

На правах рукописи



Лам Хоанг Куок Вьет

**ВОЗРАСТ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВОД ВЕРХНЕ- И
НИЖНЕ-ПЛИОЦЕНОВЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ
ДЕЛЬТЫ Р. МЕКОНГ, ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНО-
ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 1.6.6 – гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) на кафедре гидрогеологии им. В.М. Швеца.

Научный руководитель: **Лисенков Александр Борисович**, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца МГРИ

Научный консультант: **Лаврушин Василий Юрьевич**, доктор геолого-минералогических наук, зам.директора ГИН РАН

Официальные оппоненты: **Харитоновна Наталья Александровна**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
Брагин Иван Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий специалист, руководитель лаборатории Геохимии гипергенных процессов ДВГИ ДВО РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН

Защита состоится «22» июня 2023 г. в 16:00 ч. в ауд. 4-73 на заседании диссертационного совета 24.2.364.01 в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ).

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просьба направлять по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), ученому секретарю диссертационного совета 24.2.364.01.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.364.01
канд. геол.-минерал. наук, доцент



Горобцов Денис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность работы

Дельта р. Меконг – регион, расположенный в юго-западной части Вьетнама. Река представлена двумя ее протоками Хау и Тянь на участке их впадения в Восточное море. Дельта занимает площадь 40577 км². Население региона составляет около 18-ти млн. человек. Для территории характерен тропический муссонный климат с влажным и сухим сезонами. Среднегодовое количество осадков варьирует от 1400 до 2400 мм в год, причем более 90% ежегодных осадков выпадает в влажном сезоне (с мая по ноябрь) и менее 10% в сухом (с декабря по апрель). Эта территория – самый продуктивный сельскохозяйственный регион страны. Однако, изменение глобального климата отрицательно сказывается на поверхностных водных ресурсах и вызывает дефицит водообеспечения в сухом сезоне. Результаты исследований и оценки воздействий изменения глобального климата на подземные водные ресурсы в дельте Меконга показали, что эксплуатация четвертичных водоносных горизонтов не решает всех проблем водоснабжения региона. Также следует учитывать, что качество и водообильность неглубоких водоносных горизонтов напрямую зависит от изменения климата и антропогенного загрязнения. Поэтому в планировании эксплуатации подземных вод дельты р. Меконг наибольшие перспективы, обеспечивающие устойчивое развитие региона, связываются с плиоценовым водоносным комплексом.

Однако гидрогеологические особенности формирования вод плиоценовых водоносных горизонтов изучены недостаточно. Несмотря на относительно хорошую гидрогеологическую защищенность от влияния поверхностных загрязнений, в них местами встречаются соленые воды, непригодные для использования. Распределение пресных и минерализованных вод в водоносных горизонтах неогенового возраста носит очень сложный и неоднородный характер, что затрудняет разработку оптимальной схемы их эксплуатации. Решить эту проблему можно, применяя наряду с геохимическими и гидродинамическими исследованиями, результаты изучения изотопного состава О и Н, а также данные радиоуглеродного датирования подземных вод в различных частях бассейна р. Меконг.

Использование таких комплексных результатов исследований является актуальным вопросом и послужит основой для разработки научно-обоснованной схемы эксплуатации подземных вод плиоценовых водоносных горизонтов в дельте р. Меконг. Последняя направлена на обеспечение рационального потребления водных ресурсов и сохранение в длительной перспективе оптимального качества подземных вод в густонаселенных районах Вьетнама.

Цели и задачи исследований

Цель данной работы – исследование гидрогеологических условий и особенностей формирования химического состава подземных вод верхне- и нижнеплиоценовых водоносных горизонтов в дельте р. Меконг.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведение исследований изотопного состава кислорода и водорода водной фазы для оценки роли метеорных, речных, морских и седиментационных вод в формировании водного баланса разновозрастных водоносных горизонтов дельты р. Меконг.

2. Определение связи факторов для определения формирования и смешения различных геохимических типов вод, изучение сложного и неоднородного характера распределения минерализованных и пресных вод верхне- и нижнеплиоценовых водоносных горизонтов в дельте р. Меконг по построенным графикам корреляции.

3. Исследование методом радиоуглеродного датирования (^{14}C) возраста формирования вод верхне- и нижнеплиоценовых водоносных горизонтов, определение местоположения областей их питания, направления их движения и областей разгрузки.

4. Оценка величины инфильтрационного питания водоносных горизонтов на основе изотопных данных.

5. Повышение точности полученных результатов и построение специализированных карт методом геостатистической интерполяции.

6. Исследование процессов формирования солевого состава методами термодинамического моделирования процессов взаимодействия инфильтрационных вод с водовмещающими породами.

Научная новизна

На основе полученных результатов построенная концептуальная модель формирования подземных вод водоносных горизонтов дельты р. Меконг за счёт инфильтрации метеорных вод заменит существовавшие ранее взгляды на седиментагенный генезис подземных вод. В результате авторских исследований было оценено влияние разломов на движение потока подземных вод и также доказана гидравлическая взаимосвязь между водоносными горизонтами в области этих разломов.

Построение карт изменения возрастов, минерализации, pH подземных вод различных горизонтов позволило рассмотреть закономерности формирования солевого состава вод и определить основные пути поступления загрязняющих веществ.

Существенное различие в корреляционных зависимостях между расчетными значениями модели и фактическими значениями в случаях

многопеременных ($K_{\text{корр}} = 0,9$) и однопеременных данных ($K_{\text{корр}} = 0,6$) показало эффективность геостатистической интерполяции «Кокригинг» для повышения точности полученных результатов при построении специализированных карт.

Дана оценка величины инфильтрационного питания глубоких водоносных горизонтов по радиоуглеродным данным, которая не учитывалась в предыдущих исследованиях. Она позволяет уточнить эксплуатационные запасы подземных вод дельты р. Меконг.

Практическое значение

Результаты исследования изотопного состава О и Н для вод плиоценовых и четвертичных водоносных горизонтов дают представление о региональных закономерностях формирования их водного баланса и, наряду с результатами гидродинамических и гидрохимических исследований, могут быть использованы для построения локальных и региональных гидрогеологических моделей.

Проведенные исследования дают основу для разработки оптимальной схемы эксплуатации системы водозаборов, и позволяют минимизировать риски снижения качества воды за счет вторжения солёных вод в пределы эксплуатируемых водоносных горизонтов.

Разработана и апробирована методика применения геостатистической интерполяции «Кокригинг» для обработки многопеременных данных в гидрогеологии. С её помощью можно существенно повысить точность построения различных гидрогеологических и гидрохимических карт, что обеспечивает повышение качества прогноза различных характеристик и параметров гидрогеологической среды.

Впервые для плиоценовых горизонтов дана количественная оценка величины инфильтрационного питания, которая существенно позволяет уточнить расчеты водного баланса для этих горизонтов.

Защищаемые положения

Первое защищаемое положение

Исследованиями изотопного состава кислорода и водорода подземных вод в дельте Меконга установлено, что воды плиоценового водоносного комплекса в основном формируются за счёт инфильтрации метеорных вод. Минерализованные воды, которые также встречаются в этом водоносном комплексе, формируются в результате смешения инфильтрационных (пресных и изотопно-легких) и седиментационных вод, изначально имеющих морской генезис. Доказана связь минерализованных вод с Фландрской трансгрессией, начавшейся около 21 тыс. лет назад и закончившейся 4,2 тыс. лет назад.

