проводности. В большей степени она определяется соотношением водоотдачи гидравлически связанных водоносных горизонтов.

4. Область применения предлагаемой методики ограничивается соотношением водоотдачи горизонтов $\xi < 5{,}0$. Учитывая наличие вертикальной фильтрационной зональности, это условие будет выполняться в подавляющем большинстве случаев.

5. При условии $\xi > 5{,}0$ определение параметра перетекания следует определять по ОФР из горизонта с более низким значением водоотдачи.

6. При трёхслойной водоносной толще обработка данных опытно-фильтрационных работ для определения параметров перетекания между первым и вторым, вторым и третьим водоносными горизонтами не меняется, но для интерпретации следует использовать ОФР по первому и третьему водоносным горизонтам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочевер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 325 с.
2. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н. К вопросу о гидрогеологических расчетах скважин в слоистых толщах. ВОДГЕО, Гидрогеология, вып. 14, 1968.
3. Де Уист. Гидрогеология с основами гидрологии суши М.: Мир, 1969. 294 с.
4. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: Системный анализ, диагностика, прогноз, управление/ А.В. Малков, И.М. Першин, И.С. Помеляйко и др. М.: Наука, 2015. 283 с.
5. Малков А.В. Гидравлический метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. 2009. № 11. С. 45–50.
6. Малков А.В. Определение гидродинамических параметров водоносных горизонтов в условиях перетекания // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 31–34.
7. Чарный И.А. Фильтрация в пласте с непроницаемыми кровлей и подошвой, разделенном слабопроницаемой перемычкой // Труды МИНХ и ГП им. Губкина. Вып. 33. М.: Гостоптехиздат, 1961. С. 122–130.

УДК 550.4; 556.3; 551.311.8

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ДЕЛЬТЕ МЕКОНГА (ВЬЕТНАМ) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА

ЛАМ ХОАНГ КУОК ВЬЕТ[1], А.Б. ЛИСЕНКОВ[1], В.Ю. ЛАВРУШИН[2]

[1]Российский государственный геологоразведочный университет
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия
e-mail: lamviet2906@gmail.com, Lisenkov.rsgpu@mail.ru

[2]Геологический институт РАН,
7, Пыжевский пер., Москва 119017, Россия
e-mail: v_lavrushin@ginras.ru

Формирование подземных вод дельты Меконга является сложной проблемой, которая до настоящего времени не имеет однозначного решения. Это накладывает ограничения на условия эксплуатации подземных вод. В водоносных горизонтах дельты Меконга присутствуют как пресные, так и минерализованные воды, распределение которых имеет сложный характер. Считается, что минерализованные воды имеют седиментогенный генезис (захоронённые морские воды), а пресные — инфильтрационный. Изучение стабильных изотопов кислорода и водорода в подземных водах дельты Меконга показало, что подземные воды формируются в основном за счёт инфильтрации метеорных вод. Кроме того, значимым фактором образования подземных вод в средне-, нижнеплиоценовых и миоценовых водоносных горизонтах является смешение атмогенных и морских вод. Уменьшение значений стабильных изотопов с увеличением глубины залегания подземных вод связано с тем, что области питания глубоко залегающих водоносных горизонтов располагаются выше по абсолютным отметкам и более удалены от береговой линии. Результаты исследований позволят оптимизировать схему эксплуатации водозаборов подземных вод, создать условия для ограничения вторжения солёных морских вод в пределы эксплуатируемых водоносных горизонтов.

Ключевые слова: стабильные изотопы; подземные воды; изотоп ^{18}O; дейтерий; концентрация хлора.

FORMATION CONDITIONS OF GROUNDWATER IN THE MEKONG DELTA (VIETNAM) BASED ON ISOTOPES RESEARCH OF OXYGEN AND HYDROGEN IN WATER

LAM HOANG QUOC VIET[1], A.B. LISENKOV[1], V.J. LAVRUSHIN[2]

[1]Russian State Geological Prospecting University
23 Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: lamviet2906@gmail.com, Lisenkov.rsgpu@mail.ru

[2]Geological Institute RAS
7 Pyzhevsky lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: v_lavrushin@ginras.ru

