчивать их;

- по нашему мнению при регулярном размещены пунктов отбора проб подземных вод (например, при гидрогеохимической съемке) этим методом можно пользоваться для районирования грунтовых вод по химическому составу.

- в Ширазском бассейне нами выделено три участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся к первому кластеру, два участка – ко второму кластеру, три – к третьему, два – четвертому и один – к пятому кластеру;

- в Хоррамабадском бассейне нами выделено два участка грунтовых вод очень близкого химического состава, относящихся к первому кластеру, три – ко второму, два – к третьему четыре к четвертому и по одному к пятому и шестому кластерам;

- по нашему мнению при регулярном распределении пунктов опробования (например, при гидрогеологических съемках) этим методом можно пользоваться для районирования грунтовых вод по химическому составу.

5.1.3. Сравнительная характеристика химического состава грунтовых вод Ширазского и Хоррамабадского бассейнов

В настоящее время для сравнения химических составов подземных вод разных районов, водоносных горизонтов и водозаборов все чаще применяются методы многомерного статистического анализа.

Эти методы являются одними из самых эффективных средств выявления закономерностей, скрытых в больших массивах данных, поскольку в гидрогеологии, как правило, отсутствует возможность непосредственного их наблюдения и измерения. О них можно судить лишь по конечным результатам проявления процессов, отражающихся в значениях различных характеристик, например в химическом составе вод.

Для определения близости химического состава подземных вод разных районов и водоносных горизонтов в настоящее время используются различные аналитические методы и математическое моделирование.

Химический состав подземных вод является конечным продуктом воздействия не одного, а целой совокупности природных и техногенных процессов (условий питания и разгрузки, ионного обмена, антропогенного загрязнения и т.д.). Влияние этих процессов в подземных водах сказывается на взаимосвязанном изменении содержания химических компонентов и на характере связей между ними. Однако, эти связи в наблюдаемых компонентах подземных вод в «чистом виде» не сохраняются. Корреляционные зависимости между наблюдаемыми значениями переменных фактически являются конечным результатом действия всей совокупности процессов.

В условиях ненарушенного стока любой водоносный горизонт представляет собой сбалансированную систему. В процессе его эксплуатации баланс воды водоносного горизонта существенно изменяется, при этом должна произойти компенсация отбора подземных вод за счет увеличения интенсивности питания. Дополнительное питание возможно за счет перетекания подземных вод из ниже- и вышележающих водоносных горизонтов и привлечения поверхностных вод.

Привлекаемые воды имеют некоторые различия в химическом составе. При фильтрации привлеченных вод вследствие контакта с породой и их смешения происходит изменение химического состава. Эти изменения направлены на сближение их химического состава с химическим составом вод водоносного горизонта. Очевидно, что химический состав подземных вод в каждой скважине является результатом смешения в той или иной пропорции пластовой воды с привлекаемыми водами.

Для выяснения степени близости химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов мы предлагаем также применять кластерный анализ.

Для реализации этой методики использованы данные химических анализов грунтовых вод из 36 скважины и 25 родников, расположенных в Хоррамабадском и Ширазском бассейнах.

Определения химического состава грунтовых вод выполнены в одной аккредитованной лаборатории в Тегеране на один тот же момент времени (июль).

Для расчетов принимались такие показатели химического состава грунтовых вод: Ca, Mg, Na, HCO₃, SO₄, Cl, pH, Eh, минерализация, Cd, Co, Ba, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn и Fe (мг/дм³). Таким образом, каждый из 61 химических анализов грунтовых вод интерпретируется как точка в 18-тимерном пространстве.

Химический состав грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейна приведен в табл. 5.1.

По результатам кластерного анализа общей матрицы построена диаграмма расстояний объединения по шагам (рис. 5.7), и дендрограмма (рис. 5.8). На рис. 4.7 видно, что объединение всех объектов произошло за 61 шаг. Минимальное расстояние объединения (евклидовое расстояние) на первом шаге равно 0,000 и максимальное – 4915,628 на последнем шестидесятом шаге. Основное количество объектов (48) объединилось между собою на расстояниях

от 0,000 до 770,812. Это, по нашему мнению, свидетельствует об однородности химического состава грунтовых вод, отобранных в Ширазского и Хоррамабадского бассейнов.

На дендрограмме (рис. 5.7) видно, что в результате кластерного анализа все анализы химического состава грунтовых вод из скважин и родников, расположенных на различных участках Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадин, разбиты на четыре кластера (группы), которые в свою очередь распадаются на более мелкие подгруппы.

Первый кластер состоит из 2-х больших подкластеров (подгрупп).

В *первом подкластере* объединены анализы химического состава грунтовых вод, отобранных из 8 скважин (Пирона, Пирмохамад, Шамс, Хатунак, Мониабад, Хабур, Мансурабад, Мохамед) на разных участках Ширазского бассейна. Объединение этих объектов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 3,380 до 30,453).



Рис. 5.7. Диаграмма расстояний объединения по шагам

Во *2-й подкластер* объединены анализы химического состава грунтовых вод, отобранных из 5 скважин (Рашид-Дарани, Насерванд, Алиабад, Дарбанд, Сабур) и 11 родников (Сарабгорчи, Самше чераг, Чешметала, Борджалы, Кихриз, Гуше, Чешмебид, Гале джогд, Гардабсанги, Навакеш, Чешме сорхе) на

разных участках Хоррамабадского бассейна. Объединение этих объектов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,000 до 310,671).

Объединение этих двух подкластеров в первый кластер произошло на евклидовом расстоянии 547,282. В этот кластер объединяются грунтовые воды Хоррамабадского и Ширазского бассейнов гидрокарбонатного кальциевого состава.

Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических анализов грунтовых вод Ширазском и Хоррамабадском бассейнах в первом кластере, свидетельствует об их большой схожести.

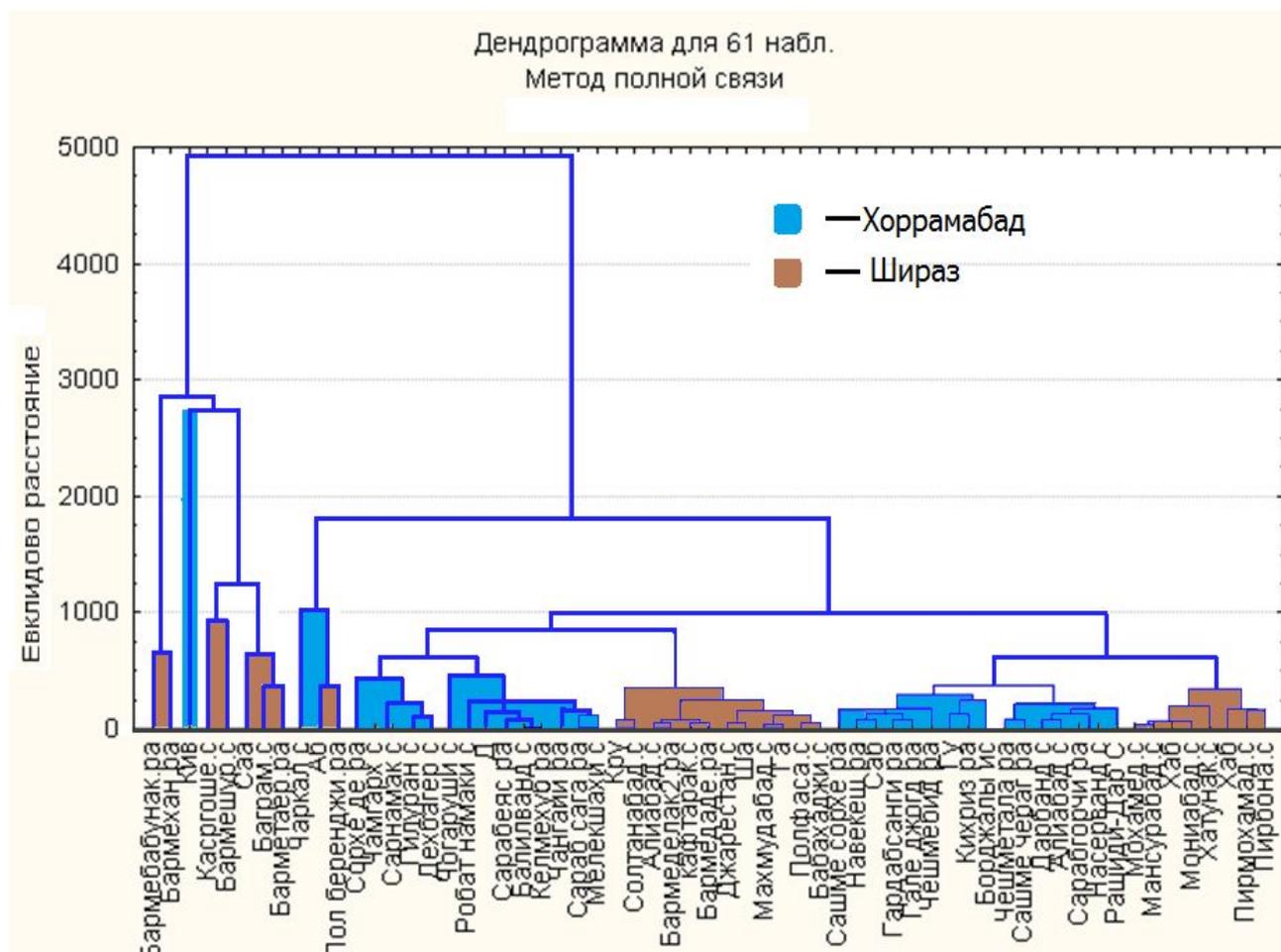


Рис. 5.8. Дендрограмма объединения 61 объектов (18 параметров)

Во *втором кластере* объединены химические составы проб грунтовых вод, отобранных из 10-и скважин и 2-х родников на разных участках Ширазского бассейна и из 8-и скважин и 6-и родников Хоррамабадского бассейна.

Второй кластер состоит из двух подкластеров (подгрупп).

В *первый подкластер* входят пробы грунтовых вод Ширазского бассейна. Это скважины Бабахаджи, Полфаса, Гачи, Махмудабад, Шамс, Джарестан, Кафтарак, Алиабад, Солтанабад, Круни и родники Бармедаде и Бармеделак.

Объединение этих объектов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,000 до 360,717).

Во *второй подкластер* объединились химические составы проб грунтовых вод из скважин Мелекшахи, Балилванд, Робат намаки, Чогаруши, Дехбагер, Гидуран, Сарнамак, Чамгарх и родников Сараб саха, Чангаий, Келмехуб, Сарабеяс, Доре и Хорхе де Хоррамабадского бассейна.

Объединение этих объектов произошло на очень малых евклидовых расстояниях (от 0,000 до 536,157). В этот кластер объединяются грунтовые воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.

Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических анализов грунтовых вод Ширазского и Хоррамабадского бассейнов во втором кластере, свидетельствует об их большой схожести. Объединение этих двух подкластеров во второй кластер произошло на евклидовом расстоянии 754,122, что не на много больше, чем в первом кластере. Это свидетельствует о том, что пробы грунтовых вод по химическому составу немного отличаются от проб первого кластера.

Третий кластер состоит из двух подкластеров. В первом подкластере произошло объединение химических составов грунтовых вод из скважины Абкан и родника Пол беранджина Ширазского бассейна на евклидовом расстоянии 402,541. К ним на расстоянии 1015,489 присоединилась проба воды из скважины Чаркал Хоррамабадского бассейна.

В третий кластер объединяются грунтовые воды сульфатно-хлоридного кальциево-магниевого состава Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.

На евклидовом расстоянии 1835,296 третий кластер объединяется с общим первым и вторым кластером. Химический состав грунтовых вод третьего кластера довольно сильно отличается от химического состава вод, входящих в первые два кластера.

Четвертый кластер состоит из трех разнородных подкластеров. В *первый подкластер* входят пробы грунтовых вод из родника Бартметаер и скважин Абхан и Саади Ширазского бассейна, которые объединились на евклидовом расстоянии 754,064. К ним на евклидовом расстоянии 967,641 присоединяются скважины Бармешур и Карсгоше Ширазского бассейна.

Второй подкластер состоит из химического состава пробы, отобранной из родника Кив в Хоррамабадском бассейне, который на большом евклидовом расстоянии (2739,312) объединяется с первым подкластером.

Третий подкластер включает в себя химический состав проб грунтовых вод, отобранных из родников Бармехан и Бармебабунак Ширазского бассейна, который на большом евклидовом расстоянии (2869,122) объединяется с первыми двумя подкластерами.

В четвертый кластер объединяются грунтовые воды хлоридного натриевого состава Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.

Анализируя четвертый кластер, можно сделать вывод о том, что химический состав грунтовых вод резко отличается друг от друга и от химического состава вод, входящих в первые три кластера.

Выводы

- Анализ евклидовых расстояний, на которых произошло объединение химических составов грунтовых вод первого и второго кластеров, свидетельствует об их большой схожести.
- Пробы грунтовых вод второго кластера по химическому составу немного отличаются от проб первого кластера. Они объединяются между собой на немного большем евклидовом расстоянии, чем расстояние, на которых происходит объединение объектов в первом кластере.

- Химический состав грунтовых вод третьего кластера довольно сильно отличается от химического состава вод, входящих в первые два кластера.

- Четвертый кластер состоит из трех разнородных подкластеров, химический состав грунтовых вод резко отличается друг от друга и от химического состава вод, входящих в первые три кластера. Эти грунтовые воды сильно загрязнены и находятся в зоне разгрузки, где минерализация заметно повышается, что связано с континентальным засолением и антропогенным загрязнением (удобрения, отходы химического производства и отливы из шахт).

Из приведенного выше анализа можно сделать выводы, что кластерный анализ позволяет:

- определять сходство и различия химического состава грунтовых вод;
- выделять участки со сходным и различным химическим составом грунтовых вод и оконтуривать их;
- при обнаружении любого негативного изменения химического состава грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне можно судить об аналогичных изменениях и в Ширазском бассейне вод и наоборот.

5.2. Факторный анализ

Важное место среди методов многомерного анализа занимают факторный и компонентный анализы. Они представляют собой весьма эффективное средство сжатия информации путем перехода от исходных данных к новым переменным – факторам (компонентам). Изучение структуры факторов позволяет проверить имеющиеся и выдвинуть новые гипотезы о причинах, порождающих взаимосвязи между наблюдаемыми переменными и тем самым дать причинно-следственную интерпретацию полученных результатов

Факторный анализ позволяет получить минимальное число новых переменных, являющихся линейными комбинациями исходных, причем эти новые переменные содержат то же количество информации.

Методы факторного анализа делятся на два больших класса – R-модификация и Q-модификация. Первый связан с исследованием соотношений между переменными и основан на выделении собственных значений и собственных векторов из ковариационной или корреляционной матриц, второй – с изучением соотношений между объектами и часто используется для исследования их внутренней структуры для представления в многомерном пространстве.

Метод главных компонент используется как самостоятельный, так и в виде элемента во всех современных схемах факторного анализа. Фундаментальное различие между компонентным и факторным анализами заключается в способе нахождения факторов и предположениях, касающихся природы остатков. В компонентном анализе факторы определяются в соответствии с критерием максимизации их вклада в суммарную дисперсию всех переменных. В собственно факторном анализе факторы находятся по принципу максимизации связей между переменными. Можно сказать, что компонентный анализ состоит в исследовании дисперсий, а собственно факторный анализ — в изучении корреляций между переменными.

В компонентном анализе предполагается, что остаточные члены ее малы, а в факторном анализе этого предположения не делается. Следовательно, в компонентном анализе считается, что основная часть дисперсии переменной важна для исследования и связана с другими наблюдаемыми переменными. В факторном анализе наоборот, предполагают, что исходным данным присуща значительная доля "специфичности" и используют только ту составляющую переменной, которая коррелируется с другими переменными. В обоих методах считается, что остатки не коррелируют с факторами. Однако в компонентном анализе никаких предположений о корреляции между остатками не делается, в то время как в факторном анализе основываются на том, что они не коррелируют между собой.