Второе защищаемое положение

По данным определения радиоуглеродного возраста подземных вод дельты р.Меконг построены карты изменения возрастов вод верхне- и нижнеплиоценового водоносных горизонтов. Их анализ показывает, что региональная область питания для плиоценового водоносного комплекса располагается на северо-востоке дельты р. Меконг. Эти данные позволили также оценить средние скорости движения подземных вод. Они составляют 8 м/год для верхнеплиоценовых и 5,4 м/год для нижнеплиоценовых горизонтов. Так же дана оценка величины инфильтрационного питания, она оценивается как 9×10^5 м³/сут. Применение геостатистической интерполяции «Кокригинг» для случая многопеременных данных позволяет повысить точность полученных результатов при построении специализированных карт для территории Вьетнама.

Третье защищаемое положение

С использованием методов термодинамического моделирования исследованы процессы формирования солевого состава вод при взаимодействии с водовмещающими породами и/или смешении вод различного генезиса. На основе созданной равновесно-кинетической модели формирования вод плиоценового водоносного комплекса, совместно с полученными ранее данными изотопных исследований, было выполнено районирование территории исследования по условиям формирования подземных вод.

Личный вклад автора

В основе диссертационной работы лежат результаты исследований, полученные автором при проведении проектных работ в области изучения ресурсного потенциала и эксплуатационных запасов подземных вод в Центре ядерной техники города Хошимин, Вьетнам. Автор принимал участие как в отборе и анализе образцов воды, так и занимался построением моделей и специализированных карт.

Вклад автора состоит из:

Определения расположения точек отбора проб подземных вод и атмосферных осадков.

Установки станций мониторинга атмосферных осадков.

Сбора образцов подземных вод и атмосферных осадков в полевых условиях, определения их физических параметров.

Проведения экспериментов по определению значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD , а также концентрации радиоизотопного ^{14}C , обработке результатов экспериментов и построения специальных графиков.

Построения специализированных карт. В частности, автор предложил геостатистические приложения, которые позволили повысить точность процесса интерполяции.

При участии автора также выполнена серия термодинамических расчетов, моделирующих процессы формирования солевого состава вод.

Апробация работы

Результаты исследований и основные положения диссертационной работы были доложены на многочисленных конференциях, совещаниях, симпозиумах, выставках, в том числе:

1. Научной международной конференции Хошиминского технологического университета, «Геология и Нефть», 2016.

2. На Совещаниях проекта «Оценка глубоких подземных водных ресурсов для устойчивого управления по использованию изотопных технологий» (RAS/7/030 IAEA/RCA first project coordiNatioN meetiNg), г.Хошимин, Вьетнам, 2016.

3. Международной конференции по «Чистой Воде, Воздуху и Почве» (CleaNWAS2017). 25-27 августа 2017 года. Бангкок, Таиланд, 2017.

4. Международной научно-практической конференции «Стратегия Развития Геологического Исследования Недр: Настоящее и Будущее» (к 100-летию МГРИ–РГГРУ), 2018.

5. XIV Международной научно-практической конференции "Новые идеи в науках о Земле", 2019.

6. На Совещаниях проекта «Применение изотопных методов для исследований глубоких подземных водных ресурсов в дельте Меконга», Центр Ядерной Техники г.Хошимина, Вьетнам, 2019.

Публикации

Положения работы изложены в 8 публикациях, две из которых рекомендованы ВАК.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Она содержит 162 страниц текста, сопровождается 25 таблцами, 55 рисунками и списком литературы из 92 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н., профессору А.Б. Лисёнкову за всестороннюю помощь в подготовке и написании работы, своему научному консультанту профессору В.Ю. Лаврушину и всему коллективу кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца МГРИ за полученные критические замечания и рекомендации в процессе подготовки работы на кафедре.

Автор глубоко признателен О.А.Лиманцевой за успешное сотрудничество и постоянное внимание к работе, за поддержку и ценные советы.

Автор благодарит за сотрудничество и неоценимую помощь наставников и коллег из центра ядерной техники г.Хошимина (Вьетнам), с которыми появилась возможность сформировать основные направления проведенных исследований.

Особую признательность и благодарность автор выражает семье и российским друзьям за поддержку и помощь на протяжении всего жизненного пути.

Введение

Объектом исследования диссертации являются водоносные горизонты в дельте р. Меконг, которая представляет собой кайнозойские бассейны региона, сложенные в основном алювиально-морскими отложениями. Кроме того, местами встречаются отложения и другого происхождения: озерные и озерно-болотные и некоторые другие типы. Именно за счёт сложности геологических, гидрогеологических и тектонических условий, областью исследования является не только дельта, но и вся территория Юго-Восточной области Вьетнама (рис. 1).

Статические запасы подземных вод в дельте р. Меконг составляют 61.637.315 м³/сут. Они сосредоточены в голоценовых (qh), плейстоценовых (qr₃, qr₂₋₃, qr₁), плиоценовых (n₂², n₂¹, которые являются объектом исследования) и миоценовых (n₁³) отложениях, содержащих преимущественно поровые и трещинные воды в четвертичных базальтах и докембрийских образованиях. Особенность гидрогеологических условий региона в том, что многие части разреза содержат воды с повышенной минерализацией. Запасы пресных подземных вод ограничены, и их распределение весьма неравномерное, как по площади, так и по разрезу.

ГЛАВА 1

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОЛОГО- ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ ДЕЛЬТЫ Р. МЕКОНГ

В этом разделе представлены физико-географические, геологические, гидрогеологические условия дельты р. Меконг, которые связаны с процессами формирования, качества или количества подземных вод, и т.д. Результатом гидрогеологической стратификации в дельте Меконга являются 10 горизонтов, среди которых 8 водоносных горизонтов, от голоценового до миоценового возрастов, 1 водоносный горизонт в базальтах и 1 водоносный горизонт в докайнозойском фундаменте. Кроме гидрогеологической стратификации, дельта Меконга была разделена на 4 гидрогеологических бассейна (рис. 1 и 2), характеризующихся общностью геологического развития и формированием

гидрогеодинамических, гидрогеологических и гидрогеотермических процессов. Их границами являются большие разломы дельты р. Меконг.

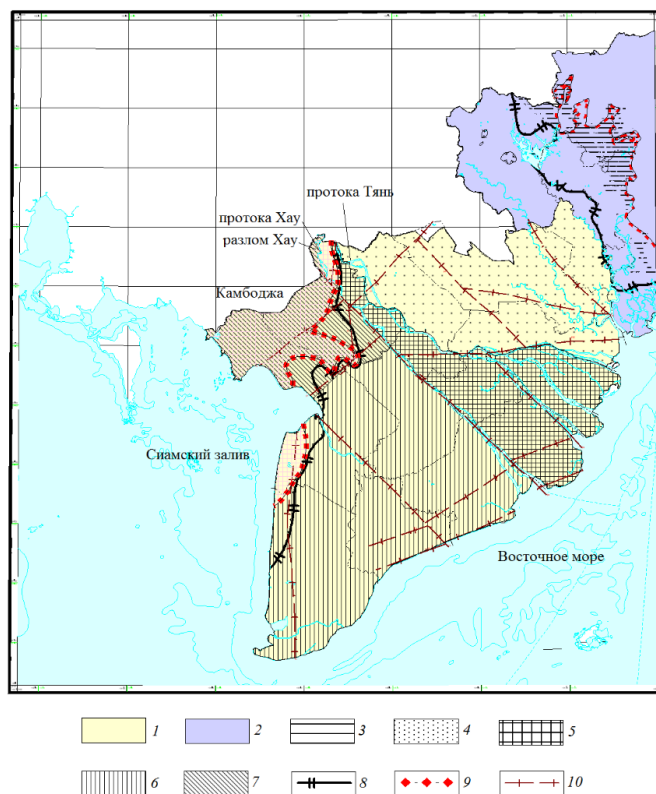


Рисунок 1 – Гидрогеологические характеристики дельты р. Меконг [До Т.Х., 2004]: 1 – дельта р. Меконг; 2 – Юго-Восточная область Вьетнама; 3 – отложение плиоценовых возрастов; 4-7 – 1-4-ый гидрогеологические бассейны; 8-9 – граница верхне- и нижнеплиоценового водоносных горизонтов; 10 – разломы;