The origin and formation of the groundwater in the Mekong Delta are the complex problem, which has not one solution nowadays. So the exploitation scheme still has many limitations. In the aquifers of the Mekong Delta there are both fresh water and mineralized water, which are very complex and heterogeneous in the distribution. The mineralized water has been considered to have sedimentagenous genesis (buried seawater), and freshwater has been believed to originate from infiltration of meteoric water. Studying of the stable isotopes of oxygen and hydrogen of the groundwater in the Mekong Delta has shown that the groundwater originates mainly from the infiltration of the meteoric water. In addition, a significant factor in the formation of groundwater in the Middle, Lower Pliocene and Miocene aquifer is the mixing of the meteoric and sea waters. Increasing in values of stable isotopes with growing depth of groundwater is related with that the recharging areas of Paleogene (deep) aquifers are distributed higher by absolute depths and farther from the coastline than recharging areas of Quaternary (shallow) aquifers. The results of the research can be used to optimize the scheme for the exploitation of the fresh groundwater, limiting the intrusion of sea water in the exploited groundwater in the Mekong Delta.

Keywords: stable isotopes; oxygen-18; heavy hydrogen; groundwater in the South of Vietnam; the concentration of chlorine ion.

Дельта Меконга — регион, расположенный в юго-западной части Вьетнама, представлена двумя протоками Хау и Тянь на участке их впадения в Восточное море (рис. 1). Дельта занимает площадь 40577 км^2 (что составляет 12 % от общей площади Вьетнама).

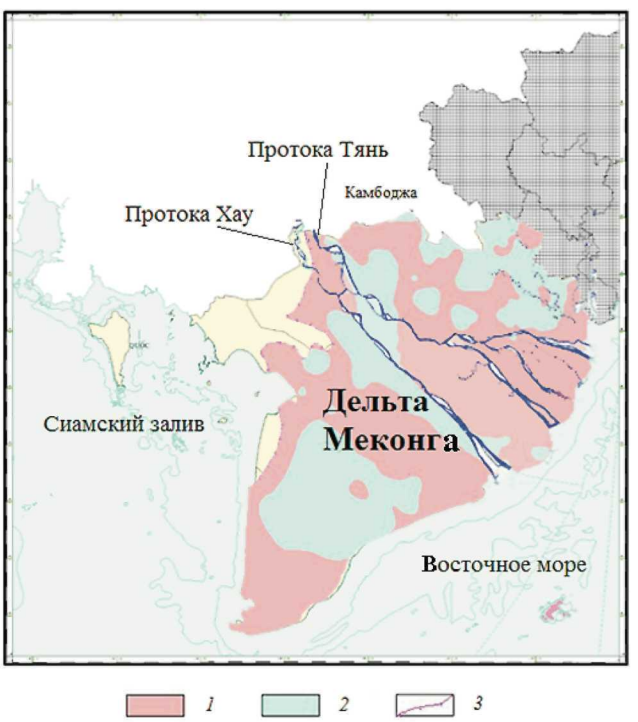

Рис. 1. Карта распределения пресных и минерализованных вод в среднеплейстоценовом горизонте в дельте Меконга, по [2] с изменениями: *1* – минерализованные воды; *2* – пресные воды; *3* – граница водоносного горизонта

Статические запасы подземных вод в дельте Меконга составляют 61637315 м^3/сут. Они сосредоточены в голоценовых (Q_{IV}), плейстоценовых (Q_{IV}^3, Q_{IV}^{2-3}, Q_{IV}^1), плиоценовых (N_2^2, N_2^1) и миоценовых (N_1^3) отложениях, содержащих преимущественно поровые и трещиные 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 (табл. 1).

Из суммарных запасов подземных вод только 36,5 % приходится на пресную воду.

Таблица 1

Запасы подземных вод в дельте р. Меконга [1]

Водоносные горизонты	Запасы подземных вод, м^3/сут.
Пресные воды	22512989
Верхний плейстоцен (qp_3)	2002106
Средний—верхний плейстоцен (qp_{2-3})	4441642
Нижний плейстоцен (qp_1)	3602421
Средний плиоцен (n_2^2)	4398655
Нижний плиоцен (n_2^1)	5064118
Миоцен (n_1^3)	3004047
Минерализованные воды	39124326
Верхний плейстоцен (qp_3)	6409189
Средний—верхний плейстоцен (qp_{2-3})	6653670
Нижний плейстоцен (qp_1)	7036614
Средний плиоцен (n_2^2)	7575821
Нижний плиоцен (n_2^1)	5498734
Миоцен (n_1^3)	595029

Таблица 2

Характеристика эксплуатации подземных вод в дельте Меконга

Водоносные горизонты	Оцененные эксплуатационные запасым*, м^3/сут.	Фактический эксплуатационный расход подземных вод в 2010 г, м^3/сут.	Эксплуатационные возможности водоносных горизонтов, м^3/сут.
qh		17851	
qp_3	400421	114945	285476
qp_{2-3}	888328	977514	-89186
qp_1	720484	130077	590407
n_2^2	879731	477359	402372
n_2^1	1012824	87652	925172
n_1^3	600809	118235	482574
Итого	4502597	1905782	2596815

Примечание. *Оцененные эксплуатационные запасы подземных вод составляют 20 % от общих запасов пресных подземных вод.