5.2.1. Методика факторного анализа

Вопросу применения факторного анализа для исследования химического состава подземных вод посвящены работы Девиса Д. С. [3, 108], Искенрога К. Г. [35], Павличенко Л. М. [42], Решетова И. К., Чомко Д. Ф., Чомко Ф. В. и др. [67, 85, 86, 93, 94], Ashley R. P. [96], Gauss I. [116], Reghunath R. [145]. Литературы по вопросу применения факторного анализа для исследования химического состава грунтовых вод в Иране нет.

Первый шаг в факторном анализе – это преобразование исходной матрицы данных в квадратную, симметричную матрицу, которая выражает либо степень взаимосвязей между переменными (R-модификация), либо то же между объектами, на которых эти значения определены (Q-модификация). Это делается путем умножения слева или справа матрицы данных на транспонированную к ней матрицу. Матрица данных состоит из N строк наблюдений и M столбцов переменных. Умножая слева матрицу данных $[x]$ на транспонированную к ней матрицу $[x]'$, получим квадратную матрицу

R ($R=[x]'*[x]$), имеющую порядок $M \times M$. Элементы матрицы R состоят из суммы квадратов парных произведений M переменных, представленных в исходной матрице:

$$r_{ik} = \sum_{i=1}^n x_{ij} x_{ik} \quad k, j = 1 \dots m, \quad (5.27)$$

где j и K — номера столбцов матрицы данных.

Если данные стандартизованы, т.е. каждая переменная имеет нулевое среднее и стандартное отклонение, равное 1, то матрица R будет корреляционной матрицей M переменных.

Умножение матрицы данных $[x]$ справа на транспонированную к ней матрицу $[x]'$ приводит к квадратной матрице Q ($Q = [x] * [x]'$) порядка $N \times N$.

Если матрица данных $[x]$ содержит необработанные наблюдения, то матрица Q включает квадраты и парные произведения всех пар объектов, просуммированные по переменным.

В большинстве исследований используется больше объектов, чем переменных, так что матрица Q будет большего порядка, чем матрица R , несмотря на то, что они построены по одной исходной матрице данных $[x]$.

Применение факторного анализа в инженерной геологии основано на нахождении собственных значений и собственных векторов либо для матрицы R , либо для матрицы Q . Очевидно, что имеется тесная связь между ними, так как обе матрицы порождены одним и тем же набором данных.

Анализ начинается с вычисления корреляции между данным числом N измеренных переменных. Матрица коэффициентов корреляции обрабатывается по методу главных компонент (R-модификации) факторного анализа. В результате этого получается некоторое число значимых факторов, которыми можно "объяснить" всю изменчивость выборки в терминах новых переменных или факторов. Факторные нагрузки выражают "состав" факторов через исходные переменные. Поскольку эти факторы трудно интерпретировать, то для усиления роли переменных, вносящих существенный вклад в фактор, и уменьшения роли переменных с незначимым вкладом принято использовать вращение полученных на первом этапе осей (используется метод варимакс).

Каждое из чисел, расположенных в фиксированном столбце матрицы факторных нагрузок означает вклад определенной переменной в состав данного фактора. То есть фактически можно считать, что каждый столбец представляет собой факторное уравнение, в котором нагрузки являются коэффициентами при соответствующих исходных переменных.

Алгоритм вычислений состоит из следующих этапов [35]:

А. Исходная матрица данных X нормализуется, т.е. приводится к стандартному виду по формуле:

$$X_k^s = \frac{x_{ki} - \bar{x}_k}{\sigma_k}, \quad (5.28)$$

где: X_{ki} – значение k -го признака i -й строки; \bar{x}_k – среднее значение k -го признака; σ_k – среднеквадратическое отклонение k -го признака; k – номер столбца; i – номер строки матрицы данных.

Б. На основе нормализованной матрицы X^s вычисляется корреляционная матрица R путем умножения ее слева на транспонированную к ней матрицу.

В. Находят собственные векторы (Z) матрицы R , которые являются не чем иным, как главными компонентами:

$$Z_j = \sum_{i=1}^p A_{ji} X_{ji}^s \quad j=1\dots P, \quad (5.29)$$

где P — количество главных компонент (равно количеству параметров в исходной матрице); A_{ji} — вес j -й компоненты в i -й переменной (или наоборот).

Г. Из собственных векторов конструируется ортогональная матрица, связывающая признаки и факторы. Факторные нагрузки являются коэффициентами корреляции между признаками и факторами.

Д. Факторы ранжируют по убыванию дисперсии. Полученная матрица факторных нагрузок и является основой для инженерно-геологической интерпретации.

Е. Для оценки степени проявления различных факторов на разных участках пространства рассчитывается матрица значений факторов в точках наблюдения (скважинах):

$$F_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M f_{jk} \cdot X_{ik}^s}{\lambda_j}, \quad (5.30)$$

где: F_{ij} – значение j -го фактора в i -й точке; f_{jk} – факторная нагрузка j -го фактора на k -ю переменную; X_{ik}^s – значение k -й переменной в i -й точке;

l_j – вектор собственных значений корреляционной матрицы, или сумма квадратов факторных нагрузок j -го фактора; M – количество переменных.

5.2.2. Применение факторного анализа при исследовании химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов

Для установления, какие процессы и факторы действительно являются определяющими в формировании химического состава и загрязнении грунтовых вод в этих впадинах, мы применили метод факторный анализ.

Химический состав подземных вод является конечным результатом воздействия не одного, а целой совокупности природных и техногенных процессов (условий питания и разгрузки, ионного обмена, антропогенного загрязнения и т.д.). Влияние этих процессов на подземные воды, так или иначе, сказывается на взаимосвязанном изменении содержания компонентов и на характере связей между ними. Однако, эти связи в наблюдаемых компонентах подземных вод в «чистом виде» не сохраняются. Корреляционные зависимости между наблюдаемыми значениями переменных фактически являются конечным результатом действия всей совокупности процессов. Поэтому, чтобы установить, какие процессы действительно являются определяющими в формировании химического состава и загрязнении подземных вод, мы и применили методы многомерного статистического анализа.

Статистические методы являются одними из самых эффективных средств выявления закономерностей, скрытых в массивах данных, поскольку в гидрогеологии, как правило, отсутствует возможность непосредственного наблюдения и измерения процессов-факторов. О них можно судить лишь по конечным результатам проявления процессов, отражающихся в значениях различных характеристик [3, 35, 42, 84, 85].

Важное место среди методов многомерного анализа занимают факторный и компонентный анализы. Они представляют собой весьма эффективное средство сжатия информации путем перехода от исходных данных к новым

переменным – факторам (компонентам). Изучение структуры факторов позволяет проверить имеющиеся и выдвинуть новые гипотезы о причинах, порождающих взаимосвязи между наблюдаемыми переменными и тем самым дать причинно-следственную интерпретацию полученных результатов [35].

Метод главных компонент используется как самостоятельный, так и в виде элемента во всех современных схемах факторного анализа. Фундаментальное различие между компонентным и факторным анализом заключается в способе нахождения факторов и предположениях, касающихся природы остатков. В компонентном анализе факторы определяются в соответствии с критерием максимизации их вклада в суммарную дисперсию всех переменных. В собственно факторном анализе факторы находятся по принципу максимизации связей между переменными. Можно сказать, что компонентный анализ состоит в исследовании дисперсий, а собственно факторный анализ – корреляций между переменными. В компонентном анализе предполагается, что остаточные члены ее малы, а в факторном анализе этого предположения не делается. Следовательно, в компонентном анализе считается, что основная часть дисперсии переменной важна для исследования и связана с другими наблюдаемыми переменными. В факторном анализе наоборот, предполагают, что исходным данным присуща значительная доля "специфичности" и используют только ту составляющую переменной, которая коррелируется с другими переменными. В обоих методах предполагается, что остатки не коррелируют с факторами. Однако в компонентном анализе никаких предположений о корреляции между остатками не делается, в то время как в факторном анализе предполагается, что они не коррелируют между собой.

Факторный анализ позволяет получить минимальное число новых переменных, являющихся линейными комбинациями исходных, причем эти новые переменные содержат то же количество информации.

Методы факторного анализа делятся на два больших класса – R-модификация и Q-модификация. Первый связан с исследованием соотношений

между переменными и основан на выделении собственных значений и собственных векторов из ковариационной или корреляционной матриц, второй – с исследованием соотношений между объектами и часто используется для исследования их внутренней структуры для представления в многомерном пространстве.

Первый шаг в обеих модификациях факторного анализа – это преобразование исходной матрицы данных в квадратную, симметричную матрицу, которая выражает либо степень взаимосвязей между переменными (R-модификация), либо то же между объектами, на которых эти значения определены (Q-модификация). Это делается путем умножения слева или справа матрицы данных на транспонированную к ней матрицу. Матрица данных состоит из N строк наблюдений и M столбцов переменных. Умножая слева матрицу данных $[x]$ на транспонированную к ней матрицу $[x]'$, получим квадратную матрицу R ($R=[x]'$ * $[x]$), имеющей порядок $M \times M$. Элементы матрицы R состоят из суммы квадратов парных произведений M переменных,

представленных в исходной матрице, т.е.: $r_{ik} = \sum_{i=1}^n x_{ij} x_{ik}$, $k, j = 1 \dots m$, (5.31)

где j и K – номера столбцов матрицы данных.

Если данные стандартизованы, т.е. каждая переменная имеет нулевое среднее и стандартное отклонение равное 1, то матрица R будет корреляционной матрицей M переменных.

Умножение матрицы данных $[x]$ справа на транспонированную к ней матрицу $[x]'$, приводит к квадратной матрице Q ($Q = [x]$ * $[x]'$) порядка $N \times N$.

Если матрица данных $[x]$ содержит необработанные наблюдения, то матрица Q содержит квадраты и парные произведения всех пар объектов, просуммированные по переменным.

В большинстве исследований используется больше объектов, чем переменных, так что матрица Q будет большего порядка, чем матрица R , несмотря на то, что они построены по одной исходной матрице данных $[x]$.

Применение факторного анализа в гидрогеологии основано на нахождении собственных значений и собственных векторов либо для матрицы R , либо для матрицы Q . Очевидно, что имеется тесная связь между ними, так как обе матрицы порождены одним и тем же набором данных.

Анализ начинается с вычисления корреляции между данным числом N измеренных переменных. Матрица коэффициентов корреляции обрабатывается по методу главных компонент (R - модификации) факторного анализа. В результате этого получается некоторое число значимых факторов, которыми можно "объяснить" всю изменчивость выборки в терминах новых переменных или факторов. Факторные нагрузки выражают "состав" факторов через исходные переменные. Поскольку эти факторы трудно интерпретировать, то для усиления роли переменных, вносящих существенный вклад в фактор, и уменьшения роли переменных с незначимым вкладом, принято использовать вращение полученных на первом этапе осей (используется метод варимакс).

Каждое из чисел, расположенных в фиксированном столбце матрицы факторных нагрузок означает вклад определенной переменной в состав данного фактора; т.е. фактически можно считать, что каждый столбец представляет собой факторное уравнение, в котором нагрузки являются коэффициентами при соответствующих исходных переменных.

Алгоритм вычислений состоит из следующих этапов [35, 42]:

а) исходная матрица данных X нормализуется – приводится к

стандартному виду по формуле:
$$X_k^s = \frac{x_{ki} - \bar{x}_k}{\sigma_k}, \quad \dots (5.32)$$

где x_{ki} – значение k -го признака i -той строки, \bar{x}_k – среднее значение k -го признака, σ_k – среднеквадратическое отклонение k -го признака, k – номер столбца, i – номер строки матрицы данных;

б) на основе нормализованной матрицы X^s вычисляется корреляционная матрица R , путем умножения ее слева на транспонированную к ней матрицу;

в) находят собственные векторы (Z) матрицы R , которые являются не чем иным как главными компонентами;

$$Z_j = \sum_{i=1}^p A_{ji} X_{ji}^s \quad j=1 \dots P, \quad (5.33)$$

где P – количество главных компонент (равно количеству параметров в исходной матрице; A_{ji} – вес j -ой компоненты в i -ой переменной (или наоборот));

г) из собственных векторов конструируется ортогональная матрица, связывающая признаки и факторы. Факторные нагрузки являются коэффициентами корреляции между признаками и факторами;

д) факторы ранжируют по убыванию дисперсии. Полученная матрица факторных нагрузок и является основой для гидрогеологической интерпретации;

е) для оценки степени проявления различных факторов на различных участках пространства (например, для выявления интенсивности протекания различных природных и техногенных процессов в разных частях долин) рассчитывается матрица значений факторов в точках наблюдения (скважинах, родниках):

$$F_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M f_{jk} \times X_{ik}^s}{\lambda_j}, \quad (5.34)$$

где: F_{ij} – значение j -того фактора в i -той точке, f_{jk} – факторная нагрузка j -того фактора на k -тую переменную, X_{ik}^s – значение k -той переменной в i -той точке, λ_j – вектор собственных значений корреляционной матрицы, или сумма квадратов факторных нагрузок j -того фактора, M – количество переменных.

По пакету программ факторного анализа были обработаны данные химического состава грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов.

Для реализации этой методики использованы данные химических анализов грунтовых вод, расположенных в разных местах Хоррамабадского и Ширазского бассейнов (табл. 5.3, 5.4).

Определения химического состава грунтовых вод выполнены в одной аккредитованной лаборатории в Тегеране на один момент времени (июль 2012 г.).

Исходная матрица данных содержит информацию о химическом составе грунтовых вод по 61 скважинам и родникам. Для каждой скважины были определены значения 17 следующих переменных: Ca, Mg, Na, HCO₃, SO₄, Cl, pH, Eh, Cd, Co, Ba, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, Fe и минерализация (мг/дм³). Эти основные компоненты описывают состояние подземных вод. Анализ их совокупности, характера связей между ними должен дать ответ о природе процессов, определяющих формирование и загрязнение подземных вод, составить их прогноз.

Результаты химического состава грунтовых вод, приведенные в таблицах, запишем в виде матриц и проведем факторный анализ.

Исходная матрица содержит химические анализы грунтовых вод из 37 скважин и 24 родников, расположенных в Ширазском и Хоррамабадском бассейнах. Они охарактеризованы 18-ю химическими элементами и соединениями.

Для оценки силы связи между отдельными показателями химического состава грунтовых вод без нами проведен корреляционный анализ. Анализ матрицы парных коэффициентов корреляции показал, что значимые положительные связи установлены для Ca и HCO₃ (0,736), Cu с Fe (0,505) и отрицательные – для Na с Cr (0,539), Ba с Fe (0,591). Корреляция Cl, SO₄, фтора, калия, кадмия и цинка со всеми другими элементами отсутствует.

Более полная информация была получена с помощью метода главных компонент или R-модификация факторного анализа (табл. 5.3, рис. 5.9).

Таблица 5.3

Факторные нагрузки после вращения (R-модификация)

№ п/п	Элементы	Ф а к т о р ы				
		1	2	3	4	5
1	Cd	-0,152464	-0,179923	-0,254280	-0,262346	0,152656
2	Co	0,215674	0,439273	0,244002	0,586797	0,099643
3	Ba	-0,107729	0,633333	0,407664	-0,018868	0,197076
4	Cu	0,606839	0,399788	-0,099645	0,059385	0,039815
5	Mo	0,181376	0,900517	-0,055956	0,033718	-0,007036
6	Ni	-0,087461	0,695690	0,007161	-0,043157	0,039815
7	Pb	-0,147891	0,438509	0,074375	0,372325	-0,007031
8	Zn	-0,057275	-0,011887	-0,108763	-0,849100	-0,147891
9	Fe	0,347570	0,840151	-0,054852	-0,165320	-0,007035
10	pH	0,360133	0,347771	0,037337	-0,680965	-0,179923
11	Cl	0,851826	0,094154	0,192076	-0,062660	-0,188639
12	HCO ₃	0,357849	-0,188634	-0,193964	0,597823	0,244301
13	SO ₄	0,131074	0,039815	0,928334	0,026640	0,362825
14	Ca	0,258270	-0,007035	0,923378	0,068206	0,236260
15	Mg	0,710536	0,063549	-0,090143	0,083032	0,074375
16	Na	0,932648	-0,049452	0,152056	0,046384	0,029814
17	Минерал.	0,871545	-0,043911	0,451051	0,097694	-0,007331
18	Eh	0,890944	-0,036467	0,421982	0,061672	-0,149891
Общ. дисп.		4,631433	3,156244	2,526969	2,159754	2,019744
Веса факторов, %		25,7302	17,5347	14,0387	11,9986	9,8641

Анализируя данные табл. 5.3 и рис. 5.9 можно установить следующее:

1. Существует ряд факторов, на долю которых приходится 100% суммарного воздействия на изучаемые показатели химического состава грунтовых вод. Существенный вклад при этом вносят четыре фактора, веса которых более 10% после вращения матрицы. Они отражают вклад каждого из факторов в суммарную дисперсию исследуемой выборки.