Кроме того, в этой главе также описаны проблемы пресного водоснабжения дельты р. Меконг. Результаты оценки ресурсного потенциала подземных вод здесь показали, что запасы подземных вод здесь велики. Однако, их изученность и ресурсная оценка плохо детализированы. Поэтому, при их эксплуатации возникают большие трудности в плане сохранения качества и ресурсов подземных вод. При этом эксплуатация четвертичных водоносных горизонтов не решает всех проблем водоснабжения региона (табл. 1). Например, водоотбор из горизонта qr_{2-3} превышает его эксплуатационные возможности. Также следует учитывать, что качество и водообильность неглубоких водоносных горизонтов (qh , qr_3 , qr_1) напрямую зависит от изменения климата, вторжения морской солёной воды и антропогенного загрязнения. Поэтому в планировании эксплуатации подземных вод дельты р. Меконг наибольшие перспективы связывают с плиоценовыми водоносными горизонтами. Их общие потенциальные запасы (водоносные горизонты p_2^1 и p_2^2) составляют $22.537.288 \text{ м}^3/\text{сут.}$,

что составляет 36,6% от общих запасов подземных вод всего региона. Однако, из этой суммы запасы пресной воды составляют только 9.462.773 м³/сут. (42% от общих запасов пресной воды).

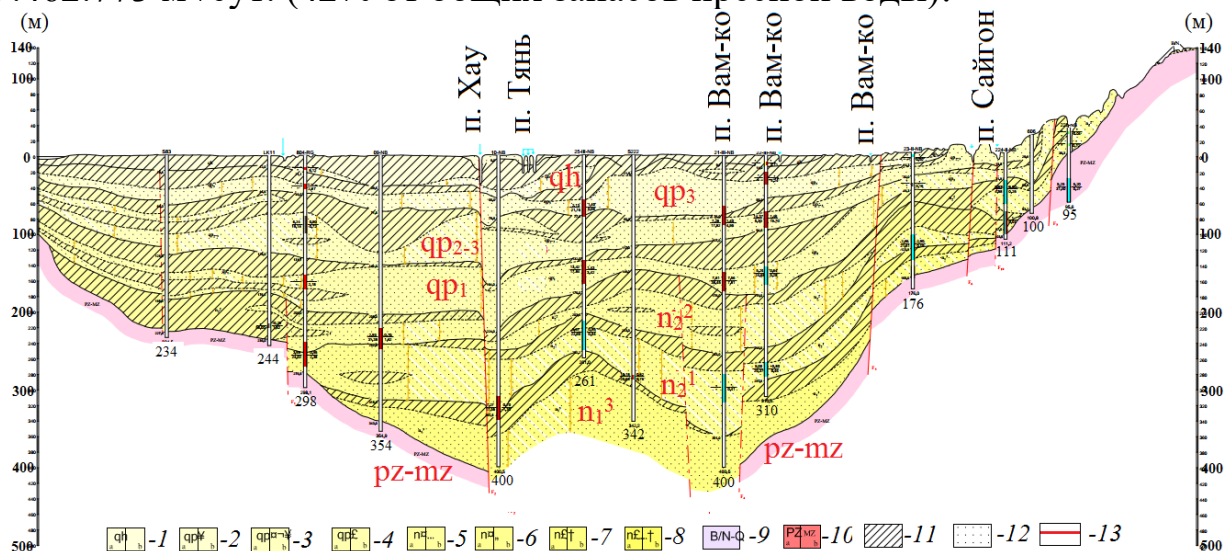


Рисунок 2 – Гидрогеологический разрез по линии II [До Т.Х., 2004]:

- 1-10 геологический возраст: 1 – голоценовых (qh);
 2 – верхнеплейстоценовых (qp₃); 3 – среднеплейстоценовых (qp₂₋₃);
 4 – нижнеплейстоценовых (qp₁); 5 – верхнеплиоценовых (n₂²);
 6 – нижнеплиоценовых (n₂¹); 7 – верхнемиоценовых (n₁³);
 8 - средне-верхнемиоценовых (n₁²⁻³); 9 – базальтах (b/n-q);
 10 - докайнозойского фундамента (pz-mz); 11 – водоупорный горизонт;
 12 – водоносный горизонт; 13 – разломы;

Таблица 1 – Характеристика эксплуатации подземных вод
в дельте р. Меконг

Водоносные горизонты	Оцененные эксплуатационные запасы, м ³ /сут.	Фактический эксплуатационный расход подземных вод в 2010г, м ³ /сут.	Эксплуатационные возможности водоносных горизонтов, м ³ /сут.
qh		17,851	
qr ₃	400.421	114.945	285.476
qr ₂₋₃	888.328	977.514	-89.186
qr ₁	720.484	130.077	590.407
n ₂ ²	879.731	477.359	402.372
n ₂ ¹	1.012.824	87.652	925.172
n ₁ ³	600.809	118.235	482.574
всего	4.502.597	1.905.782	2.596.815

ГЛАВА 2

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕЗИСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ДЕЛЬТЕ Р. МЕКОНГ

В этой главе рассматриваются результаты гидрогеологических исследований, ориентированных на изучение генезиса подземных вод в дельте р. Меконг.

Первый частично связан с работами французских геологов, ориентированных на изучение общих геолого-гидрогеологических условий региона (до 1975г.) и региональными исследованиями вьетнамских специалистов для целей строительства и водоснабжения в регионе.

До 1982 года, результаты исследований, которые были сделаны профессором Нгуен К.К., показывали, что происхождение подземных вод дельты р. Меконг является седиментационным, а они не имеют гидравлическую взаимосвязь между водоносными горизонтами.

После 1982 года, изотопная гидрогеология начала использоваться для изучения формирования подземных вод в неглубоких горизонтах (qh, qr₃, qr₂₋₃, qr₁) профессорами Чан К. Т., Arranyossy J.F., Нгуен К.Ч., До Т.Х и др, показывали, что подземные воды неглубоких горизонтов формируются в основном за счёт инфильтрации метеорных вод. Пресные – инфильтрационные воды имеют современный генезис и движутся из области питания на территории дельты р. Меконг и Камбоджи. А минерализованные имеют морской генезис. Кроме того, обнаружено, что подземные воды в неглубоких горизонтах имеют гидравлическую связь друг с другом и с рекой Меконг. А глубокие

водоносные горизонты еще не исследованы. Кроме того, после 2001г. было установлено, что плиоценовый водоносный горизонт имеет 2-х членное строение и были выделены верхний и нижний плиоцен. Поэтому результаты исследования этого горизонта до 2001г. признаны некорректными и вопрос происхождения подземных вод дельты р. Меконг не был окончательно урегулирован, поскольку количество отобранных проб не было достаточным, и сам отбор проб был выполнен только в верхней части горизонта.