Эксплуатация четвертичных водоносных горизонтов не решает всех проблем водоснабжения региона (табл. 2). Например, водоотбор из горизонта qp_{2-3} превышает его эксплуатационные возможности. Также следует учитывать, что качество и водообильность неглубоких водоносных горизонтов (qh, qp_3, qp_1) напрямую зависит от изменения климата, вторжения морской солёной воды и антропогенного загрязнения. Поэтому в планировании эксплуатации подземных вод дельты Меконг наибольшие перспективы связывают с плиоценовыми водоносными горизонтами. Общие потенциальные запасы подземных вод (водоносные горизонты n_2^1 и n_2^2) составляют 22537288 м^3/сут. (36,6 % от общих запасов подземных вод всего региона). Однако из этой суммы запасы пресной воды составляют только 9462773 м^3/сут. (42 %).

Стратиграфический разрез дельты Меконга представлен отложениями неогеновой и четвертичной систем. В пределах региона выделяют три основные тектонические структуры, которые ограничены четырьмя группами разломов: северо-восток—юго-западного, северо-запад—юго-восточного, субмеридионального и субширотного направлений. Согласно исследованиям [6], разлом, вдоль которого течет протока Хау, относящаяся к северо-запад—юго-восточной группе разломов, влияет на движение подземных вод в плиоценовом водоносном горизонте в дельте Меконга.

Распределение пресных и минерализованных вод в водоносных горизонтах четвертичного и неогенового возрастов носит очень сложный и неоднородный характер (рис. 1).

Таким образом, в водоносных горизонтах дельты Меконга присутствуют как пресные, так и минерализованные воды. Считается, что минерализованные воды имеют седиментогенный генезис (захоронённые морские воды), а пресные — инфильтрационный [3]. Их миграция и взаимодействие в водоносных горизонтах приводит к формированию чрезвычайно генетически неоднородной флюидной гидрогеологической системы. Последнее необходимо учитывать при разработке эксплуатационной схемы пресноводного водоснабжения этого региона.

Поэтому главной задачей наших исследований являлась оценка условий формирования подземных вод дельты Меконга, на которую должна в дальнейшем опираться система их эксплуатации. В этой связи приоритетное значение имеют глубокие водоносные горизонты, особенно водоносные горизонты n_2^1 и n_2^2, суммарные эксплуатационные возможности которых составляют 54,2 % от суммарных эксплуатационных возможностей водоносных горизонтов всего региона.

Для решения поставленной задачи в 2015 и 2016 гг. были отобраны 70 проб воды для изучения химического состава и определения изотопного состава кислорода и водорода. Кроме того, результаты исследования этих проб были дополнены материалами предыдущих исследований, проведённых в 1982—2001 гг. [8]. В результате была собрана представительная (210 проб) база геохимических данных, характеризующая все водоносные горизонты дельты Меконга (табл. 3, рис. 2). Все пробы приведены в соответствие с современной стратиграфической шкалой. Наряду с опробованием подземных вод отобраны три пробы речной воды. Отбор проб проводился в соответствии с процедурой, предусмотренной стандартом Международного агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) [4].

Пробы атмосферных осадков отбирались ежемесячно. Единичная проба представляла собой смесь атмосферных осадков, которая собиралась в

Таблица 3

Число образцов, отобранных для определения изотопных характеристик кислорода и водорода в подземных водах в дельте Меконга за период от 1982 по 2016 гг. [5]

Водоносные горизонты	qp_3	qp_{2-3}	qp_1	n_2^2	n_2^1	n_1^3	Mz
Число проб	52	57	24	34	21	20	2