2. В первый фактор (вес **25,730%**) с положительной силой связи больше 0,5 входят: медь (сила связи 0,6068), магний (0,7105), натрий (0,9326), хлор (0,8518), минерализация (0,8715) и Eh (0,8909). Силу связи больше 0,2 имеют кобальт (0,2157), железо (0,3476), pH (0,3601), HCO₃ (0,3578) и Ca (0,2283). Остальные элементы по силе связи сколько-нибудь заметного вклада в этот фактор не вносят. Наиболее характерными элементами первого фактора является медь, хлор, магний, натрий, минерализация и Eh.

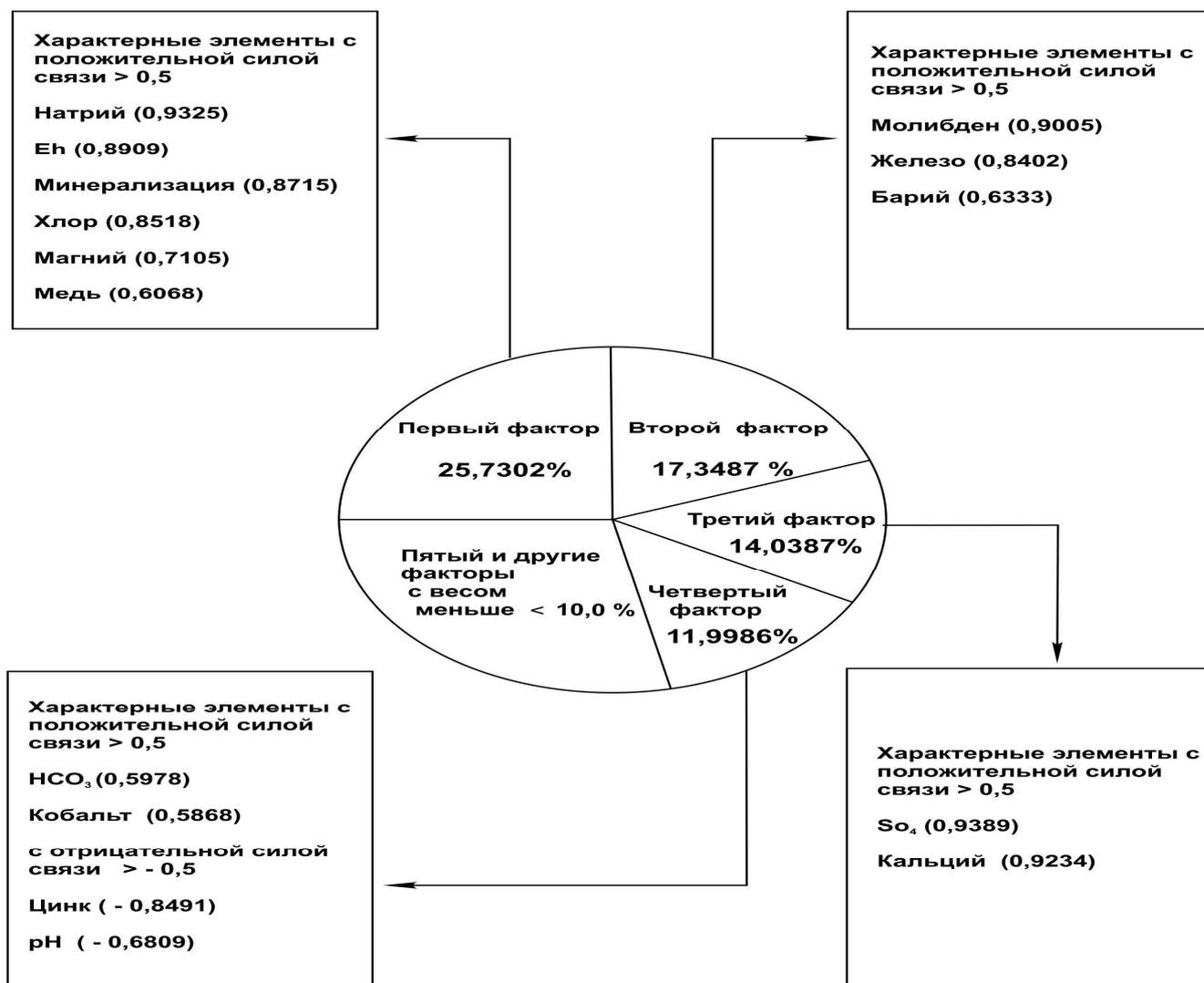


Рис. 5.9. Факторы и характерные элементы этих факторов

3. Во второй фактор (вес **17,534%**) с положительной силой связи больше 0,5 входят: барий (сила связи 0,6333), молибден (0,9005), никель (0,6960), железо (0,8402). Положительную силу связи больше 0,2 имеют кобальт (0,4393), медь (0,3998) и рН (0,3478). Остальные элементы заметного вклада во второй фактор не вносят. Основными элементами, характеризующими этот фактор, являются бром и железо.

4. В третий фактор (вес **14,039%**) с положительной силой связи больше 0,5 вошли: SO₄ (0,9383) и кальций (0,9234). Положительную силу связи больше 0,2 имеют: кобальт (0,2440), барий (0,4077), Минер. (0,4510) и Eh (0,4220), а отрицательную силу имеет кадмий (-0,2543). Основными элементами, характеризующими третий фактор, являются SO₄ и кальций.

5. В четвертый фактор (вес **11,998%**) с положительной силой связи больше 0,5 входят: кобальт (0,5868) HCO_3 (0,5978). С отрицательной силой связи больше 0,5 входят: цинк (-0,8491) и pH (-0,6809). Положительную силу связи больше 0,2 имеет свинец (0,3723). Характерными элементами четвертого фактора являются: цинк, pH, кобальт и HCO_3 .

6. В пятый фактор (вес **9,864%**) с положительной силой связи больше 0,2 вошли: HCO_3 (0,2443), SO_4 (0,3628) и кальций (0,2363). Остальные элементы заметного вклада в этот фактор не вносят.

В связи с тем, что пятый и последующие факторы, имеют вес меньше 10% и в них нет ни одного элемента с силой связи больше 1,0, то в дальнейшем эти факторы не рассматриваются.

Для анализа распространения выделенных четырех факторов на территории Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадин определялись нагрузки каждого из них по всем скважинам и родникам, для этого нами была применена Q-модификация факторного анализа. Результаты этого анализа приведены в табл. 5.4 и 5.5 и на рис. 5.10 и 5.11.

Хоррамабадский бассейн

Распределение факторных нагрузок на скважины и родники на территории Хоррамабадского бассейна приведено в табл. 5.4 и на рис 5.10.

По расположению изолинии этих факторов на территории впадины можно сделать следующие выводы:

1. Первый фактор имеет положительную нагрузку и распространен в южной части впадины и только локально выделяется в северо-западной, северной и северо-восточной ее частях. Здесь он имеет максимальную нагрузку, потому что этих скважин и родники находится на промышленных и жилых местах (больше 1,0) в районе скв. Чаркал (3,54), Чамгарх (1,04) и Сарнамак (1,02) и ист. Сорхе де. Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеют также скв. Чогаруши (0,94), Балилванд (0,53) и ист. Кельмехуб (0,54).

Отрицательные нагрузки этого фактора больше -1,0 наблюдаются только в ист. Кив(-1,05), Гардабсанги (-1,07), Гуше (-1,04), Гале джожд (-1,55) и Чешмебид (-1,04). Родники Кихриз (-0,92), Навекеш (-0,81), Чешме хорхе (-0,59) и Сабур (-0,53) имеют нагрузку от -0,5 до -1,0.

2. Второй фактор имеет положительную нагрузку в полосе, которая тянется с запада на север впадины, а также на юго-западе, в центре и юге. Здесь максимальную нагрузку (больше 1,0) он имеет: в скв. Сабур (34,8) и ист. Чангаий (2,15) и Хорабгорчи (1,12). Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеет также скв. Болилванд (0,82), Чамгарг (0,52) и ист. Чешметала (0,82), Гуше (0,59).

Отрицательные нагрузки этого фактора больше -1,0 зафиксированы в скв. Дехбагер (-2,02) и на ист. Гале джожд (-1,65). Отрицательная нагрузка от -0,5 до -1,0 зафиксирована также на скв. Чогаруши (-0,73) и Робат намаки (-0,63) и на ист. Кив (-0,78) и Доре (-0,62), Чешме сорхе (-0,91) и Чешме чераг (-0,54).

3. Третий фактор имеет положительные значения на половине территории впадины, простирающейся от центральной ее части в северо-западном направлении, и на неширокой полосе в западной части впадины. Максимальные положительные его значения (больше 1,0) приурочены к скв. Чамгарх (2,63) и Сарнамак (1,18). Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеют также скв. Гилуран (0,89), Мелекшахи (0,74) и ист. Доре (0,71), Сашме чераг (0,59), Чешмебид (0,82).

Отрицательные нагрузки этого фактора больше -1,0 зафиксированы в скв. Алиабад (-1,19), Чаркал (-1,22), и ист. Чангаий (-1,95), Кихриз (1,62), Сорхе де (1,08) и Сашме Сорхе (1,5). Отрицательную нагрузку от -0,5 до -1,0 имеет скв. Дарбанд (-0,81), Балилванд (-0,52), Рашиди-Дар (-0,72), Насерванд (-0,88), Дехбагер (-0,81) и ист. Сарабгорчи (-0,91), Гуше (-0,57)

4. Четвертый фактор имеет положительные значения больше 1,0 в скв. Балилванд (2,38) и Рашиди-Дар (1,37), Сарабеяс (1,2), Дегбагер (1,17).

Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеют также скв. Чагаруши (0,93), Гилуран (0,99) и ист. Чешме сорхе (0,62). Доре (0,53), Чангаий (0,94).

Отрицательную нагрузку более -1,0 имеют скв. и ист. Сорхе де (-1,61), Келмехуб (-1,64) и Чешмебид (-1,96) и Чешметала (-1,57). Отрицательную нагрузку от -0,5 до -1,0 имеет ист Борджалы (-0,55) и Гарбатсамги (-0,82).

Таблица 5. 4.

Факторные нагрузки на скважины и родники в Хоррамабадском бассейне после вращения (Q-модификация)

№ п/п	Скважина (родник)	Ф а к т о р ы			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
1	Рашиди-Дар скв.	-0,45117	-0,02537	-0,72861	1,36800
2	Мелекшахи скв.	-0,20449	0,14227	0,74256	0,83310
3	Насерванд скв.	0,14818	-0,38843	-0,99033	0,60311
4	Дехбагер скв.	0,44033	-2,01958	-0,81605	1,17385
5	Борджалы ист.	-0,82226	-0,61100	-0,42290	-0,55630
6	Сорхе де ист.	1,95296	0,28252	-1,08768	-1,61482
7	Робат намаки скв.	0,45527	-0,63176	0,10205	1,02355
8	Келмехуб ист.	0,54452	0,17496	-0,20788	-1,63980
9	Чешмебид ист.	-1,04144	0,07964	0,82037	-1,96270
10	Сараб сага ист.	0,00820	0,12134	0,30340	-0,47178
11	Гале джогд ист.	-1,55544	-1,65444	0,42819	-0,10687
12	Сашме чераг ист.	-0,42416	-0,54465	0,53526	-0,59101
13	Сабур скв.	-0,53582	3,40421	-0,31507	0,09455
14	Сашме сорхе ист.	-0,59117	-0,90608	-1,49902	0,62273
15	Навекеш ист.	-0,81633	-0,28876	0,46459	0,34905
16	Гилуран скв.	0,15093	-0,43109	0,88855	0,99360
17	Сарабейс ист.	0,28213	0,15967	-0,26433	1,19949
18	Кихриз ист.	-0,92510	0,31010	-1,62062	-0,10971
19	Алиабад скв.	-0,26838	0,31147	-1,19310	-0,07714
20	Чогаруши скв.	0,93549	-0,73139	0,01780	0,93093
21	Сарнамак скв.	1,02587	-0,34205	1,80790	-0,96777
22	Чангаий ист.	0,05003	2,15174	-1,95618	0,94223
23	Чамгарх скв.	1,04586	0,51671	2,63447	0,11154
24	Чаркал скв.	3,54745	-0,44263	-1,22248	-0,34338
25	Доре ист.	0,16490	-0,62352	0,70798	0,52615
26	Гуше ист.	-1,04311	0,59518	-0,56632	0,24874
27	Гардабсанги ист.	-1,06905	-0,30942	0,19861	-0,82846
28	Кив ист.	-1,04707	-0,77620	0,02230	-0,75297
29	Чешметала ист.	-0,43825	0,82534	-0,09178	-1,57115
30	Сарабгорчи ист.	0,18953	1,12963	-0,91009	-0,16016
31	Дарбанд скв.	-0,23787	-0,30265	-0,80631	0,17897
32	Балилванд скв.	0,52947	0,82423	-0,51973	2,38778

Анализируя совместное распределение всех четырех факторов на территории Хоррамабадского бассейна можно выявить несколько участков, где действуют два или больше факторов.

Так в районе ист. Доре, одновременно действуют первый, второй и третий факторы. Аналогичная картина наблюдается и в районе скв. Чамгарх и ист. Чамгаий, а также скв. Мелекшахи и Робат намаки и в районе ист. Сараб сага и Келмехуб. Это свидетельствует о подобных условиях питания и возможно и их загрязнения.

Сравнивая карты-схемы распределения факторных нагрузок для грунтовых вод в Хоррамабадском и Ширазском бассейнах, можно сделать вывод о том, что в этих впадинах существуют несколько участков, где действуют два или даже три одинаковых фактора (рис. 5.10 и 5.11).