В целом, гидрогеологические исследования, ранее проведенные в дельте р. Меконг, не позволили однозначно решить вопросы происхождения и направления движения подземных вод. Определение области питания и разгрузки является вопросом, который вызывает много проблем для планирования эксплуатации подземных вод в изучаемом регионе. Основные гидрогеологические исследования сосредоточены в верхней части разреза в плиоцене, что связано с решением актуальных проблем водоснабжения. Количество проб, характеризующих воды глубоких горизонтов, было недостаточно для детального изучения проблемы. Кроме того, проведенные ранее исследования не давали однозначных представлений о генезисе и процессах формирования солевого и водного баланса подземных вод.

ГЛАВА 3

ГЕОЛОГО–ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕ- И НИЖНЕПЛИОЦЕНОВОГО ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ РАЙОНА ДЕЛЬТЫ Р. МЕКОНГ

Главными объектами исследования диссертации являются верхне- и нижнеплиоценовый водоносные горизонты, использующиеся в первую очередь в планировании эксплуатации подземных вод района дельты р. Меконг.

а. Верхнеплиоценовый водоносный горизонт (n_2^2)

Верхнеплиоценовый водоносный горизонт (n_2^2) имеет региональное распространение в центральной части дельты р. Меконг. В западной части дельты он распространен на территории провинций Киен-Жанг, Ан-Жанг и Ха-Тиен (рис. 1). Этот водоносный горизонт выходит на поверхность в Юго-восточной области (рис. 1), которая включает в себя провинции Донг-Наи, Биен-Хоа. Породы водоносного горизонта представлены в основном песком с гравием, супесью, алевроитом аллювиального (а), морского (м), аллювиально – морского (ам) генезиса.

Глубины залегания кровли и подошвы горизонта имеют тренд к увеличению по направлению с северо-востока на юго-восток и с запада-северо-запада на юго-юго-восток (рис. 2). Подземные воды горизонта n_2^2 являются высоконапорными. Средняя глубина залегания

варьирует в диапазоне от 89-ти до 200 м. Максимальная глубина достигает 260 м. Мощность этого горизонта колеблется от 35 до 80 м.

Таким образом, водоносный горизонт n_2^2 распространен широко и непрерывно, и площадь его распространения составляет 36267 км². Средняя мощность горизонта колеблется в диапазоне от 60 до 80 м. Абсолютная отметка пьезометрического уровня варьирует в диапазоне от 0 м до -19 м, и имеет ежегодный тренд снижения. Распределение пресных и минерализованных вод в этом водоносном горизонте носит очень сложный и неоднородный характер. Химический состав в основном $\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ и Cl-Na . Общая минерализация менее 1 г/л.

б. нижнеплиоценовый водоносный горизонт (n_2^1)

Так же, как и верхнеплиоценовый водоносный горизонт (n_2^2), нижнеплиоценовый (n_2^1) имеет широкое распространение в центре дельты, за исключением западной её части, включающей в себя провинции Киен-Жанг, Ан-Жанг, Ха-Тиен (рис. 1). Этот водоносный горизонт выходит на поверхность в Юго-Восточной области (рис. 1), которая включает в себя провинции Донг-Наи, Биен-Хоа. Породы водоносного горизонта сложены в основном песком с дресвой и гравием, супесью, алевритом, аллювиального (а), морского (м), аллювиально – морского (ам) генезиса.

Подземные воды горизонта n_2^1 являются высоконапорными. Кровля горизонта сложена в основном алевритами, суглинками. Средняя глубина кровли вышележащего водоупорного горизонта варьирует от 196,5 м до 281,1 м, а его мощность 11,8 – 20, мощность водоносного горизонта n_2^1 колеблется от 56,4 м до 84,9 м (рис. 2).

Таким образом, водоносный горизонт n_2^1 распространен широко и непрерывно, его площадь составляет 34546 км². Средняя мощность колеблется от 56,4 до 84,9 м. Пьезометрический уровень варьирует от -2 м до -16 м, и имеет ежегодный тренд снижения. Распределение пресных и минерализованных вод в этом водоносном горизонте носит очень сложный и неоднородный характер. Виды выражения химического состава в основном $\text{HCO}_3\text{-Na}$, Cl-Na и $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$. Общая минерализация менее 1 г/л.

ГЛАВА 4 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методы определения возраста и условий формирования подземных вод дельты р. Меконг, которые использовались для этого исследования: первый – изотопный гидрогеологический метод, использовался для оценки возраста, происхождения воды и движения в гидрологическом цикле; второй – термодинамическое моделирование, которое позволяет произвести расчет равновесного состава подземных

вод дельты р. Меконг для определения их формирования при смешении различных геохимических типов вод. Также, геостатистический метод «кокригинг» использовался для анализа многопеременных данных при решении задач, направленных на повышение точности интерполяции полученных результатов при построении специализированных карт.

Изотопный гидрогеологический метод

Определение условий формирования подземных вод и движения в гидрогеологическом цикле основано на процессе изотопного обмена кислорода (^{18}O) и водорода (D), приводящего к изменению распределения изотопов или изменению изотопно-обменных равновесий из-за испарения и конденсации влаги, осаждения вещества, взаимодействия в различных геохимических системах. Анализ получаемых данных на графиках корреляции между значением стабильных изотопов водорода и кислорода (δD и $\delta^{18}\text{O}$), по сравнению с линией Крэйга, позволяет определить происхождение подземных вод.

Для подземных вод, формирующихся в основном за счёт инфильтрации метеорных вод, возраст представляет собой время добегания, которое определяется по расстоянию от области питания до участка опробования и по средней действительной скорости потока на этом отрезке его движения. Следовательно, определение возраста подземных вод и построение карты возраста подземных вод позволит решить проблемы формирования подземных вод, а также определить область питания, разгрузки, скорость и направление потока.

Однако, серьезным недостатком этого метода является то, что ^{14}C входит в состав не молекул воды, а растворенных в ней компонентов (солей, газов, органических веществ), которые непрерывно поступают в воду в разное время в результате различных процессов, приводящих к изменению остаточного содержания радиоуглерода в начальных инфильтрационных водах. Это влияет на точность определения датирования подземных вод в дельте Меконга, подробнее о котором написано в пятой главе.

Геостатистический метод

Проблемой проведения анализа данных возраста подземных вод дельты р. Меконга является малое количество измерений по интересующей переменной (возраст подземных вод), но есть много измерений других переменных (концентрация химических составов, отметки глубин опробования, пьезометрический уровень, и т. д.). Встает вопрос, как можно использовать всю собранную информацию, чтобы решить задачи, направленные на повышение точности полученных результатов.

В рамках многопеременной геостатистики существует модель совместной пространственной интерполяции нескольких коррелированных переменных — кокригинг. Кокригинг позволяет значительно улучшить качество оценки, перейти из области экстраполяции в область интерполяции, уменьшить ошибку оценки за счет использования дополнительной информации по коррелированным переменным.

Термодинамическое моделирование

Для анализа процесса формирования качественного состава подземных вод с позиции системы взаимодействия «вода-порода-газы атмосферы» целесообразно привлечение методов физико-химического компьютерного моделирования, позволяющих проследить особенности процессов геохимической эволюции системы. В основу численного моделирования положен программный комплекс HCh for Windows (v.4.6). Его особенность заключается в расчете равновесных составов гидрогеохимических систем по алгоритмам, задаваемым самим пользователем.