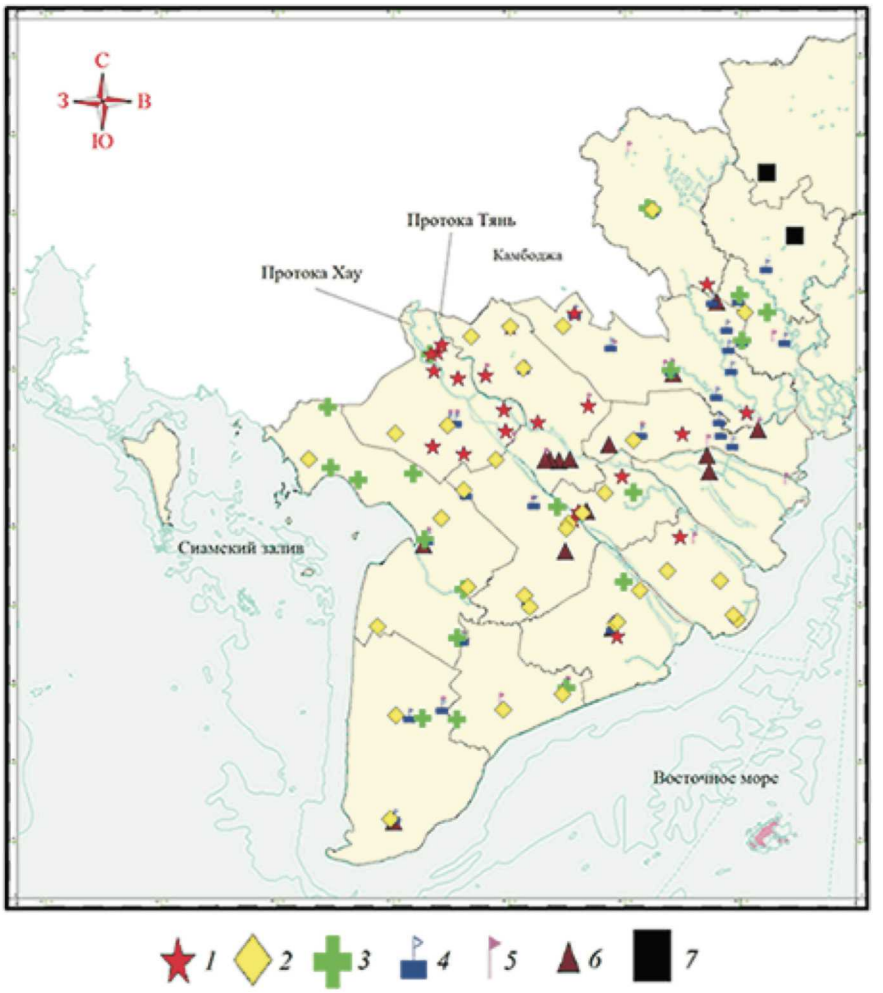

Рис. 2. Расположение точек отбора проб на стабильные изотопы в дельте Меконга из разных водоносных горизонтов: *1* – qp_3; *2* – qp_{2-3}; *3* – qp_1; *4* – n_2^2; *5* – n_2^1; *6* – n_1^3; *7* – Mz

течение периода наблюдения (1 мес.) и подлежала фильтрованию через фильтры с диаметром пор 0,45 мкм в условиях вакуума.

Пробы на стабильные изотопы от бирались в отдельные пробирки ёмкостью 2 мл. Определения значений $\delta^{18}O$ и δD выполнялись на приборе ДНТ-100 в Департаменте изотопной гидрогеологии ядерного центра Хошимина. Результаты приведены относительно стандарта SMOW, погрешность измерения $\delta^{18}O$ и δD 0,15 и 1 ‰ соответственно.

Генезис подземных вод в дельте Меконга с применением изотопных исследований выяснялся путём сопоставления изотопного состава различных типов вод исследуемого региона со стандартной локальной линией метеорных вод для дельты Меконга (ЛЛМВ [9]), линией смешения подземных и морских вод (ЛСПМ [7]) и линией Крэйга (мировой стандарт для метеорных и поверхностных вод [7]).

ЛЛМВ была определена в процессе осуществления программы мониторинга изотопного состава атмосферных осадков южных равнин Вьетнама в 2007—2015 гг. [9]. График ЛЛМВ характеризуется линейной зависимостью между δD и $\delta^{18}O$:

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

Большинство точек значений ^{18}O и D для подземных вод дельты Меконга распределены вдоль линии ЛЛМВ или расположены ниже неё (рис. 3). В соответствии с этим условия формирования подземных вод Меконга связаны с инфильтрацией атмосферных осадков (метеорных вод) [7].