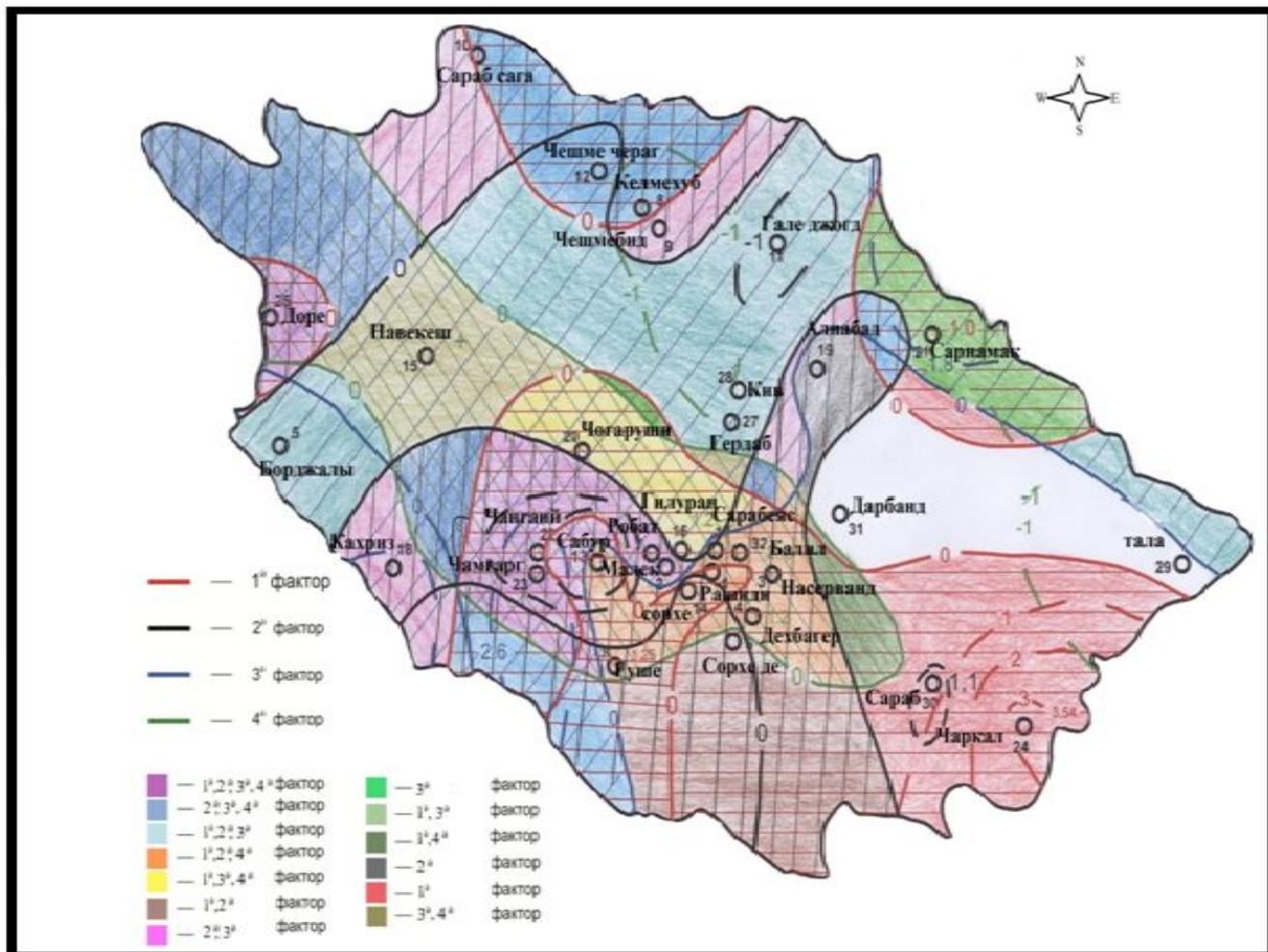


Рис. 5.10. Карта-схема распределения факторных нагрузок на скважины и источники в Хоррамабадском бассейне

Так, грунтовые воды района скв. Хабир и Бармехан в Ширазской впадине, где одновременно действуют первый, второй и третий факторы, точно соответствуют грунтовым водам района ист. Доре, Чангаий, Сараб сага и Келмехуб и скв. Чамгарг, Мелекшахи и Робат намаки в Хоррамабадского бассейна, где действуют эти же факторы.

Грунтовые воды в районе скв. Мохаммед и Шапур в Ширазского бассейна, где действуют второй и третий факторы, также соответствуют грунтовым водам района скв. Балилванд, Сарабеяс, Насерванд, Дехбагер и ист. Доре, где так же действуют эти же два фактора потому что этих скважин и родники находится на промышленных и жилых места.

Учитывая то, что во второй и третий факторы входят минерализация и Eh, которые характеризуют суммарное загрязнение грунтовых вод Ширазской и Хоррамабадской бассейнов можно с уверенностью утверждать, что условия загрязнения грунтовых вод в этих бассейнах похожие.

Ширазский бассейн

Распределение факторных нагрузок на скважины и родники на территории Ширазского бассейна приведено в табл. 5.5 и на рис 5.11. По расположению изолинии этих факторов на территории впадины можно сделать следующие выводы:

1. Первый фактор имеет положительную нагрузку и распространен в западной части впадины и только локально выделяется в северо-западной и западной ее частях, имея максимальную нагрузку значения (больше +1,0) в районе родников Бармехан (3,25), Бармебунак (2,57) и скв. Бармешур (1,57). Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеют также скв. Абхан (0,71), Баграм (0,87) и ист. Барметаер (0,87).

Отрицательные нагрузки этого фактора небольшие и только в скв. Шапур (-0,97), Хатунак (-0,77), Мониабад (-0, 77), Хабир (-0,84), Мансурабад (-0,8), Мохаммед (-0,99) и Абхан (-0,71) они имеют нагрузку от 0,5 до 1,0. Так как

все скважины имеют отрицательную нагрузку меньше единицы, поэтому в дальнейшем они не рассматриваются.

Таблица 5.5

Факторные нагрузки на скважины и родники в Ширазском бассейне
после вращения (Q-модификация)

№ п/п	Скважина (родник)	Ф а к т о р ы			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
1	Пирбона. скв.	-0,353791	-0,75265	-2,01828	-0,282473
2	Полберенджи. ист.	0,068046	-0,27636	-2,03876	-0,085501
3	Бабахаджи. скв.	-0,343500	-0,41065	-0,89190	-0,119954
4	Полфаса. скв.	-0,217185	-0,76212	-1,73186	-0,389261
5	Бармедаде. ист.	-0,180478	-0,76508	-0,56951	-0,419671
6	Кафтарак. скв.	-0,161650	-0,45554	0,32813	-0,455622
7	Бармеделак. ист.	-0,082286	-0,66431	0,99987	-0,790479
8	Барметаер. ист.	0,869834	-1,03430	1,22364	-0,439387
9	Бармешур. скв.	1,572496	-1,04629	0,12085	-0,353454
10	Бармехан. ист.	3,257177	1,72258	0,18312	-0,763217
11	Бармебабунак. ист.	2,566158	-1,02819	-0,15355	0,840410
12	Солтанабад. скв	-0,351905	0,15420	-0,06014	0,535128
13	Шапур. скв.	-0,977612	1,42434	0,90634	0,648162
14	Круни. скв.	-0,175925	2,08464	-1,39674	0,013842
15	Джарестан. скв.	-0,295752	-0,39402	-0,41573	0,025784
16	Гачи. скв.	-0,561400	-0,13900	0,93379	-0,011651
17	Махмудабад. скв.	-0,375449	2,02210	-0,82149	-0,168912
18	Пирмохамад. скв.	-0,450839	-0,24053	-1,40796	-0,247836
19	Хатунак. скв.	-0,773432	0,60600	0,21379	-0,395586
20	Мониабад. скв.	-0,766594	-0,85339	0,36936	-0,780966
21	Хабир. скв.	-0,845751	-0,49343	0,04994	-0,492036
22	Шамс. скв	-0,536607	-0,65376	1,16288	-0,470584
23	Мансурабад. скв.	-0,798168	-0,03053	0,64968	-0,864068
24	Мохаммед. скв.	-0,998615	1,20217	1,24011	-0,172677
25	Касргоше. скв.	-0,303517	0,04094	0,18048	4,267164
26	Саади. скв.	0,039571	-0,82594	0,36955	1,927690
27	Абхан. скв.	0,712310	2,10194	2,37246	-0,211658
28	Алиабад. скв.	-0,410197	-0,20116	1,46671	-0,558552
29	Баграм. скв.	0,875061	-0,33167	0,73521	-0,215364

2. Второй фактор имеет положительную нагрузку в широкой полосе, которая тянется с запада на северо-восток в центральной части впадины, и локально на юго-западе. Здесь максимальную нагрузку он имеет: в скв. Круни

(2,08) и Шапур (1,42), Абхан (2,10), Мохаммед (1,20) и ист. Бармехан (1,72). Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеет также скв. Хатунак (0,61).

Отрицательные нагрузки этого фактора больше -1,0 зафиксированы в скв. Бармешур (-1,04) и на ист. Бармебабунак (-1,02) и Барметаер (1,04). Отрицательная нагрузка от -0,5 до -1,0 зафиксирована также на скв. Саади (-0,82), Шамс (-0,65), Мониабад (-0,85), Пирбона (-0,75), Полфаса (-0,76) и на ист. Бармедаде (0,76) и Бармеделак (-0,66).

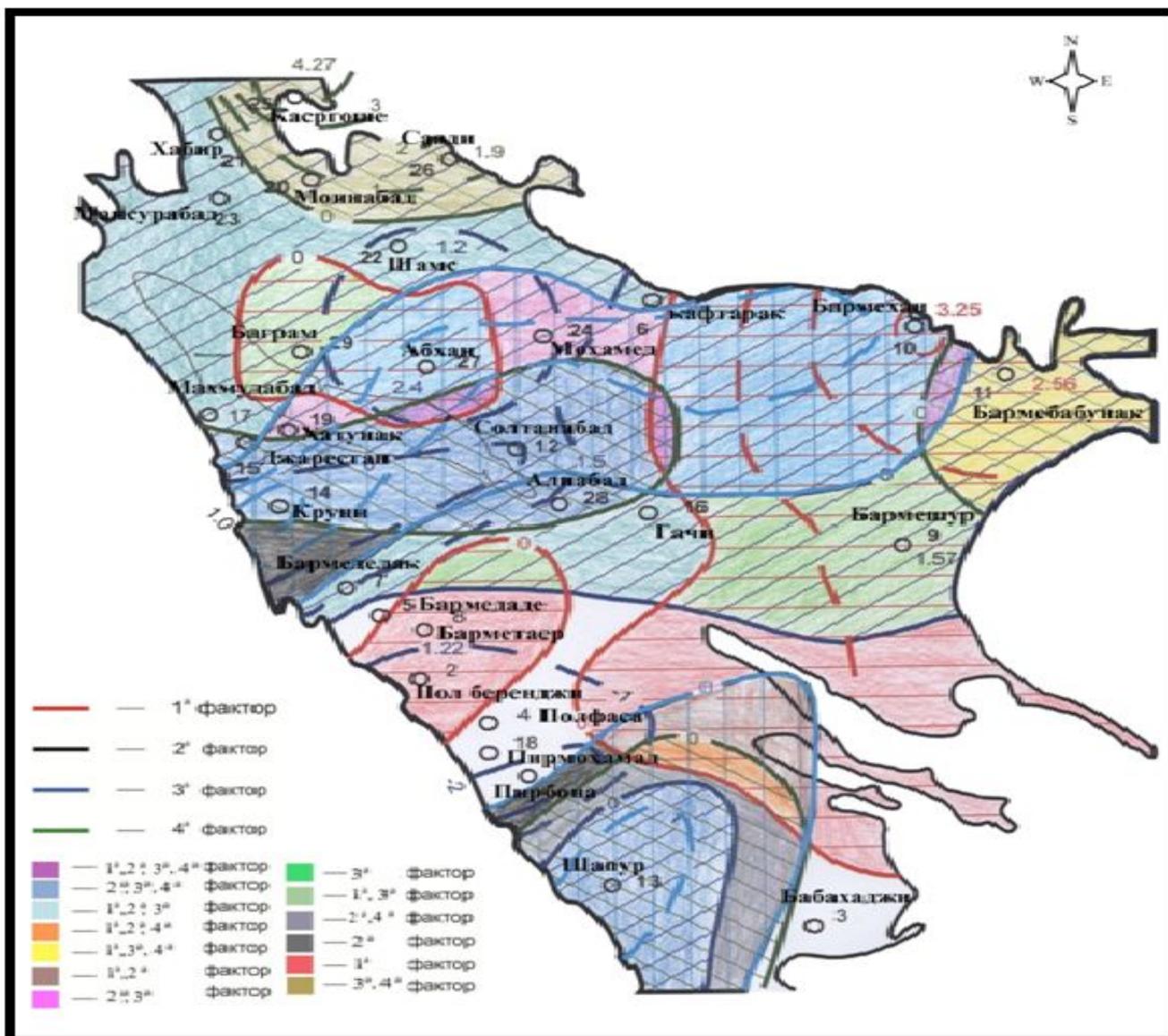


Рис. 5.11. Карта-схема распределения факторных нагрузок на скважины и источники Ширазского бассейна

3. Третий фактор имеет положительные значения на половине впадины в северной ее части и на небольшом локальном участке в юго-западной части. Максимальные положительные его значения приурочены к скв. Абхан (2,37),

Мохаммед (1,24), Шамс (1,16) и к ист. Барметаер (1,22). Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеют также скв. Баграм (0,73), Мансурабад (0,65), Гачи (0,93), Шапур (0,90) и ист. Барметалак (0,99).

Отрицательные нагрузки этого фактора больше -1,0 зафиксированы в скв. Пирбона (-2,02), Полфаса (-1,73), Круни (-1,4), Пирмохабад (-1,41) и ист. Полберенджи (-2,04). Отрицательную нагрузку от -0,5 до -1,0 имеет скв. Махмудабад (-0,82).

4. Четвертый фактор имеет положительные значения больше 1,0 в скв. Касргоше (4,27) и Саади (1,82). Положительные нагрузки от 0,5 до 1,0 имеют также скв. Шапур (0,64), Солтанабад (0,54) и ист. Бармебабунак (0,84).

Отрицательную нагрузку от -0,5 до -1,0 имеет скв. Мониабад (-0,78) и ист. Бармеделак (-0,77), Бармехан (-0,79).

Анализируя совместное распределение всех четырех факторов на территории Ширазского бассейна можно выявить несколько участков, где действуют два или больше факторов.

Так в районе скв. Хабир одновременно действуют первый, второй и третий факторы. Аналогичная картина наблюдается и в районе скв. Бармехан. Это свидетельствует о подобных условиях питания и возможно и их загрязнения.

В районе скв. Мохаммед действуют второй и третий факторы. Аналогичную ситуацию видим и в районе скв. Шапур. Это также свидетельствует о подобных условиях их загрязнения.

Из приведенного выше анализа можно сделать *вывод*, что при обнаружении любого загрязнения в одной из скважин или родника, например, в Ширазской впадине по карте распределения факторных нагрузок можно будет дать прогноз возможного загрязнения и скважин или родников Хоррамабадского бассейна.

6. ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОД ГРУНТОВОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ХОРРАМАБАДСКОГО И ШИРАЗСКОГО БАССЕЙНОВ

6.1. Обзор методов прогнозирования качества подземных вод

Прогнозу качества подземных вод посвящены труды Веригина Н. Н. [16], Волкова В. Н. [16], Гавришина А. И. [19, 20], Гороховского В. М. [32], Григорова Г. Л. [34], Ефременко А. В. [38], Ковалевского В. С. [47], Носика Д. Ю. [59], Решетова И. К., Чомко Д. Ф. и Чомко Ф. В. [74, 75], Серебрянникова М. Г. [78], Birtles A. B. [101], Delhomme J. P. [109], Ghassemi F. [117], Samani N. [146] и др.

Под гидрогеологическим прогнозом «понимается предвидение и предсказание развития гидрогеологических процессов или явлений во времени и в пространстве, т. е. изменений уровня, температуры, химического состава, ресурсов и запасов подземных вод, происходящих под действием различных естественных и искусственных факторов». Развивая это определение применительно к гидрохимическим прогнозам можно сказать, что гидрохимический прогноз – это научное предсказание (предвидение) изменения гидрохимического состояния гидрогеологического объекта, происходящих во времени под влиянием естественных и искусственных факторов. При этом под гидрохимическим состоянием понимают не только минерализацию подземных вод и концентрации в них отдельных компонентов, но и направленность происходящих в них процессов.

Задачи гидрохимических прогнозов в настоящее время многообразны. Это прогноз химического состава подземных вод в естественных и нарушенных условиях: а) при эксплуатационном водоотборе различных типов подземных вод; б) в районах техногенных, сельскохозяйственных и других загрязнений; в) при искусственном восполнении запасов; при подземном выщелачивании, мелиорации, захоронении промышленных стоков и т. д.

Принципиально существуют два типа таких прогнозов:

1) методы, основанные на эмпирических обобщениях гидрогеологических явлений и на анализе этих явлений в пространстве и времени. Эти методы дают только качественную прогнозную характеристику ожидаемых явлений, они пригодны для гидрохимических прогнозов в условиях естественного и редко в условиях нарушенного режима формирования химического состава подземных вод;

2) методы, использующие принципы точных физико-химических наук – химической термодинамики, физико-химической гидродинамики и кинетики. Эти методы дают возможность количественного описания и прогнозирования гидрохимических прогнозов, как в естественных, так и нарушенных условиях.