ГЛАВА 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЕЛЬТЫ Р. МЕКОНГ

Результаты исследований для определения формирования подземных вод верхне- и нижнеплотцового водоносных горизонтов дельты р. Меконг по данным изучения изотопов и термодинамического моделирования позволяют сделать следующие выводы:

Результаты исследования стабильных изотопов О и Н:

Пополнение баз данных по изотопам кислорода и водорода по результатам мониторинга изотопного состава атмосферных осадков дельты р. Меконг позволяет построить график «ЛЛМВ» [Нгуен К.Ч., 2015] (линия локальных метеорных вод для дельты р. Меконг), который характеризуется линейной зависимостью между δD и $\delta^{18}O$:

$$\delta D = 6,55\delta^{18}O + 4,69,$$

где δD , $\delta^{18}O$ — значения стабильных изотопов водорода и кислорода в атмосферных осадках.

Изучение условий формирования подземных вод с помощью стабильных изотопов O и H выполнялось путем сопоставления изотопного состава различных типов вод исследуемого региона с ЛЛМВ, линией смешения подземных и морских вод («ЛСПМ») и линией Крэйга (мировой стандарт для метеорных и поверхностных вод) (рис. 3).

Наряду с анализом значений $\delta^{18}O$ в зависимости от концентрации хлор-иона в водоносных горизонтах неогенового возраста (рис. 4), получены следующие результаты:

1. Результаты исследований показывают, что подземные воды в дельте р. Меконг формируются в основном за счёт инфильтрации метеорных вод. Отметим, что эксплуатационные возможности водоносных горизонтов ограничены и чрезмерная эксплуатация прежде всего верхне-средне-плейстоценового (qp_{2-3}) водоносного горизонта может привести к ухудшению качества подземных вод.

2. Значения содержаний изотопов ^{18}O и D для подземных вод верхнеплиоцена (n_2^2), нижнеплиоцена (n_2^1) и миоцена (n_1^3) расположены на линии смешения подземных вод с морской водой (рис. 4). Этот факт подтверждается корреляцией между концентрацией хлоридов и значения изотопа ^{18}O . Таким образом, формирование водного и солевого баланса этих горизонтов имеет сложный характер и происходит как минимум за счет двух источников: пресных инфильтрационных и минерализованных седиментационных вод. Это необходимо учитывать при разработке схемы эксплуатации водных ресурсов этих горизонтов и организации текущего мониторинга за качеством добываемых вод.

3. Выявлена устойчивая тенденция снижения значений $\delta^{18}O$ и δD от верхней части разреза к более глубоким водоносным горизонтам. Эта тенденция отражает различную удаленность областей питания разновозрастных водоносных горизонтов в континентальной части региона и их различие в гипсометрическом положении в рельефе.

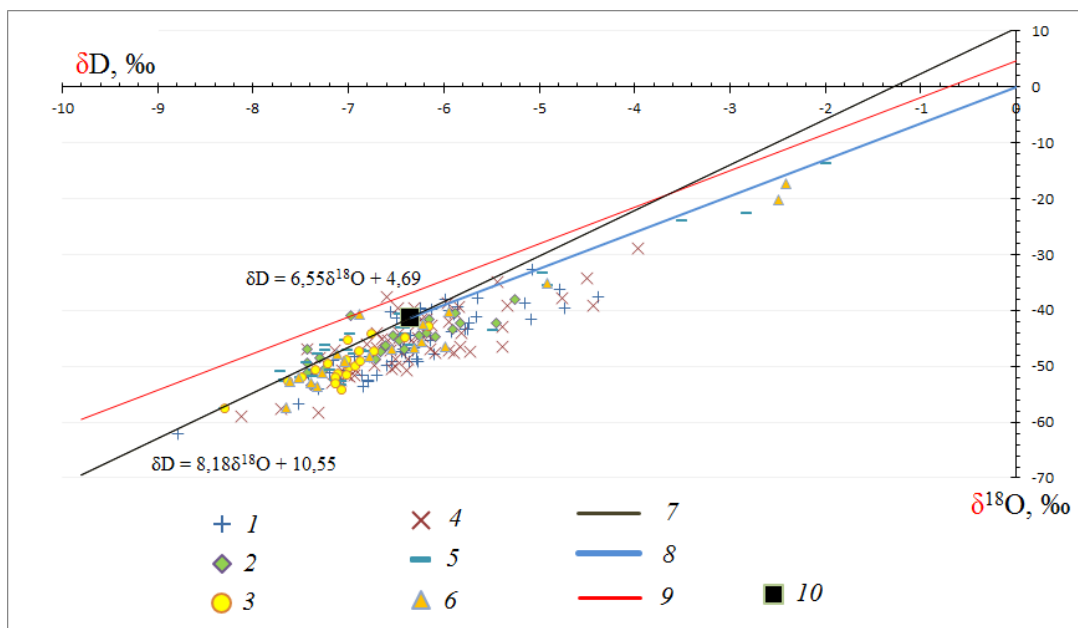


Рисунок 3 – Зависимости изотопных характеристик кислорода и водорода поверхностных и подземных вод дельты р. Меконг: 1-6 – подземные воды (водоносные горизонты: 1 – qr_3 ; 2 – qr_1 ; 3 – n_2^1 ; 4 – qr_{2-3} ; 5 – n_2^2 ; 6 – n_1^3); 7 – глобальная линия метеорных вод (линия Крейга); 8 – ЛСПМ; 9 – ЛЛМВ; 10 – средний состав поверхностных вод;

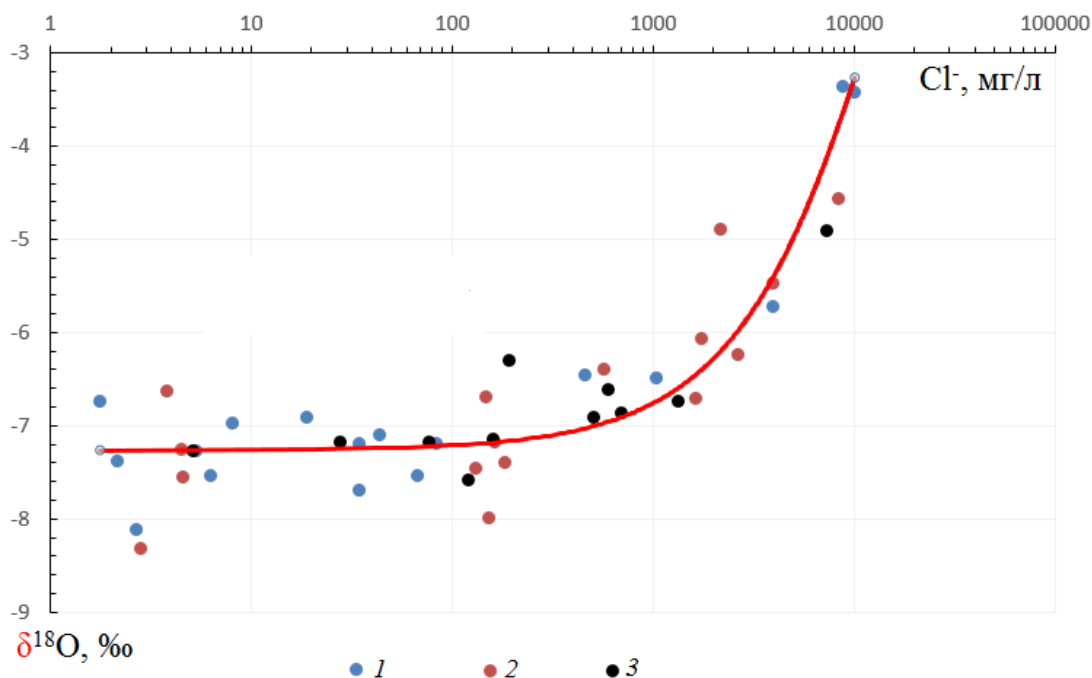


Рисунок 4 – График корреляции между концентрацией хлора и $\delta^{18}O$: 1-3 водоносные горизонты: 1 – n_2^2 ; 2 – n_2^1 ; 3 – n_1^3 ;