Точки, характеризующие значения изотопов ^{18}O и D для подземных вод в верхнеплейстоценовом (qp_3), верхнесреднеплейстоценовом (qp_{2-3}) и нижнеплейстоценовом (qp_1) водоносных горизонтах, расположены рядом с точкой, характеризующей поверхностные воды (рис. 3). Этот факт указывает на то, что подземные воды плейстоценовых отложений в дельте Меконга имеют гидравлическую взаимосвязь с поверхностными водами и водами атмосферных осадков, инфильтрующихся в плейстоценовые водоносные горизонты.

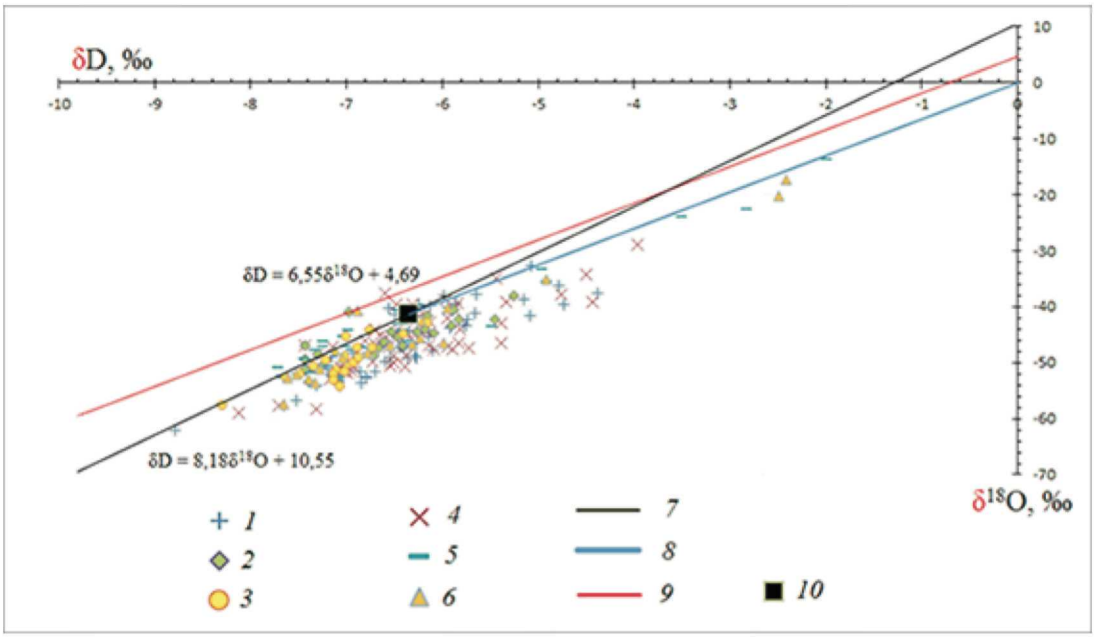

Рис. 3. Зависимости: изотопных характеристик кислорода и водорода поверхностных и подземных вод дельты Меконга: *1–6* – подземные воды (водоносные горизонты: *1* – qp_3; *2* – qp_1; *3* – n_2^1; *4* – qp^{2-3}; *5* – n_2^2; *6* – n_1^3); *7* – глобальная линия метеорных вод (линия Крейга); *8* – ЛСПМ; *9* – ЛЛМВ; *10* – средний состав поверхностных вод

Дополнительно следует отметить, что фигуративные точки среднеплиоценового (n_2^2) и миоценового (n_1^3) горизонтов на графике (рис. 3) распределяются вдоль линии ЛСПМ и характеризуются самыми высокими значениями $\delta^{18}O$ и δD. Это позволяет заключить, что воды указанных водоносных горизонтов формируются в результате смешения атмогенных и морских вод.