Методы, основанные на эмпирических обобщениях гидрохимических явлений.

Основой любого гидрохимического прогноза является наличие данных, характеризующих гидрохимическое состояние гидрогеологического объекта. Их получают в процессе полевых и лабораторных исследований, при анализе, обработке и обобщении конкретного фактического материала. Эти данные включают сведения о содержании и составе в подземных водах минеральных и органических веществ, газов, микроорганизмов, изотопов элементов, кислотно-щелочных условий, окислительно-восстановительных состояний вод и др.

Еще Вернадским В. И. было показано, что природные воды находятся в сложном динамическом равновесии, определяющемся системами взаимодействий вода–порода–газ–живое вещество. Для подземных вод динамика этих взаимодействий подчинена геологическим процессам, протекающих в геологическое время.

Поэтому при гидрогеохимических прогнозах необходимо рассматривать систему вода–порода–газ–органическое вещество (включая живое вещество) как единое целое, изменение одной из составляющих приводит к

преобразованию других. Такое взаимодействие обуславливается влиянием строгой совокупности природных факторов. Среди них особая роль принадлежит интенсивности водообмена и биологической продуктивности ландшафта, которые, являясь следствием определенного климата, геологического строения и истории, определяют характер геохимической среды, тип выветривания горных пород, состав подземных вод и направленность эволюции этой системы [117].

Важное значение для гидрохимических прогнозов имеет значение гидрохимической зональности, под которой понимается не только закономерное пространственное изменение минерализации и общего химического состава подземных вод, но и зональность газовая, органического вещества, микрофлоры, рН и Eh.

Вопросы вертикальной и площадной зональности, применения изотопов, гелия, влияние поровых вод глинистых пород на условия формирования и гидрохимического прогноза подземных вод в работе мы не рассматриваем.

Важное место в гидрохимических прогнозах занимают длительные наблюдения за режимом подземных вод в естественных и нарушенных условиях. При этом среди элементов режима подземных вод, помимо уровня (наиболее изучаемого в настоящее время), следует учитывать и состав подземных вод в его широком понимании.

В этой области прогноза режима подземных вод есть еще много нерешенных вопросов (в том числе методические) и недостаточно разработанных теоретических проблем.

Перечисленные направления исследований, используемые при гидрохимических прогнозах, не исчерпывают всего многообразия методов, основанных на эмпирических обобщениях и анализе гидрохимических явлений. В этом направлении предстоит еще много сделать. В частности, необходимо направить усилия гидрогеохимиков на получение достоверного, качественного

и разностороннего фактического материала, на основании которого можно было бы строить гидрогеохимические модели.

Методы, основанные на принципах физико-химической термодинамики, физико-химической гидродинамики и кинетики.

В связи с деятельностью человека возросла актуальность точных количественных прогнозов гидрогеологических условий, характеризующихся нарушенным режимом формирования химического состава подземных вод. В результате деятельности человека, направленной на использование ресурсов различных типов подземных вод (хозяйственно-питьевых, промышленных, минеральных, термальных), а также в связи с восполнением запасов подземных вод, подземным выщелачиванием, различными загрязнениями и т. д. в земной коре происходит массовое перемещение водных масс разнообразного химического состава. Происходящие в результате таких перемещений изменения минерализации подземных вод давно стали объектом гидрогеологических прогнозов, разрабатываемых на базе динамики подземных вод. Но такие прогнозы – это лишь первый подход к гидрохимическим прогнозам, ибо для решения различных гидрогеологических задач необходим прогноз не только изменения минерализации, но и изменений концентраций различных компонентов подземных вод.

Все перемещения водных масс сопровождаются не только простым переносом растворенных веществ и отдельных компонентов в подземных водах, но они приводят к нарушению естественных динамических физико-химических равновесий в системе вода–порода и к созданию в этих системах новых градиентов концентраций и температур, создаются новые неравновесные состояния. В этом случае система стремится к релаксации, не свойственной ее естественному состоянию. В связи с этим формируется совершенно новый и неожиданный химический состав подземных вод. Это особенно характерно для нормируемых компонентов подземных вод. Они наиболее чувствительны к изменению химического режима в системе вода–порода.

Среди компонентов химического состава подземных вод есть два крайних типа: компоненты (хлор, бром), в гидрогеохимии которых взаимодействия в системе вода–порода обычно не имеют решающего значения; компоненты (кальций, магний, стронций, железо, фтор и многие микрокомпоненты), в гидрогеохимии которых решающими являются взаимодействия в системе вода–порода. Их содержание в подземных водах определяется взаимодействиями и положениями динамического равновесия в гетерогенных системах вода–порода. Для элементов с переменной валентностью такие взаимодействия и равновесия осложняются еще и окислительно-восстановительными реакциями.

Поэтому все методы прогнозирования качества подземных вод по элементам второго типа без учета взаимодействий в системе вода–порода не могут считаться достоверными.

Применяемые в настоящее время методы прогнозирования конкретного химического состава подземных вод и их качества по отдельным нормируемым элементам, имеют общий недостаток. Они или не учитывают взаимодействия в системе вода–порода, или учитывают их в такой степени, которая не соответствует значимости и химическому существу этих взаимодействий. К решению задач прогнозирования качества подземных вод подходят очень упрощенно. В большинстве случаев используется схема поршневого вытеснения, часто без учета процессов физико-химического взаимодействия между разнородными водами и породами. В отдельных случаях применяется методика учета этого взаимодействия, базирующегося на исходных предпосылках, которые формально заимствованы из разделов физической химии, посвященных молекулярной и конвективной диффузии и сорбции [41, 70].

В связи с этим одна из основных геохимических проблем гидрогеологических прогнозов – это количественный учет результатов взаимодействий в системе вода–порода и расчет изменений химического состава воды, происходящих при движении подземных вод в горных породах.

Количественная характеристика этих взаимодействий возможна на основе принципов и методов химической термодинамики, физико-химической гидродинамики и кинетики. Методологически использование принципов этих наук предполагает необходимость моделирования гидрогеологических процессов, происходящих в системе вода–порода. Моделирование – это метод теоретического или практического изучения объекта или процесса, в ходе которого исследуется непосредственно не сам объект, а некоторая вспомогательная, созданная нами система – модель.

Принципы моделирования, основанные на методах химической термодинамики, состоят в прогнозировании гидрохимических явлений, происходящих в системе вода–порода, с химико-термодинамических позиций, физико-химической гидродинамики, теории массопереноса и кинетики. Модель – это система уравнений, отображающая физико-химическое существо процессов, происходящих при взаимодействиях в системе вода–порода, в равновесных и неравновесных системах с обратимыми и необратимыми процессами, в многокомпонентных гидрогеохимических системах с большим числом фаз.

Методические аспекты решения прогнозных гидрогеохимических задач на основе моделирования приведены в работах [17, 21, 117, 122]. Авторы пришли к выводам, что в дальнейшем необходимо совершенствовать методы гидрогеохимических прогнозов. Это совершенствование должно базироваться на основе методов химической термодинамики, физико-химической гидродинамики, теории массопереноса и кинетики, на основе статистического анализа погрешностей физико-химического моделирования и прогнозирования гидрохимических явлений, переход от детерминированных моделей к вероятностно-детерминированным, которые больше соответствуют вероятностной гидрогеохимической реальности.

Важным фактором, влияющим на изменение качества подземных вод грунтовых водоносных горизонтов Ширазского и Хоррамабадского бассейнов,

является интенсивный водоотбор. Отбор воды из этого водоносного горизонта приводит к снижению уровней, вследствие чего создается гидродинамическая предпосылка для вертикального перетекания (сверху вниз) и поступления в грунтовый горизонт загрязненных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков, потерь из рек, каналов и озер. Таким образом, отбор подземных вод изменяет гидрохимическую обстановку водоносного горизонта в зоне влияния водозаборов и непосредственно на самих водозаборах (скважинах).

В процессе эксплуатации наблюдается постоянное увеличение минерализации и основных ингредиентов химического состава (сульфатов, хлоридов, кальция, магния, железа и т. д.), увеличивается общая жесткость.

За время эксплуатации грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне (скв. Алиабад, Гилуран, Чаркал, источники Сараб сага и Чешме сорхе) и в Ширазском бассейне (скв. Бабахаджы, Гачи, Хабир и Круни а также источники Бармехан и Пол беренджи) наблюдается постоянное увеличение основных показателей химического состава подземных вод. Величина минерализации в воде водозаборных скважин увеличилась на 259–728 мг/дм³, сульфатов – на 98–479 мг/дм³, кальция – на 79–188 мг/дм³, железа – на 3,5–5,4 мг/дм³. Увеличение этих показателей связывается с растворением гипса и кальцита водовмещающих пород и с общим загрязнением воздуха и поверхностных вод.

Прогноз изменения качества воды грунтового водоносного горизонта в процессе его эксплуатации является важнейшей частью оценки эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод.

6.2. Стохастическая модель прогноза качества грунтовых вод

Нами предпринята попытка применить стохастическую модель для долгосрочного прогноза изменения качества подземных вод в процессе эксплуатации [52].

Долгосрочные (на один год и более) прогнозы качества подземных вод составлены на основе изучения закономерностей колебания их химического состава в прошлом, которые в общем виде отражают воздействие на режим вод основных режимообразующих факторов и взаимодействие в системе вода–порода, происходящих при движении подземных вод. В связи с этим представляется целесообразным отыскать в рядах таких колебаний закономерные составляющие, которые можно прогнозировать.

Для прогноза качества подземных вод предлагается стохастическая модель гидрохимического процесса, которая может быть представлена суммой нескольких гармонических составляющих, осложненной случайной компонентой.

$$X_{(t)} = A_0 + \sum_{n=1}^k A_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t - \varphi_n\right) + b_{(t)}, \quad (6.1)$$

где $X_{(t)}$ – ряд значений характеризующих качество воды (минерализация, химические элементы или вещества) за период наблюдения T в моменты времени t ;

A_0 – соответствующее среднее значение этого показателя за период T ;

K – число выделенных периодических составляющих;

A_n, T_n – амплитуда и периоды составляющих;

φ_n – начальные фазы гармоник (угловая величина, характеризующая их значения в начале наблюдений);

$b_{(t)}$ – случайный компонент.

Эта модель реализована на ПК с применением пакета математических расчетов Mathcad 2000 Professional. Информация дается в виде дискретных данных гидрохимических наблюдений, например, суточные, среднемесячные или среднегодовые величины минерализации, любого химического элемента или вещества. Для этого ряда вычисляется нормированная корреляционная функция по формуле:

$$R_{(\tau)} = \frac{\sum_{t=0}^{n-\tau} [X_{(t)} - \bar{X}] * [X_{(t+\tau)} - \bar{X}]}{\sqrt{\sum_{t=0}^{n-\tau} [X_{(t)} - \bar{X}]^2 * \sum_{t=0}^{n-\tau} [X_{(t+\tau)} - \bar{X}]^2}}, \quad (6.2)$$

где $R_{(\tau)}$ – коэффициент корреляции при сдвиге времени, равном τ ;

$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n X_{(t)}$ – математическое ожидание исходного ряда;

n – число элементов ряда.

Есть две альтернативные гипотезы:

1. Исследуемый процесс является случайным (содержит только компоненту $b_{(t)}$), т. е. определяется действием разнообразных факторов, не поддающихся в настоящее время аналитическому учету, и подчиняется нормальному закону распределения. Для такого процесса характерна быстро убывающая нормированная корреляционная функция.

2. Исследуемый процесс помимо случайной компоненты содержит одну или несколько периодических составляющих. Нормированная корреляционная функция такого ряда убывает значительно медленнее, чем в первом случае, и обязательно содержит гармонические компоненты с тем или иным временем корреляции.

В первом случае исходный ряд наблюдений не содержит закономерных составляющих, т. е. определяется случайной компонентой, во втором – в исходном ряду имеются закономерные составляющие, которые можно экстраполировать на будущее.

Выполнение второго условия позволяет преобразовать ряд с целью определения всех $3k+1$ параметров, входящих в формулу (6.1). Если предположить, что среднее значение случайной компоненты $b_{(t)}=0$, т.е.

$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n b_{(t)} = 0$, ее дисперсия равна $\sigma^2 b_i$, $\sigma^2 b_i$ и при каждом фиксированном

времени t отклонение $b_{(t)}$ подчинены одному и тому же нормальному закону распределения, то величина A_0 в формуле (6.2) находится из условия существования минимума величины ε :

$$\varepsilon = \left[X_{(t)} - A_{0n} - \sum_{n=1}^k A_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t - \varphi_n\right) \right]^2 \quad (6.3)$$

Если продифференцировать выражение (6.3) и приравнять его к нулю при найденных параметрах A_0 и T_1 то можно составлять систему линейных уравнений для определения параметров A_1 и φ_1 .

Так используя известные тригонометрические соотношения:

$$A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} t - \varphi_1\right) = d_1 \cos\frac{2\pi}{T_1} t + c_1 \sin\frac{2\pi}{T_1} t; \quad (6.4)$$

где $A_1 = \sqrt{d_1^2 + c_1^2}$ и $\operatorname{tg}\varphi = \frac{c_1}{d_1}$,

для подстановки в формулу (6.3) и дифференцируя по c_1 и d_1 , получим:

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial c_1} = \sum_{t=0}^n X_{(t)}^* - d_1 \cos\frac{2\pi}{T_1} t \quad ; \quad -\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial d_1} = \sum_{t=0}^n X_{(t)}^* - d_1 \cos\frac{2\pi}{T_1} t, \quad (6.5)$$

где $X^* = X_t - A_0$.

Приравняв левые части легко определить c_1 и d_1 , а следовательно и A_1 и φ_1 . Определив все параметры первой периодической составляющей, ПК формирует по ним периодическую составляющую и вычитает ее из исходного ряда.

Остаток анализируется по описанному алгоритму при фиксированном определенном A_0 члене, что позволяет определить параметры следующей гармонической составляющей. Это повторяется до тех пор, пока из исходного ряда $X_{(t)}$ не будут исключены все содержащиеся в нем периодические составляющие, о чем свидетельствует определенный вид нормированной корреляционной функции, вычисляемой каждый раз по соответствующему остатку.

При фиксированном значении A_0 возможно построить периодограммы с координатами ε и T_n . На присутствие какой либо периодической составляющей указывает минимум величины ε при соответствующем T_n . При этом, чем меньше величина ε , тем больше амплитуда периодической составляющей.

Анализ периодограммы позволяет судить о частотной структуре исследуемого гидрохимического процесса $X_{(t)}$, т. е. определить число содержащихся в нем периодических составляющих и оценить их амплитуды.

Каждая выделенная гармоника описывается аналитическим выражением вида:

$$X_{(t)} = A_0 + A_n * \cos\left(\frac{2\pi}{T_n}t - \varphi_n\right), \quad (6.6)$$

Подставляя в эти выражения соответствующие значения времени t , можно составить прогноз периодических составляющих. Прогноз случайной компоненты $b_{(t)}$ весьма затруднителен. Она характеризуется величиной стандартного отклонения σ_{bt} , а соответствующие трехсигмовые пределы с вероятностью 99,9% укажут пределы изменений параметров, характеризующих качество воды.

Эффективность предлагаемой методики определена величиной отношения S/σ , где S – стандартная ошибка проверочных прогнозов, σ – стандартная ошибка ряда наблюдений.

$$S = \sqrt{\frac{\sum [X_{(t)} - X_t^1]^2}{n}}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum [X_{(t)} - \bar{X}]^2}{n}}, \quad (6.7)$$

где X_t – фактическое значение параметра характеризующего качество воды;

X_t^1 – соответствующее расчетное значение этого параметра;

\bar{X} – среднеарифметическое ряда наблюдений;

n – число наблюдений.

Методика прогноза считается удовлетворительной, если $S/\sigma=0,4-0,8$ и хорошей – если $S/\sigma < 0,4$.