Результаты исследования содержания изотопов радиоуглерода ^{14}C :

а. верхнеплиоценовый водоносный горизонт

Для построения карты возраста подземных вод верхнеплиоценового водоносного горизонта, использована геостатистическая интерполяция «sokriging» двух параметров (возраст – ключевой параметр и отметки глубин опробования – дополнительный параметр), которая позволяет повысить точность процесса интерполяции. Кроме того, направление потока, определяемое разницей пьезометрических уровней, также влияет на геостатистическую интерполяцию, повышая качество результата. Такой подход к построению гидрогеологических карт во Вьетнаме был использован впервые. В результате была построена карта возраста подземных вод верхнеплиоценового водоносного горизонта (рис. 5) с коэффициентом корреляции между параметром интерполяции и реальным параметром 0,9.

По возрастной характеристике подземных вод водоносных горизонтов дельты р. Меконг (табл. 2), возраст которых меньше 40 тыс. лет не могут быть седиментогенными, сохранившимися с прошедших геологических периодов и не участвующими в течение продолжительного периода времени в геологическом круговороте воды, который исчисляется несколькими миллионами лет. Подземные воды, характеризующиеся высокими концентрациями хлор-иона, с возрастом от 7 тыс. до 11 тыс. лет образуются в результате смешения инфильтрационных (пресных и изотопно-легких) и седиментогенных вод, которые были сформированы во время Фландрской трансгрессии, начавшейся около 21 тыс. лет назад и закончившейся 4,2 тыс. лет назад.

Таблица 2 – Возрастная характеристика подземных вод водоносных горизонтов дельты р. Меконг с 1982 по 2016 год

<i>Водоносные горизонты</i>	<i>Возраст, лет</i>		
	<i>минимум</i>	<i>максимум</i>	<i>среднее</i>
qr_3	современный	30200	10710
qr_2^3	современный	40000	14791
qr_1	2500	33200	14635
n_2^2	современный	40000	15858
n_2^1	современный	44928	23194
n_1^3	10100	40000	24740
$pz-mz$	2500	18100	12066

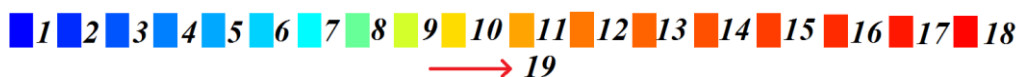
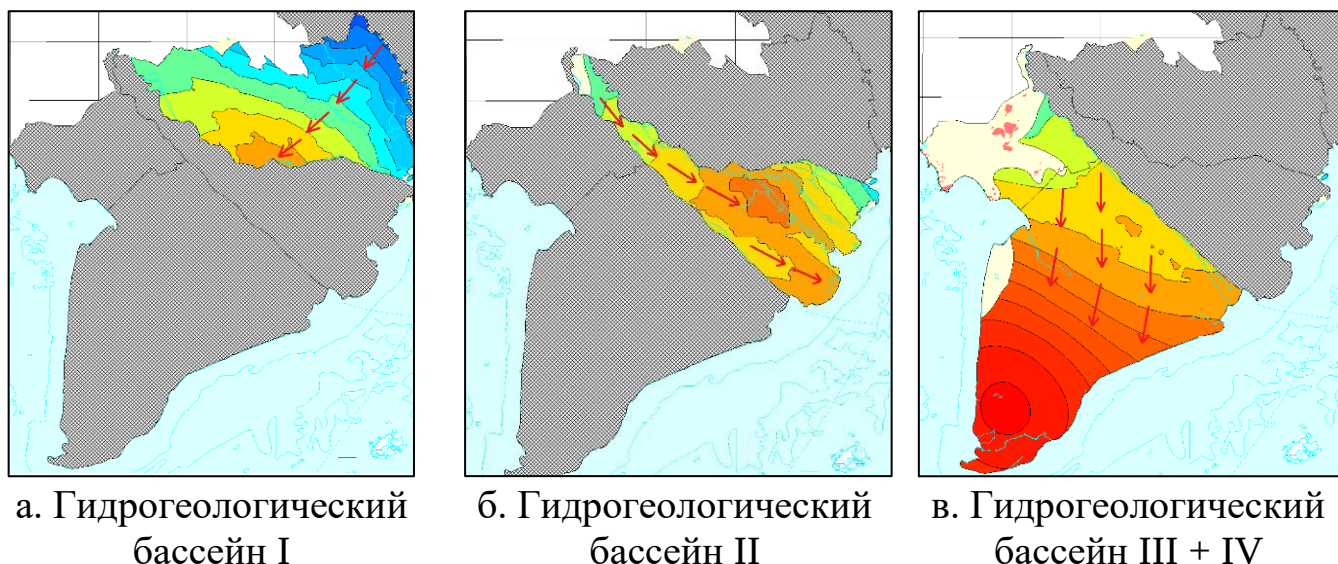


Рисунок 5 – Карта возраста гидрогеологических бассейнов в дельте р. Меконг: 1-18 – возраст подземных вод верхнеплиоценового водоносного горизонта (лет) (1 – 0-2000; 2 – 2000-4000; 3 – 4000-6000; 4 – 6000-8000; 5 – 8000-10000; 6 – 10000-12000; 7 – 12000-14000; 8 – 14000-16000; 9 – 16000-18000; 10 – 18000-20000; 11 – 20000-22000; 12 – 22000-24000; 13 – 24000-26000; 14 – 26000-28000; 15 – 28000-30000; 16 – 30000-32000; 17 – 32000-34000; 18 – 34000-36000); 19 – направление потока;

В целом, проведенные исследования содержания ^{14}C в подземных водах верхнеплиоценового водоносного горизонта дельты р. Меконг и ранее выполненные исследования позволили получить следующие результаты:

1. С помощью геостатистического метода построена карта возрастов подземных вод верхнеплиоценового водоносного горизонта и было определено местоположение области питания, на северо-востоке дельты р. Меконг (Юго-Восточная область). Направление потока верхнеплиоценового водоносного горизонта в каждом гидрогеологическом бассейне разное. Разгрузка осуществляется в морскую акваторию (Восточное море). Средняя скорость движения потока составляет 8 м/год. Средняя интенсивность питания верхнеплиоценового водоносного горизонта составляет 0,001 м/сут. Величина инфильтрационного питания водоносных горизонтов из осадков составляет 9×10^5 м³/сут.

2. При изучении корреляции значений абсолютного возраста с концентрациями хлоридов в подземных водах установлено, что минерализованные воды верхнеплиоценового водоносного горизонта формируются в результате смешения инфильтрационных (пресных и

изотопно-легких) и седиментационных вод, изначально имеющих морской генезис.