6.3. Прогноз качества грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов

Эта методика опробована по данным изменения минерализации, жесткости, кальция и сульфат-иона грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне (скв.

Алибад, Гилуран, Чаркал, источники Сараб сага и Чешме сорхе) и в Ширазском бассейне (скв. Бабахаджи, Гачи, Хабир и Круни, а также источники Бармехан и Пол беренджи). Использовались данные гидрохимического режима этих скважин и источников с 2004 по 2014.

Результаты прогноза минерализации и жесткости грунтовых вод из скв. Гилуран, расположенной в Хоррамабадском бассейне, и сульфатов и кальция в скв. Гачи, расположенной в Ширазском бассейне, приведены на рис. 6.1 и 6.2.

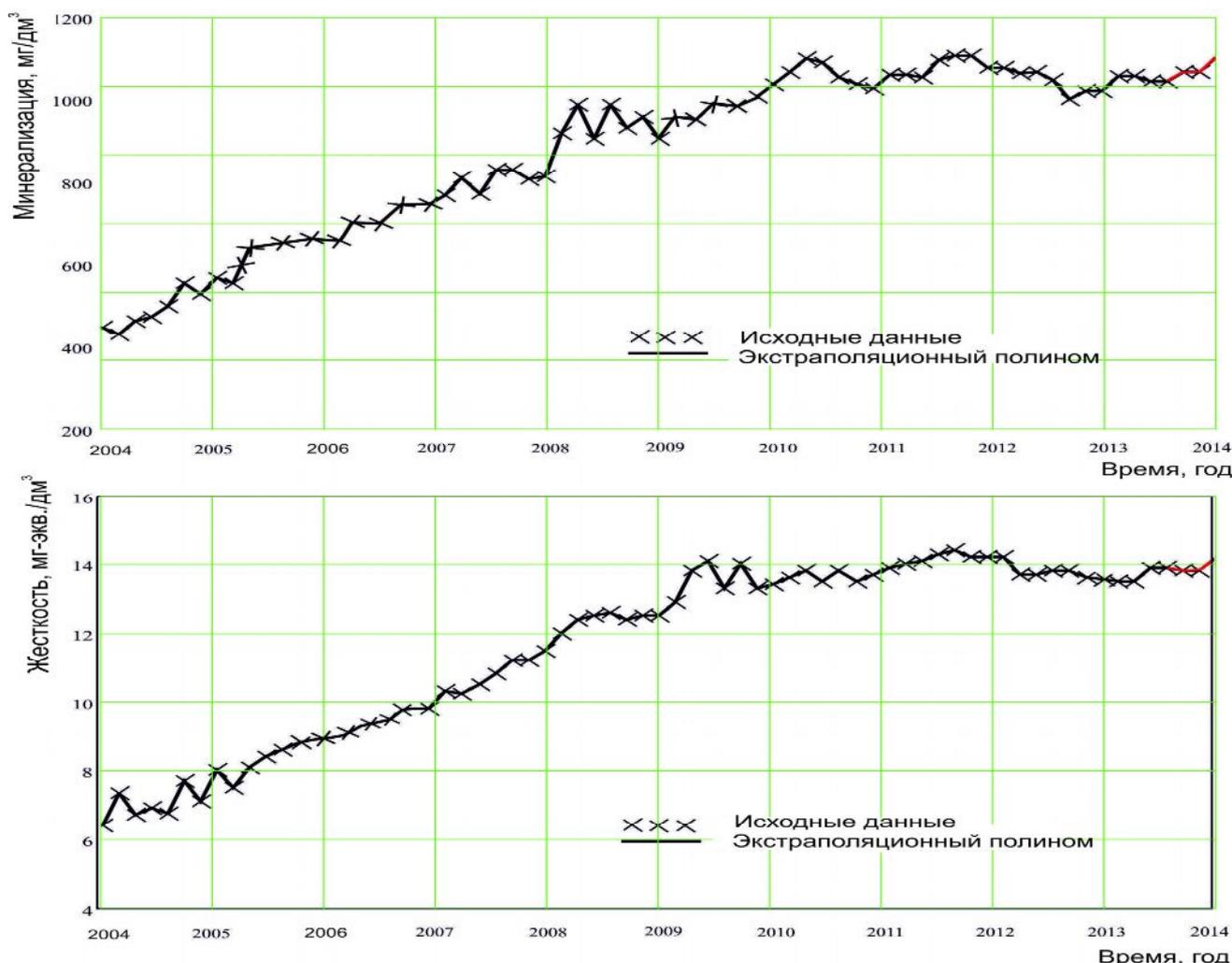


Рис. 6.1. Прогноз изменения минерализации и жесткости грунтовых вод в Хоррамабадского бассейна грунтовых вод (св. Гилуран).

Анализируя графики (рис. 6.1) приходим к выводу, что в течение прогнозируемого года минерализация грунтовых вод в скважине Гилуран будет продолжать расти, а затем незначительно снизится, оставаясь ниже 1000 мг/дм³. Величина соотношения S/σ равна примерно 0,38, а это свидетельствует о том,

что прогноз хороший. А значение жесткости грунтовых вод в скв. Гилуран будет колебаться, а затем незначительно снизится, оставаясь у отметки 14 мг-экв/дм³. Величина соотношения S/σ составляет около 0,4, что также свидетельствует о том, что прогноз также хороший.

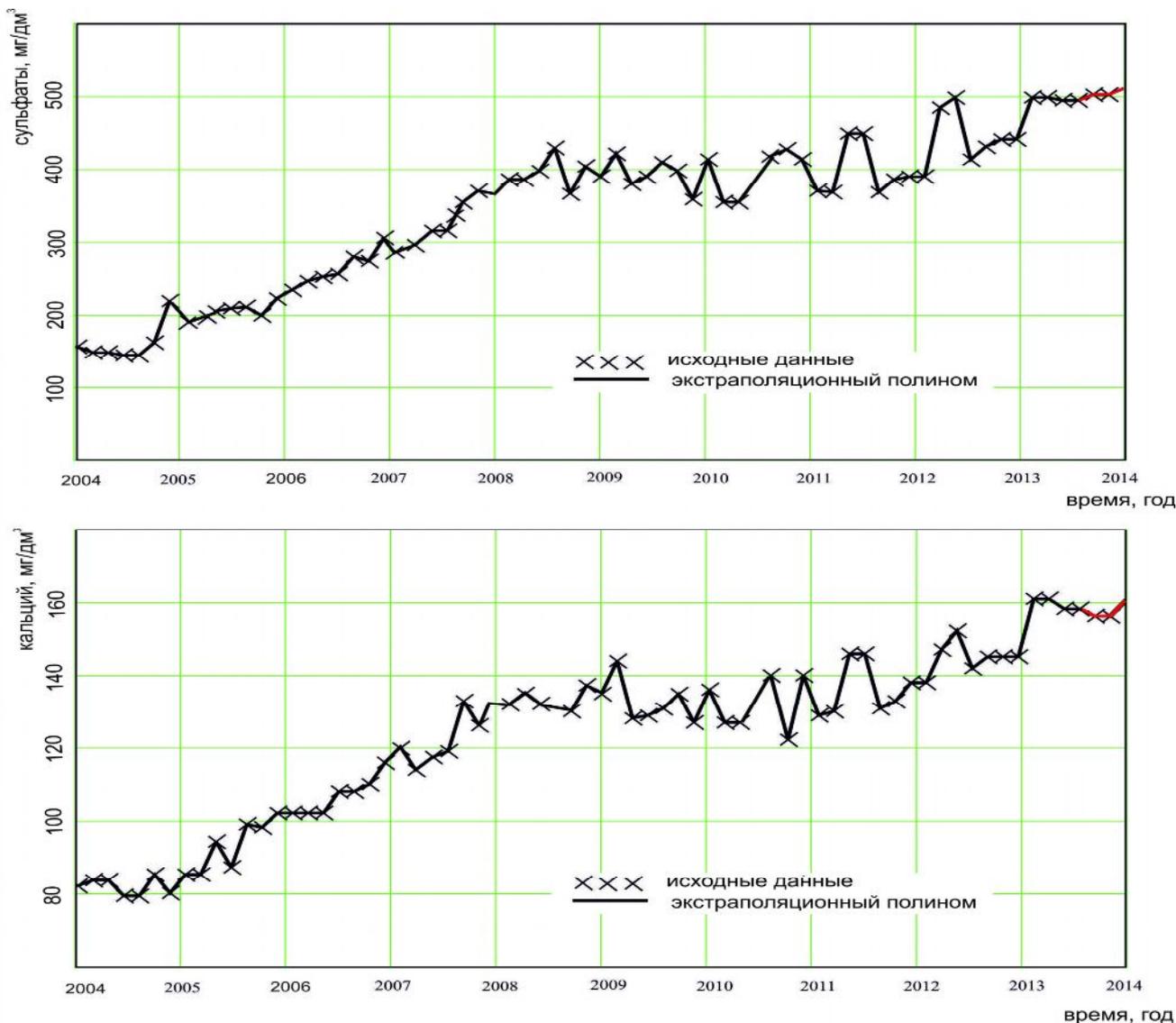


Рис. 6.2. Прогноз изменения минерализации и жесткости грунтовых вод в Ширазском артезианском бассейне (скв. Гачи).

Анализируя графики (рис. 6.2) приходим к выводу, что в течение прогнозируемого года значение кальция в грунтовых водах в скв. Гачи будет колебаться, а затем незначительно снизится, оставаясь у отметки 160 мг/дм³. Величина соотношения S/σ равна примерно 0,39, а это свидетельствует о том, что прогноз хороший. А сульфаты в грунтовых водах в скв. Гачи будет

продолжать расти и немного превысят 500 мг/дм³. Величина соотношения S/σ составляет около 0,38, что также свидетельствует о том, что прогноз также хороший.

Таким образом, если исходный ряд колебаний минерализации и жесткости, сульфатов и кальция разлагается на периодические составляющие полностью или с небольшим по амплитуде остатком, то прогноз не вызывает больших трудностей. Если же после выделения составляющих остается случайный компонент с значительной амплитудой, то можно составить прогноз об общей направленности процесса.

Предложенная модель может применяться также для прогноза любого показателя химического состава подземных вод.

ВЫВОДЫ

Основные результаты исследований по теме диссертации можно сформулировать так:

1. В работе подробно исследованы основные факторы формирования подземных вод грунтовых водоносных горизонтов в Хорремабадском и Ширазском бассейнах: физико-географические, геологические, гидрогеологические, физико-химические. Эти водоносные горизонты рассматриваются как открытая гидрогеодинамическая система, которая имеет тесные связи с поверхностными водами рек и озер, которые находятся в этих межгорных впадинах.

2. На примере грунтовых водоносных горизонтов этих бассейнов определены региональные закономерности формирования химического состава подземных вод Западного Ирана в природных условиях и в условиях эксплуатации. Исследованы закономерности изменения химического состава, рассмотрены основные факторы та источники их загрязнения.

3. Рассчитан баланс грунтовых вод Хоррамабадского бассейна и проведено его сравнение с балансом грунтовых вод Ширазского бассейна. Установлено, что в этих бассейнах расходные части балансов превышают приходные части. Дефицит грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне составляет $-0,59 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 , а в Ширазском бассейне – $-0,61 \text{ дм}^3/\text{с}$ из 1 км^2 . Доказано, что дефицит баланса грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне на 2,65 % меньше, чем дефицит в Ширазском бассейне. Доказано, что уровень грунтовых вод в Хоррамабадском бассейне ежегодно будет понижаться в среднем на 0,76 м, что приведет в ближайшие 10 лет к осушению водозаборных скважин, эксплуатирующих грунтовые воды в Хоррамабадском бассейне, особенно в южной его части.

4. По гидрогеохимическим данным в Хоррамабадском и Ширазском бассейнах определены участки грунтового горизонта с подобным химическим составом в условиях его эксплуатации. Для этого предложена методика,

основанная на использованные кластерного анализа химического состава грунтовых вод.

5. Метод кластерного анализа позволяет:

- определить сходство и различие химического состава проб воды, отобранных из грунтовых водоносных горизонтов в разных частях межгорных впадин;

- сравнить между собой химический состав грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов и выделять участки с подобным химическим составом грунтовых вод и очерчивать их;

- по нашему мнению при регулярном размещены пунктов отбора проб подземных вод (например, при гидрогеохимической съемке) этим методом можно пользоваться для районирования грунтовых вод по химическому составу.

6. По гидрогеохимическим данным осуществлено обоснование условий сходства питания и загрязнения грунтового водоносного горизонта Хоррамабадского и Ширазского бассейнов. Для этого предложена методика, основанная на использованные факторного анализа химического состава грунтовых вод.

7. Факторный анализ позволяет:

- за химическим составом грунтовых вод Хоррамабадского и Ширазского бассейнов определить ряд факторов, на долю которых приходится 100% суммарного влияния. Существенный вклад при этом вносят четыре факторы, вес которых больше 10 % после вращения матрицы;

- определить основные химические элементы и соединения, которые характеризуют тот или иной фактор. По силе связей этих элементов, которая должна быть больше 0,5, определено, что характерными элементами первого фактора являются медь, хлор, магний, натрий, минерализация и Eh, второго – бром и железо, третьего – SO₄ и кальций и четвертого – цинк, Eh, кобальт и HCO₃;

- определены нагрузки этих четырех факторов на каждую скважину и источник Хоррамабадского и Ширазского бассейнов и построены карты-схемы распределения этих нагрузок на территории межгорных впадин.

- при сравнении карт-схем обнаружено, что на территории этих бассейнов выделяется несколько участков, где одновременно действуют два или три одинаковых факторов. Так в Ширазком бассейне на участке, где расположены скв. Хабир и Бармехан, одновременно действуют первый, второй и третий факторы. Эти же три факторы действуют и в Хоррамабадском бассейне на участке, где расположены скв. Чамгарг, Мелекшахи и Робат намаки та источники Доре, Чангаий, Сараб сага и Келмехуб.

Грунтовые воды в Ширазском бассейне на участке, где расположены скв. Мохаммед и Шапур, также подобны грунтовым водам в Хоррамабадском бассейне на участке, где расположены скв. Балилванд, Сарабеяс, Насерванд, Дехбагер и источник Доре потому, что там одновременно также действуют второй и третий факторы.

- в связи с тем, что в первый, второй и третий факторы входят одинаковые характерные элементы, поэтому можно утверждать, что условия питания, разгрузки и возможное и загрязнение грунтовых вод на этих участках одинаковые.

- при обнаружении любого загрязнения воды в одной из скважин или источнике, например, в Ширазском артезианском бассейне по карте-схеме распределения факторных нагрузок можно дать прогноз возможного загрязнения и скважин или источников и в Хоррамабадском бассейне грунтовых вод.

8. Для прогноза химического состава грунтовых вод предлагается стохастическая модель гидрогеохимического процесса. Доказано, если исходный ряд колебаний компонентов химического состава грунтовых вод, например, минерализации и жесткости, сульфатов и кальция и др., раскладывается на периодические составные целиком или с небольшим

остатком, то прогноз не вызывает больших затруднений. Если же после выделения составляющих остается случайный компонент из значительной амплитудой, то можно составить прогноз о общей направленности процесса.

9. По данным изменения минерализации, жесткости, сульфатов и кальцию в грунтовых водах Хоррамабадского (скв. Гилуран) и Ширазского (скв. Гачи) бассейнах с 2004 по 2014 г. с использованием стохастической модели выполнен прогноз их изменения в будущем.

Перечисленные результаты исследований полностью соответствуют цели диссертационной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ализаде А. Основы прикладной гидрологии. / А. Ализаде. // – Лурестан: Имам реза университет, 2004. – 217 с.
2. Амджади Азиз. Геолого-гидрогеологическая характеристика бассейна Кабудрахенга в провинции Хамадана Западной части Ирана. / Азиз Амджади. // Вісн. Харк. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна № 1033. – Х.: ФОП «Петрова В. В.». 2012. – С. 59–64.
3. Амджади Азиз. Сравнительная характеристика химического состава грунтовых вод Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадин Ирана. / Азиз Амджади. // Вісн. Харк. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна № 1084. – Х.: ФОП «Петрова». 2013. – С. 22–31.
4. Амджади Азиз. Использование факторного анализа при исследовании грунтовых вод в Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадинах Ирана. / Азиз Амджади, Д. Ф. Чомко. // Вісн. Харк. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна № 1098. – Х.: ФОП «Петрова В. В.». 2014. – С.13–26.
5. Амджади Азиз. Применение кластерного анализа для выделения участков грунтовых вод со сходным химическим составом в Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадинах Ирана. / Азиз Амджади, Д. Ф. Чомко. // Вісник Київ. нац. ун-ту імені Т. Шевченка, № 1 (64). – К.: Видавничий центр Київ. нац. ун-ту, 2014. – С. 54–61.
6. Амджади Азиз. Исследование химического состава грунтовых вод Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадин методом кластерного анализа. / Азиз Амджади. // Матеріали І-ї наукової конференції «Проблеми гідрогеології на сучасному етапі». – Х.: ФОП «Бровін О. В.». 2014. – С. 8–10.
7. Амджади Азиз. Использование факторного анализа при исследовании химического анализа грунтовых вод Ширазской и Хоррамабадской межгорных впадин. / Азиз Амджади, Ф. В. Чомко. // Матеріали І-ї наукової конференції «Проблеми гідрогеології на сучасному етапі». – Х.: ФОП «Бровін О. В.». 2014. – С. 10–12.

8. Амджади Азиз. Опыт применения кластерного анализа при исследовании химического состава грунтовых вод Ширазской и Хорамбадской межгорных впадин. / Азиз Амджади. // Матеріали науково-практичної конференції «Регіон–2014: Стратегія оптимального розвитку». – Х.: ФОП «Петрова В. В.». 2014. – С. 302–304.

9. Амджади Азиз. Исследование химического состава грунтовых вод Ширазской и Хорамбадской межгорных впадин. / Азиз Амджади, Ф. В. Чомко. // Матеріали науково-практичної конференції «Регіон–2014: Стратегія оптимального розвитку». – Харків: ФОП «Петрова В. В.». 2014. – С. 305–307.

10. Амджади Азиз. Использование факторного анализа при исследовании химического состава грунтовых вод Западного Ирана. / Азиз Амджади, Руколлах Наджафи. // Материалы 21-й научно-практической конференции «Научная дискуссия: инновации в современном мире». – М.: Изда-во «Международный центр науки и образования». 2014. – С. 17–20.

11. Белостоцкий Ю. Б. Использование вероятностно-статистических методов и ЭВМ для выяснения условий формирования химического состава пластовых вод. / Ю. Б. Белостоцкий. // – М.: Ж. «Известия вузов. Геология и разведка». 1979. – 13 с.

12. Белякова Е. Е. Гидрохимические исследования. / Е. Е. Белякова, Ю. К. Бурков, О. М. Гирфанова и др. // – Л.: Недра, 1972. – 108 с.

13. Беспмятнов Г. П. Предельно-допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде: Справочник. / Г. П. Беспмятнов, Ю. А. Кротов // – Л.: Химия, 1985. – 528 с.

14. Бочеввер Ф. М. Защита подземных вод от загрязнения. / Ф. М. Бочеввер, Н. Н. Лапшин, А. Е. Орадовская. // – М.: Недра, 1979. – 230 с.

15. Бут Ю. С. Прогноз качества подземных вод в районах водозаборов Украины. / Ю. С. Бут. // – К.: Вопросы генезиса, динамики, формирования подземных вод и водно-физические свойства пород УССР». 1978. – С. 70–77.

16. Веригин Н. Н. О прогнозе качества воды в береговых водозаборах. / Н. Н. Веригин, В. С. Саркисян. // – М.: Водные ресурсы, 1975, №1. С.192–198.
17. Волков В. Н. Применение корреляционного анализа для установления закономерностей распространения компонентов химического состава подземных вод. / В. Н. Волков, Э. С. Сианисян. // – Минск: «Материалы геологического изучения территории Белоруссии», 1981. – С. 26–29.
18. Всеволожский В. А. Основы гидрогеологии. / В. А. Всеволожский // – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 271 с.
19. Гавич И. К. Гидрогеодинамика. / И. К. Гавич. // – М.: Недра, 1988. – 242 с.
20. Гавришин А. И. Гидрохимические исследования с применением математической статистики и ЭВМ./ А. И. Гавришин // – М.: Недра, 1974. – 144 с.
21. Гавришин А. И. О качестве геохимической информации. В кн.: Математические методы при геохимических исследованиях. / А. И. Гавришин. // – Свердловск: Изд. УНЦ, 1973. С. 75–76.
22. Гармонов И. В. Основы гидрогеологии. / И. В. Гармонов. // – М.: Недра, 1980. – 285 с.
23. Гвоздецкий Н. А. Проблемы изучения карста и практика. / Н. А. Гвоздецкий. // – М.: Изд-во Мысль, 1972. –195 с.
24. Геологический словарь в 2 т. // – М.: Недра, 1973. Т. 1 – С. 487, Т. 2 – С. 456.
25. Гидрогеологические исследования в межгорных впадинах (под ред. Шестакова В. М.). // – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 279 с.
26. Гидрогеологические исследования в межгорных впадинах южного Таджикистана, (под ред. Шестакова В. М.). // – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 238 с.
27. Гидрогеология (под ред. Шестакова В. М., Орлова М. С.). // – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 295 с.
28. Гидрогеология и инженерная геология аридной зоны СССР (под ред.

Кенесарина Н. А). Выпуск 4. // – Ташкент: Изд-во ФАН, 1967. – 196 с.

29. Гидрогеологические исследования в массивах трещиноватых и закарстованных пород с применением методов моделирования и математической статистики. // – М.: Недра, 1975. – 74 с.

30. Гольдберг В.М. Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах. / В. М. Гольдберг. // – М.: Недра, 1976. – 152 с.

31. Гольдберг В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. / В. М. Гольдберг. // – М.: Недра, 1984. – 264 с.

32. Гороховский В. М. Математические методы и достоверность гидрогеологических и инженерно-геологических прогнозов. / В. М. Гороховский. // – М.: Недра, 1977. – 76 с.

33. Горшков С П. Концептуальные основы геоэкологии. / С П. Горшков. // – Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного университета, 1999. – 187 с.

34. Григорова Г. Л. К методике прогнозирования качества подземных вод речных долин. / Г. Л. Григорова, О. П. Шибанова. // – Ташкент: ГИДРОИНГЕО, сб. «Ресурсы подземных вод аридной зоны и вопросы их охраны», 1982. – С. 17–25.

35. Девис Д. С. Статистический анализ данных в геологии. Пер. с англ. / Д. С. Девис. // – М.: Недра, 1990. – 319 с.

36. Дервиш Заде Али. Геология Ирана. / Али Заде Дервиш. // – Тегеран: Центр публикации Амиркабир, 2002. – 297 с

37. Дубров А. М. Обработка статистических данных методом главных компонент. / А. М. Дубров. // – М.: Статистика, 1978. – 135 с.

38. Ефременко А. В. Зависимость структуры рядов гидрогеологических наблюдений от их длины. / А. В. Ефременко. // – М.: сб. Науч. тр. «Методические аспекты решения гидрогеологических и инженерно-геологических задач», 1985. – С. 54–52.

39. Загальна гідрологія. Підручник. / С. С. Левківський, В. К. Хільчевський, О. Г. Ободовський та ін. // – К.: Фітосоціоцентр, 2000. – 264 с.

40. Зареи Сахамие. Петрография магматических пород. / Сахамие Зареи. // – Тегеран: Центр публикации Пандака, 2001. – 195 с.
41. Изучение режима подземных вод с учетом влияния хозяйственной деятельности. // – М.: сб. науч. тр. ВСЕГИНГЕО, 1989. – 111 с.
42. Искенрог К. Г. Геологический факторный анализ. / К. Г. Искенрог, Д. И. Клован, Р. А. Реймент. // – Л.: Недра, 1980. – 223 с.
43. Камали Г. Формирование потоков подземных вод Ширазской впадины (Иран). / Г. Камали. // – М.: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук, 1999. – 20 с.
44. Каменский Г. И. Вопросы формирования подземных вод. / Г. И. Каменский. // – В кн.: Труды Лаборатории гидрогеологических проблем. Т. 16. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 7–28.
45. Кац Д. М. Мелиоративная гидрогеология. / Д. М. Кац, В. М. Шестаков. // – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 261 с.
46. Ковалевский В. С. Исследование режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. / В. С. Ковалевский. // – М.: Недра, 1986. – 198 с.
47. Ковалевский В. С. Прогнозы изменения ресурсов и химического состава подземных вод. / В. С. Ковалевский, В. М. Гельдберг. // – М.: 27 Междунар. геол. конгр. М. 4–14 августа 1984 г. Т. 16, 1984. – С. 28–30.
48. Колодий В. В. Гидрогеология горных стран, смежных прогибов и межгорных впадин. / В. В. Колодий, А. В. Кудельский. // К.: Наукова думка, 1972. – 201 с.
49. Короновский И. В. Основы геологии. / И. В. Короновский, А. Ф. Якушова. // – М.: Высшая школа, 1991. – 217 с.
50. Королев В. А. Мониторинг геологической среды. / В. А. Королев. // – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 265 с.
51. Костенко Н. П. Геоморфология. / Н. П. Костенко // – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 287 с.
52. Крайнов С. Р. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии. / С. Р. Крайнов. // – М.: Недра, 1980. – 127 с.

53. Крамбейн У. Статистические модели в геологии. / У. Крамбейн, Р. Грейбилл. // – М.: Мир, 1969. – 397 с.
54. Красильщиков Л. А. Влияние неотектонических процессов на формирование подземных вод предгорных равнин. / Л. А. Красильщиков, У. М. Ахмедсафин. // – М.: Изд-во Советская геология. № 10, 1989. С. 94–102.
55. Куваев А. А. Оценка интенсивности разгрузки подземных вод по гидрогеотермическим данным. / А. А. Куваев, В. М. Шестаков. // – М.: Водные ресурсы. № 6, 1989. – С. 5–16.
56. Листенгартен В. А. Закономерности формирования, особенности методики оценки ресурсов и перспективы использования маломинерализованных подземных вод равнин АзССР. / В. А. Листенгартен, И. С. Аскеров, И. С. Исрафилов. // – Баку: Изд-во ЭЛМ, 1983. – 267 с.
57. Листенгартен В. А. Формирование ресурсов подземных вод аллювиально-пролювиальных равнин. / В. А. Листенгартен. // – Баку: Изд-во ЭЛМ, 1987. – 317 с.
58. Лоули Д. Факторный анализ как статистический метод. / Д. Лоули, А. Максвелл. // – М.: Мир, 1967. – 144 с.
59. Амджади Азиз Применение стохастической модели для долгосрочного прогноза качества воды грунтового водоносного горизонта Хоррамабадского и Ширазского бассейнов. / Азиз Амджади, Ф. В. Чомко, Д. Ю. Носик. // Вісник Харк. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна №.1157 – Х.: ФОП «Петрова В. В.». 2015. – С. 111–116.
60. Мавлянов Г. А. Методика составления водного баланса межгорных впадин. / Г. А. Мавлянов, К. Г. Ганиев. // – Ташкент: Изд-во ФАН УзССР, 1973. – 128 с.
61. Магфури Могодам. Геология Ирана. / Могодам Магфури, А. Пазуки, Сахамие Зареи. // – Лурестан: Центр публик. Лурестанского ун-та, 1975. – 327 с.
62. Маккавеев А. А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. / А. А. Маккавеев. // – М.: Недра, 1971. – 216 с.

63. Маринова М. А. Гидрогеология Азии. / М. А. Маринова. // – М.: Недра, 1974. – 576 с.
64. Махдави М. Прикладная гидрогеология. / М. Махдави, Аскеров . // – Тегеран: Центр публикации Тегеранского университета, 2000. – 281 с.
65. Овчинников А. М. Основные черты геологического строения Северной Персии. / А. М. Овчинников. // – М.: Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1987. С. 373–400.
66. Павличенко Л. М. Современное состояние применения факторного анализа и метода главных компонент в гидрогеологии. / Л. М. Павличенко. // – Алма-Ата: «Материалы 2-й Конференции молодых ученых Института гидрогеологии и гидрофизики АН КазССР». Изд-во ИГГ АН КазССР, 1980. – С. 15–21.
67. Петров М. П. Иран. / М. П. Петров. // – М.: География, 1999. – 184 с.
68. Питьева К. Е. Гидрогеохимия. / К. Е. Питьева. // – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 325 с.
69. Плотников Н. И. Техногенные изменения гидрогеологических условий. / Н. И. Плотников. // – М.: Недра, 1989. – 231с.
70. Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод./ Н. И. Плотников. // – М.: Недра, 1985. – 375 с.
71. Пониаров В. П. Тектоника и история геологического развития северной части Аравийской платформы и складчатых зон обрамления. / В. П. Пониаров. // – М.: Изд-во МГУ, 1967. – 327 с.
72. Рахимов Н. Р. Возможности приложения теорий вероятности и информации для пространственно-временного анализа режима грунтовых вод. / Н. Р. Рахимов. // – Ташкент: Узбекский геологический журнал, №5, 1982. – С. 51–56.
73. Решетов И. К. Формирование химического состава подземных вод и условия загрязнения водоносного горизонта при эксплуатации водозабора. / И. К. Решетов, Ф. В. Чомко, Д. Ф. Чомко. // – М.: ИМГРЭ. Тезисы докладов

международного симпозиума по прикладной геохимии стран СНГ. 1997. – С. 184–185.

74. Решетов И. К. Определение условий питания и загрязнения водоносного горизонта по изменению химического состава подземных вод при эксплуатации водозабора. / И. К. Решетов, Ф. В. Чомко, Д. Ф. Чомко. // – Санкт-Петербург: Труды Международной конференции «Экологическая геология и рациональное недропользование. Становление научного направления и образования», 1997. – С. 152–153.

75. Решетов И. К. Долгосрочный прогноз качества подземных вод меломергельного водоносного горизонта в процессе его эксплуатации. / И. К. Решетов, Д. Ф. Чомко, Р. Ф. Чомко. // – Х.: Вісн. Харків. ун-ту №402, 1998. – С. 68–71.

76. Сарманов О. В. Основные типы корреляции, применяемые в гидрологии. / О. В. Сарманов, И. О. Сарманов. // – М.: Наука, 1983. – 200 с.

77. Серебрянников М. Г. Выявление скрытых периодичностей. / М. Г. Серебрянников, А. Н. Первозванский. // – М.: Наука, 1965. – 96 с.

78. Тектоника Евразии. Глав. ред. А. Л. Яншин. // – М.: Наука, 1966. – 487 с.

79. Терещенко В. О. Гідрогеологія України. / В. О. Терещенко. // – Х.: Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2006. – 44 с.

80. Хаин В. Е. Историческая геология. / В. Е. Хаин, Н. В. Короновский, Н. А. Ясаманов. // – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 294 с.

81. Хаустов А. П. Многомерный анализ гидрогеологических систем горноскладчатых областей. / А. П. Хаустов. // – Новосибирск: Наука, 1986. – 110 с.

82. Чеботарев А. И. Общая гидрология. / А. И. Чеботарев. // – Л.: Гидрометеорология, 1975. – 544 с.

83. Чесалов С. М. Статистические методы решения гидрогеологических задач на ЭВМ. / С. М. Чесалов, Б. А. Шмагин. // – М.: Недра, 1989. – 173 с.

84. Чомко Д. Ф. Многомерный статистический анализ при исследовании

техногенного загрязнення підземних вод. / Д. Ф. Чомко, І. К. Решетов, Ф. В. Чомко, Р. Ф. Чомко. // – К.: Геологічний журнал, №2 ІГН НАН України, 2002. – С. 73–80.