3. Оценка направления потоков подземных вод верхнеплиоценового водоносного горизонта по каждому гидрогеологическому бассейну на рисунке 5 позволяет предположить наличие инфильтрационного питания за пределами исследуемой территории на западе дельты р. Меконг. Можно заметить, что область выхода отложений плиоценового возраста на геологической карте Камбоджи, которая находится рядом с третьим гидрогеологическим бассейном, может являться областью питания этого водоносного горизонта.

б. нижнеплиоценовый водоносный горизонт

В результате применения геостатистической интерполяции «Кокригинг» была построена карта возраста подземных вод нижнеплиоценового водоносного горизонта (рис. 6) с коэффициентом корреляции между расчетными значениями модели и фактическими значениями 0,998.

В отличие от верхнеплиоценового водоносного горизонта, направление потока нижнеплиоценового относительно стабильно по всей дельте Меконга. Метеорные воды попадают в водоносный горизонт в области питания на северо-востоке дельты р. Меконг, двигаются по пласту в юго-западном направлении и разгружаются в Восточном море. Это направление также полностью соответствует как наблюдаемому направлению на основе карты пьезометрических уровней нижнеплиоценового водоносного горизонта (рис. 6), так и непрерывному распределению пресных вод по этому направлению на карте пресных и минерализованных вод.

Однако, изменение скорости движения потока в каждом гидрогеологическом бассейне различно, особенно в районе разлома Хау. Скорость потока в этом районе составляет 1,8 м/год, в три раза медленнее скорости потока в первом гидрогеологическом бассейне (5,3 м/год), и в 5 раз медленнее нежели в III+IV бассейнах – 9,1 м/год. Снижение скорости потока в этом районе подкрепляет гипотезу о том, что вдоль разлома возможен надвиг, блокирующий латеральный массоперенос, и гидравлическая целостность фильтрационного потока нарушается. Как следствие, здесь формируется зона гидродинамического «застоя» и возраст подземных вод нижнеплиоценового водоносного горизонта «увеличивается» по сравнению с окружающими зону влияния разлома водами. Во-вторых, в области разлома существует перетекание более «древних» вод из нижнеплиоценового водоносного горизонта.

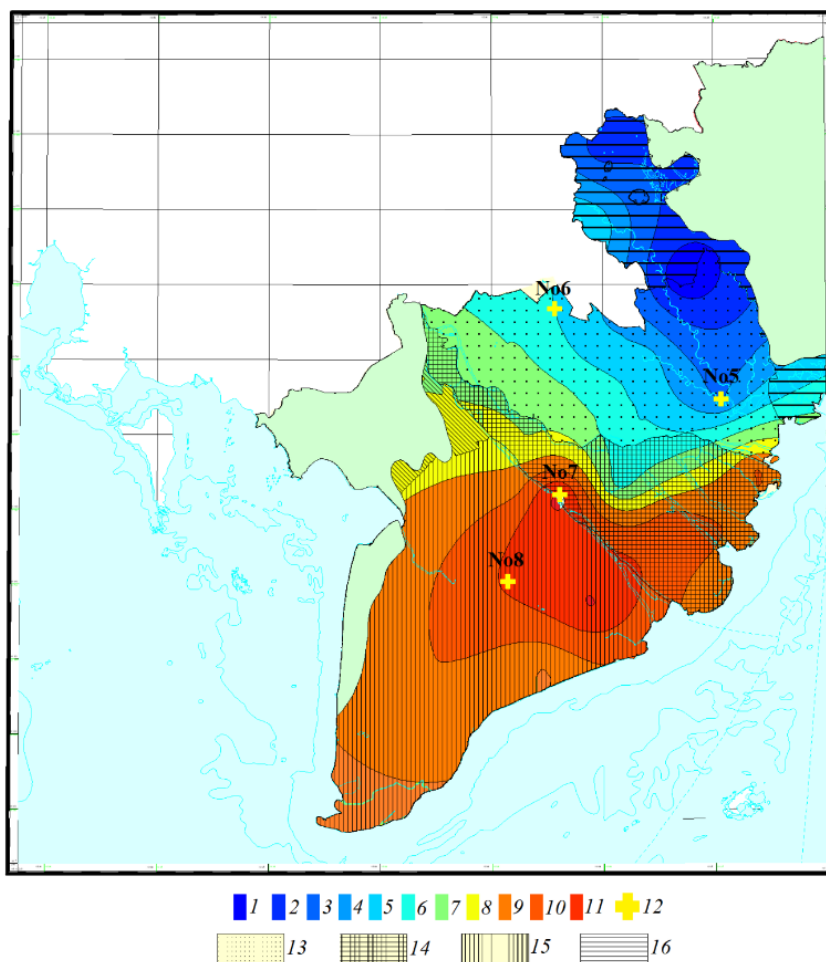


Рисунок 6 – Карта возраста подземных вод нижнеплиоценового водоносного горизонта в дельте р. Меконг: 1-18 – возраст подземных вод нижнеплиоценового водоносного горизонта (лет) (1 – 0-4000; 2 – 4000-8000; 3 – 8000-12000; 4 – 12000-16000; 5 – 16000-20000; 6 – 20000-24000; 7 – 24000-28000; 8 – 28000-32000; 9 – 32000-36000; 10 – 36000-40000; 11 – 40000-44000); 12 - точки отбора проб, выполненных МАГАТЭ, 13 – гидрогеологический бассейн I; 14 – гидрогеологический бассейн II; 15 – гидрогеологический бассейн III + IV; 16 – Юго-Восточная область;

Результаты термодинамического моделирования системы «вода-порода»:

Установление регрессионной составляющей геохимических процессов в системе «водовмещающие породы-вода» для определения их формирования смешения различных геохимических типов вод по термодинамическому моделированию позволил получить следующие результаты:

Формирование минерального состава подземных вод происходит за счет трех основных факторов – инфильтрации атмосферных осадков, взаимодействия вод с минералами водовмещающих пород и процессов смешения потока подземных вод с седиментационными растворами

морского генезиса. Граничным условием между процессами взаимодействия с породами и смешения с седиментационными водами может служить величина минерализации 2,86–5,7 г/л и сульфатно-гидрокарбонатный натриевый гидрохимический тип воды.

При значении отношения $T/J=0.48$, косвенно отождествляемого со скоростью фильтрационного потока подземных вод, модельный состав раствора становится гидрокарбонатно-хлоридным натриевым с минерализацией 0.94 г/л. Такой состав характерен для областей питания на северо-востоке территории и в области выклинивания водоносных отложений на юго-западе. Это позволяет предположить наличие инфильтрационного питания за пределами исследуемой территории на западе дельты р. Меконг.

Термодинамические расчеты системы «водовмещающие породы-вода-газы атмосферы» показали присутствие в водоносном комплексе областей равновесного состояния (сульфатно-гидрокарбонатный натриевый тип воды с минерализацией 3.7 г/л), где на фактор растворения минералов пород «накладываются» процессы смешения вод атмогенного генезиса с седиментационными водами морского генезиса.

Список вторичных минералов, контролирующих формирование геохимического облика подземных вод верхнеплиоценового водоносного комплекса, включает: альбит, кальцит, гётит, гипс, ломонтит, микроклин, мусковит, кварц, родохрозит и рутил.