85. Чомко Ф. В. Багатовимірний статистичний аналіз в гідрогеології. Навчальний посібник. / Ф. В. Чомко, І. К. Решетов, Д. Ф. Чомко, Р. Ф. Чомко. // – К.: Видавничий центр Київ. нац. ун-ту, 2004. – 114 с.

86. Шестаков В. М. Формирование вод повышенной жесткости в зоне разгрузки грунтовых вод конуса выноса. / В. М. Шестаков, Ю. М. Марин. // – М.: Вест. МГУ, Сер. 4, № 4. Геология. Изд-во МГУ, 1996. – С. 91–95.

87. Шварцев С. Л. Общая гидрогеология. / С. Л. Шварцев. // – М.: Изд-во Недр, 1996. – 285 с.

88. Штеклин Й. Тектоника Азии. / Й. Штеклин. // – М.: Недр. Материалы междунар. геолог. конгр., том 5, 1984. – С. 53–68.

89. Aghanabati A. Geology of Iran. / A. Aghanabati. // – Farsi: Ministry of Industry and Mines, Geological Survey of Iran, 2006. – 576 p.

90. Aghdam J. A. Hydrogeology of gypsum formations in the south of Iran. / J. A. Aghdam. // – Shiraz: Ph. D. thesis University of Shiraz, 2012. – 120 p.

91. Aghdam J. A. The Karun River waters in the Ambal ridge region (Zagros mountain Range, southwestern Iran): mixing calculation and hydrogeological Implications. / J. A. Aghdam M., Zare, B. Capaccioni, E. Raeisi, P. Forti // Carbonates and Evaporites. 2012, doi:10.1007/s13146-012-0083-8.

92. Alavi M. Tectonophysics. / M. Alavi. // – Isfahan: 1994. – 229 p.

93. Amjadi Aziz. Investigation of Chlorine and Electrical Conductivity Maps According to Pumping Tests and Groundwater Levels in The Hamedan Plain. / Aziz Amjadi, Elham Rahbar, Vand Mahmond. // E.M.T Applied mathematics in Engintring, Management and Technology. 1 (3), 2013. – p. 142–153.

94. Amjadi Aziz. Case Record of Multivariate Statistical Analysis in the Groundwater Study of the Western Part of Iran. / Aziz Amjadi, Dmytro Fedorovich Chomko, Rahbar Elham. // J. Appl. Environ. Biol. Sci., 4(2s) 2014. – p. 107–120.

95. Ashjari J. Lithological control on water chemistry in karst aquifers of the Zagros Range. / J. Ashjari, E. Raeisi. // *Iran: Cave and Karst Science*, v. 33, no. 3, 2006. – p. 111–118.
96. Ashley R. P. An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. / R. P. Ashley and J. W. Lloyd. // *Journal of Hydrology*, 39: 1978. – 355–364.
97. Bagheri R. Leakage potential in Seymareh dam site. / R. Bagheri. //– Shiraz: M. Sc. thesis University of Shiraz (in Farsi), 2007. – 225 p.
98. Bahadori A. Geochemical analysis of evaporite sedimentation in the Gachsaran Formation. / A. Bahadori, E. J. M. Carranza, B. Soleimani. // *Zeloi oil field, southwest Iran: Journal of Geochemical Exploration*, v. 111, 2011. – p. 97–112. doi:10.1016/j.gexplo.2011.02.007.
99. Bahroudi A. Tectono-sedimentary framework of the Gachsaran Formation in the Zagros foreland basin. / A. Bahroudi, H. A. Koyi. // *Marine and Petroleum Geology*, v. 21, 2004. – p. 1295–1310. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.09.001.
100. Berberian M. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran / M. Berberian, G. C. P. King // *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 18, 1981. – p. 210–265. doi:10.1139/e81-019.
101. Birtles A. B. A simple effective method for computer simulation of ground water storage and its application in the design of water resource systems. / A. B. Birtles, M. J. Reeves. *J. of Hydrology*, , vol. 34, №1/2, 1977 – p. 77–96.
102. Boulouchi M. H. Explanatory Text of Kabudar Ahang Quadrangle Map. / M. H. Boulouchi. // Geological and Mineral Survey of Iran Publication, Geological Quadrangle D5, 1979. – 107 p.
103. Bower H. Groundwater hydrology. / H. Bower. // – Isfahan: 1978. – 177 p.
104. Braud J. Les Formations du Zagros dans la Region de Kermanshah, Iran. / J. Braud. // *Bulletin de la Societe Geologique de France, France (7)*, XIII, No 3–4, 1970. – p. 416–419 (in French).

105. Burrough P. A. Creating Continuous Surfaces from Point Data. / P. A. Burrough, M. F. Goodchild, R. A. McDonnell. // – London: Unwin Hyman, 1998. – p. 15–23

106. Cambardella C. A. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. / C. A. Cambardella, T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen, R. F. Turco, A. E. Konopka. // Soil Science Society of America Journal, Vol. 58, 1994. – p. 1501–1511.

107. Carrillo-Rivera J. J. Application of the Groundwater-Balance Equation to Indicate Interbasin and Vertical Flow in Two Semi-Arid Drainage Basins. / J. J. Carrillo-Rivera. // – Mexico: Hydrogeology Journal , Vol. 8. , No. 5, 2000. – p. 503–520.

108. Davis J. C. Statistics and Data Analysis in Geology. / J. C. Davis. // – New York: John Wiley & Sons Inc., 1986. – 647 p.

109. Delhomme J. P. Kriging in Hydrosociences. / J. P. Delhomme. // Advances in Water Resources. Vol. 1, 1978. p. 251–266.

110. Dunnington H. V. Salt-tectonic features of Northern Iraq. / H. V. Dunnington R. B. Mattox. // Saline Deposits: A Symposium Based on Papers from the International Conference on Saline Deposits, Geological Society of America Special Paper 88, 1968. – p. 183–227.

111. Edgell H.S. Salt tectonics in the Persian Gulf basin. / H. S. Edgell, G. L. Alsop, D. L. Blundell, I. Davison. // – London: Salt Tectonics, Geology Society of London, Special Publication 100, 1996. – p. 129–151. doi:10.1144/GSL.SP.1996.100.01.10.

112. Feng-Guang Y. Design of Groundwater Level Monitoring Network with Ordinary Kriging. / Y. Feng-Guang, C. Shu-You, L. Xing-Nian, Y. KeJun. // Journal of Hydrodynamics, Vol. 20, 2008. – p. 339–346.

113. Fetter C. W. Contaminant Hydrogeology. / C. W. Fetter. // – Illinois: Waveland press, Incorporate Long Grove, 1993. – 500 p.

114. Ford D. C. Principal features of evaporite karst in Canada. / D. C. Ford // Carbonates and Evaporites, v. 12, no. 1, 1997. – p. 15–23. doi:10.1007/BF03175798.
115. Ford D. C. Karst Geomorphology and Hydrology. / D. C. Ford, P. W. Williams. // – London: Unwin Hyman, 1989. – 601 p.
116. Gauss I. Geostatistical Analysis of Arsenic Concentration in Groundwater in Bangladesh Using Disjunctive Kriging. / I. Gauss, D. G. Kinniburgh, J. C. Talbot, R. Webster. // Environmental Geology, Vol.44, 2003. – p. 939–948.
117. Ghassemi F. Mathematical model application in Groundwater Studies of Iran. / F. Ghassemi // Ground Water, vol. 17, N 4, 1979. – p. 359–365.
118. Gill W. D. Sedimentology of Gachsaran Formation (lower Fars series), Southwest Iran. / W. D. Gill, M. A. Ala. // American Association of Petroleum Geologists Bulletin 56, 1972. – p. 1965–1974.
119. Claasen H. Guidelines and Techniques to Obtain Groundwater Quality Samples. / H. Claasen. // C. U.S. Geological Survey. Open Report 82–1024, Vol. 54, 1982.
120. Goovaerts P. Geostatistical Approaches for Incorporating Elevation into the Spatial Interpolation of Rainfall. / P. Goovaerts. // Journal of Hydrology, Vol. 228, 2000. – p. 113–129.
121. Griffith D. H. Applied Geophysics for Engineers and Geologists. / D. H. Griffith, E. King. // – London: Paragon press, 1965. – 223 p.
122. Grischek T. Urban groundwater in Dresden, Germany. / T. Grischek, W. Nestler, D. Piechniczek, T. Fischer. // Hydrogeology Journal, v.4, no. 1, 1996, – p. 48–63.
123. Gutie´rrez F. Geological and environmental implications of the evaporate karst in Spain. / F. Gutie´rrez, J. M. Calaforra, F. Cardona, F. Orti, J. J. Dura´ n, P. Garay. // Environmental Geology, v. 53, 2008. – p. 951–965. doi:10.1007/s00254-007-0721-y.
124. Hessami K. Progressive unconformities within an evolving foreland fold–thrust belt, Zagros Mountains. / K. Hessami, H. A. Koyi, C. J. Talbot, H. Tabasi, E.

Shabanian. // *Journal of the Geological Society*, v. 158, 2001. – p. 969–981. doi:10.1144/0016-764901-007.

125. Issar A. The groundwater provinces of Iran. / A. Issar. // «*Bull. Internat. Assoc. Scient. Hydrolog.*», 14, № 1, 1979. – p. 87–99.

126. James G. Stratigraphic nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement Area. / G. James, J. D. Wynd // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 49, no. 12, 1965. – p. 2182–2245.

127. Johnson K. S. Gypsum karst in the United States. / K. S. Johnson. // *International Journal of Speleology*, v. 25, no. 3–4, 1996. – p. 183–193.

128. Johnson K. S. Evaporite-karst problems in the United States. / K. S. Johnson, J. T. Neal. // – Oklahoma: *Evaporite Karst and Engineering. Environmental Problems in the United States*, Oklahoma Geological Survey, Circular 109, 2003. – p. 1–20.

129. Kashfi M. S. Stratigraphy and environmental sedimentology of lower Fars Group (Miocene), South–Southwest Iran. / M. S. Kashfi. // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 64, 1980. – p. 2095–2107.

130. Khosro Tehrani. Stratigraphy and formations type sections. / Tehrani Khosro. // – Tehran: University of Tehran, (in Farsi), 1987. – 260 p.

131. Klimchouk A. Environmental problems in gypsum karst terrains. / A. Klimchouk, V. Andrejchuk. // *International Journal of Speleology*, v. 25, no. 3–4, 1996, p. 145–156.

132. Klimchouk A. Gypsum karst of the World: a brief overview. / A. Klimchouk, P. Forti, A. Cooper. // *International Journal of Speleology*, v. 25, no. 3–4, 1996. – p. 159–181.

133. Livingstone D. A. Chemical composition of River and Lakes, Iran. / D. A. Livingstone. // – Washington: U. S. Gov. print. Off., 1963. – 64 p.

134. Mahab Ghodss. Consulting Engineers Slope Stability Analysis of the Reservoir. / Ghodss Mahab. // *Upper Gotvand Dam, Iran Water & Power Resources Development Company*, 2009. – 48 p.

135. Maximovitch G.A. Karst of gypsum and anhydrite of the globe (geotectonical relations, distribution, and major peculiarities). / G. A. Maximovitch. // – Moscow: *Obshchiye voprosi karstovedeniya*. 1962. – p. 108–113 (in Russian).

136. Mostofi B. The main sedimentary basins of Iran and their oil possibilities. / B. Mostofi, E. Frei. // – New York: *Proceedings, 5th World Petroleum Congress*, section 1, paper 17, 1959. – 10 p.

137. Motiei H. Treatise on the geology of Iran – stratigraphy of Zagros. / H. Motiei, Editor-in-Chief, A. Hushmandzadeh. // – Tehran: Geological Survey of Iran, (in Farsi). 1993. – 536 p.

138. Murriss R. J. Middle East stratigraphic evolution and oil habitat. / R. J. Murriss. // American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 64, 1980. – p. 597–618.
139. Nadl M. Rerouting of the Kor River from the Zagros Region into the Persian Gulf, Iran. / M. Nadl. // – Tehran: Z. angew. Geol. 43, 1997. – p. 35–39.
140. O'Brien C. A. E. Salt diapirism in South Persia. / C. A. E. O'Brien. // Geologie en Mijnbouw, v. 19, 1957. – p. 357–376.
141. Oveisi B. Resume of Kelestan geological map report, scale 1:100000. / B. Oveisi. // – Tehran: Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, sheet No. 6449, 2001.
142. Payrowan E. The effects of geological Formation on the water resource Quality. / E. Payrowan. // – Isfahan: Proceeding of the 8th International conference on rain water catchments system, 1997. p. 37–46.
143. Raeisi E. The effect of evaporitic formations on the quality of karst water. / E. Raeisi, F. Moore. // – Tehran: Iranian Journal of Science & Technology, v. 17, no. 2, 1993. – p. 91–103.
144. Rahimi M. Effect of rainfall, temperature, geological factors, and level base of erosion on characteristics of Asmari-Jahrum Formations in south-central Iran. / M. Rahimi, // – Shiraz: University of Shiraz, (in Farsi). M. Sc. thesis, 2006. – 163 p.
145. Reghunath R. The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India. / R. Reghunath, Murthy Sreedhara, B.R. Raghavan. // – Karnataka: Water Research. 36, 2002. – p. 243–254.
146. Samani N. On the application of a numerical groundwater model to the Sarvestan basin, Fars province, Iran. / N. Samani. // – Isfahan: Regional Conference on Water Resources Management, 1995. – p. 23–25.
147. Stocklin J. Salt deposits of the Middle East, in Mattox / J. Stocklin. // Saline Deposits: A Symposium Based on Papers from the International Conference on Saline Deposits, Geology Society of America, Special Paper 88, 1968. – p. 157–181.
148. Stocklin J. Stratigraphic Lexicon of Iran, inistry of Industry and Mines, Geological Survey of Iran. / J. Stocklin, A. Setudehnia. // – Tehran: Report No. 18-1971, Second Edition, 1977. – 370 p.
149. Switzer P. Principles of Geographic Information Systems. / P. Switzer, M. Worboys. // – Oxford: Oxford University PressUK, 2006 – 143 p.
150. Talbot C. J. The past of a future syntaxis across the Zagros. / C. J. Talbot, M. Alavi, G. I. Alsop, D. J. Blundell, I. Davison. // – London: Salt Tectonics. Geological Society of London Special Publication 100, 1996. – p. 89–109. doi:10.1144/GSL.SP.1996.100.01.08.

151. Todd D. K. Groundwater Hydrology. / D. K. Todd. // JOHN WILEY SONS 1975. – p. 143–154

152. Vahidi I. Groundwater investigations in Iran. / I. Vahidi. // – Tehran: «U. N. Publ., Water Resources Ser.». 1963. № 24, p. 107–109.

153. Wright Alan. Artificial recharge of urban wastewater, the key component in the development of an industrial town on the arid west coast of South Africa. / Alan Wright and Irene du Toit. // – Tehran: Hydrogeology Journal, v.4, no. 1, 1996, – p. 118–129.

154. Zohdy A. A. Application of Surface Geophysics to Groundwater Investigations. / A. A. Zohdy, G. P. Eaton, D. R. Mabey. // – New York: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 2, (Chapter D1), 1974. – 116 p.

155. Zohdy A. A. Method for Automatic Interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding Curves. / A. A. Zohdy. // New Geophysics, Vol. 5, No. 2, 1989. – p. 245–252.

Фондовая

156. Геологический и гидрогеологический отчеты Ширазского бассейна № 396, фирма Махабкодс. 1986.

157. Геологический отчет № 420-327-859 National Karst Research Center (NKRC), 1996.

158. Гидрохимические отчеты №№1, 2. О качестве соли озера Махарлу. – Кучмешкиан. М., фирма Параб 1994.

159. Гидрогеологический отчет № 420-64-149. О артезианском бассейне Махарлу. National Karst Research Center (NKRC), 1980.

160. Гидрогеологический отчет: Фарская зональная водная компания, 1994, 1995.

161. Отчеты №№ 1, 4. О изучении обоснования дренажа на территории города Шираз, фирма Параб. 1996.