В результате районирования территории по условиям формирования подземных вод плиоценового водоносного комплекса выделено три зоны: северо-восточная, центральная и юго-западная. Центральная часть исследуемой площади, ограниченная разломами северо-восточного и северо-западного простирания, является зоной, где происходит своеобразная конкуренция между факторами питания/разгрузки и геохимическими процессами взаимодействия воды с вмещающими породами. С одной стороны, разломы выполняют функцию области питания как сверху (атмосферных осадков), так и снизу (переток воды из нижележащих горизонтов), а с другой – вызывают барражный эффект снижения скорости фильтрации или наоборот ее повышения, способствуя тем самым активизации или ослаблению геохимической трансформации подземных вод.

Заключение

В целом, проведенные исследования возраста и происхождения подземных вод дельты р. Меконг и их движения в гидрологическом цикле по гидрогеологическому изотопному методу и термодинамическому моделированию позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты исследований показывают, что пресные воды в плиоценовых водоносных горизонтах дельты р. Меконг формируются в основном за счёт инфильтрации метеорных вод. Метеорные воды попадают в водоносный горизонт в областях питания, положение которых может различаться для разных водоносных горизонтов. В плиоценовых горизонтах также встречаются и минерализованные воды, которые образуются в результате смешения инфильтрационных вод (пресных и изотопно легких) с седиментационными, изначально имеющими морской генезис. Таким образом, формирование водного и солевого баланса этих горизонтов имеет сложный характер и происходит как минимум за счет двух источников: пресных инфильтрационных и минерализованных седиментационных вод. Это необходимо учитывать при разработке схемы эксплуатации водных ресурсов этих горизонтов и организации текущего мониторинга за качеством добываемых вод, а также при поиске решений для повышения инфильтрации метеорных вод в областях питания.

2. Верхнеплиоценовый водоносный горизонт является одним из главных водоносных горизонтов дельты р. Меконг. У него есть широкая область питания, которая распределена как на северо-востоке дельты р. Меконг (Юго-Восточная область), так и на южной части территории, на границе Камбоджи и Вьетнама. Направление потока верхнеплиоценового водоносного горизонта сложное и изменяется в каждом гидрогеологическом бассейне со средней скоростью движения потока 8 м/год. Решающие факторы для выбора мест заложения водозаборных скважин связаны с процессом изменения минерализации и качества подземных вод этого горизонта, которые могут послужить основой оптимизации режима эксплуатации подземных вод верхнеплиоценового водоносного горизонта.

3. В нижнеплиоценовом водоносном горизонте сосредоточены максимальные эксплуатационные запасы из всех водоносных горизонтов в дельте р. Меконг, но его фактический эксплуатационный расход минимальный. Поэтому этот водоносный горизонт является важнейшим в планировании хозяйственного развития дельты р. Меконг. Пресные воды нижнеплиоценового водоносного горизонта - инфильтрационные, которые попадают в водоносный горизонт из области питания на северо-востоке дельты р. Меконг, двигаются по пласту в юго-западном направлении и разгружаются в Восточном море. Скорость движения подземных вод в этом водоносном горизонте различна для каждого гидрогеологического бассейна, средняя скорость движения потока составляет 5,9 м/год. Также как и для верхнеплиоценового горизонта, здесь сильное воздействие на качество

вод оказывают процессы смешения инфильтрационных и седиментационных вод.

4. Величина инфильтрационного питания водоносных горизонтов в предыдущих исследованиях потенциальных запасов обычно не учитывалась (принималась равной 0 м³/сут) Расчёт величины инфильтрационного питания водоносных горизонтов по нашим данным позволил оценить потенциальные и эксплуатационные запасы.

5. Карты возраста подземных вод верхне- и нижнеплиоценового водоносных горизонтов в дельте р. Меконг показывают влияние разлома Хау на движение потока подземных вод. В его пределах может осуществляться гидравлическая взаимосвязь между водоносными горизонтами, содержащими некондиционные воды. Следовательно, выбор мест заложения водозаборных скважин рядом с этим разломом должен быть ограничен, чтобы избежать изменения качества подземных вод.

6. Комплексом изотопно-геохимических методов было показано, что на формирование химического состава вод оказывают влияние климатические (атмосферные осадки – состав и их количество), геолого-гидрогеологические (глубина залегания, область питания, скорость движения подземных вод), геохимические (состав водовмещающих пород) и тектонические (близость к разломам, ориентировка разломов) факторы.

7. Несмотря на то, что количество данных является ограниченным на большой области исследования, применение геостатистической интерполяции «Кокригинг» для многопеременных данных позволило добиться высокой точности при построении специализированных карт в дельте р. Меконг. Карта возраста подземных вод изучаемой территории построена с коэффициентом корреляции 0,967 для верхнеплиоценового и 0,99 для нижнеплиоценового горизонта, что подтверждает высокую эффективность геостатистического метода по сравнению классическими. Применение геостатистической интерполяции «Кокригинг» следует сделать стандартом для построения различных гидрогеологических карт на рассматриваемой территории. Таким образом, результаты исследования являются достоверной базой для гидрогеологических исследований и решают сложные проблемы планирования, управления и использования водных ресурсов дельты р. Меконг.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

А. Публикации в журналах из списка рекомендованных ВАК

1. Лам В. Х.-К., Лисенков А.Б., Лаврушин В.Ю., Белов К. В., Возраст и условия формирования вод среднеплиоценового

водоносного горизонта дельты р. Меконг (Вьетнам) по результатам радиоуглеродного датирования // Известия вузов. Геология и разведка. 2018, №6, С. 59-65.

2. Лам В. Х.-К., Лисенков А. Б., Лаврушин В. Ю. Условия формирования подземных вод в дельте р. Меконг (Социалистическая республика Вьетнам) по данным изучения изотопного состава кислорода и водорода // Известия вузов. Геология и разведка. 2018, №1, С. 42-48.

Б. Публикации в прочих изданиях

1. Лам В. Х.-К., Определение происхождения подземных вод дельты р. Меконг // Международная научно практическая конференция «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее» (к 100-летию МГРИ–РГГРУ), 4–6 апреля 2018. 2018. С. 208–209.

2. Лам В. Х.-К. Определение характеристики динамики подземных вод среднеплиоценового водоносного горизонта (n_2^2) в дельте Меконга // Международная научно практическая конференция «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее» (к 100-летию МГРИ–РГГРУ), 4–6 апреля 2018. С. 234–235.

3. Лам В.Х.-К., Лисенков А.Б., Фам Т.Н. применение геостатистического метода «кокригинг» для анализа и интерполяции многомерной геолого-гидрогеологической информации при построении специальных карт в дельте р. Меконг (СРВ) // XIV Международной научно-практической конференции "Новые идеи в науках о Земле", 2-5 апреля 2019 г. С. 154-157.

4. Lam H.Q.V., Nguyen V.K., Application isotope hydrology method research about original groundwater of Nambo plain // Science & Technology development journal, earth resources and sustainable development. Vietnam national university – Hochiminh city. 2016. №19. P. 98 – 105. [In Vietnam]

5. Lam H.Q.V., Graduate thesis “Application of isotopic hydrological to study groundwater dynamics of pliocene aquifer in Mekong Delta” // Hochiminh university of technology, Vietnam national university – Hochiminh city. 2016, P. 29 – 30. [In Vietnam]

6. Nguyen D.T., Lam H.Q.V., Using isotope hydrology method to determine the origin of ground water sources in the middle-Pliocene aquifer in the Mekong Delta, Vietnam // International conference on clean water, air & soil (CleanWAS2017). 25-27 August 2017 - Bangkok, Thailand.