Этот вывод подтверждается и анализом значений $\delta^{18}O$ в зависимости от концентрации хлориона в водоносных горизонтах неогенового возраста (рис. 4). Из рис. 4 следует, что значение $\delta^{18}O$ увеличивается с ростом концентрации Cl^-. Такая связь геохимических характеристик вод указывает, что минерализованные воды с высокими значениями $\delta^{18}O$ образуются в результате смешения ин-

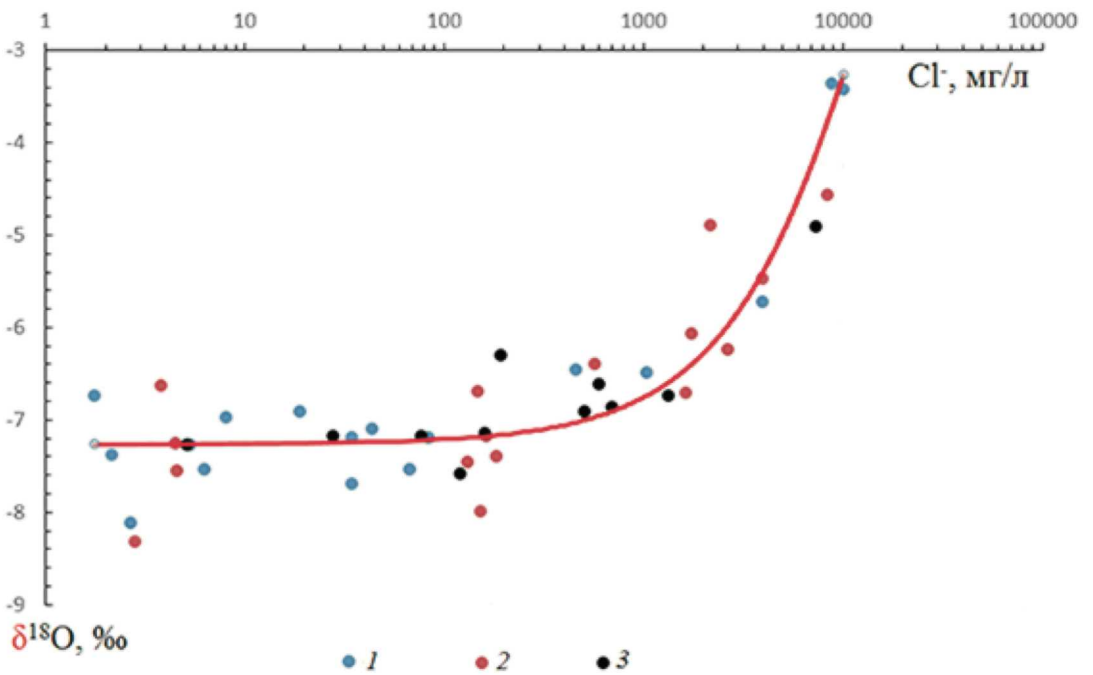

Рис. 4. График корреляции между концентрацией хлора и $\delta^{18}O$: *1–3* – водоносные горизонты: *1* – n_2^2; 2 – n_2^1; 3 – n_1^3

Таблица 4

Изотопные характеристики кислорода и водорода в подземных водах в дельте Меконга в 1982—2016 гг.

Параметр	$\delta^{18}O$ (‰)		δD (‰)	
	Средние значения	Стандартное отклонение	Средние значения	Стандартное отклонение
Поверхностные воды	-6,35	0,37	-41,30	2,50
Атмосферные осадки	-7,14	1,71	-38,15	14,12
Водоносный горизонт qp_3	-6,35	0,77	-46,90	5,90
Водоносный горизонт qp_{2-3}	-6,37	0,78	-46,10	5,80
Водоносный горизонт qp_1	-6,50	0,63	-45,05	3,70
Водоносный горизонт n_2^2	-7,02	1,39	-47,10	9,30
Водоносный горизонт n_2^1	-7,01	0,42	-50,15	3,50
Водоносный горизонт n_1^3	-6,66	1,48	-46,85	10,20
Водоносный горизонт Mz	-7,62	0,21	-51,40	1,90

фильтрационных вод (пресных и изотопнолёгких) с седиментационными, изначально имеющими морской генезис.

Результаты статистической обработки результатов изотопных исследований показывают (табл. 4), что с увеличением глубины залегания подземных вод наблюдается уменьшение значений $\delta^{18}O$ и δD. Такая закономерность в сочетании с общей тенденцией к снижению $\delta^{18}O$ и δD атмосферных осадков с удалением от береговой линии морского бассейна может быть связана с удалением от береговой линии в континентальную часть региона областей питания глубоких водоносных горизонтов по сравнению с областями питания вышерасположенных горизонтов. Она также может быть следствием проявления высотной изотопной зональности атмосферных осадков и отражать расположение на более высоких абсолютных отметках областей питания более глубоких горизонтов.

Общую тенденцию нарушают только воды миоценового водоносного горизонта (n_1^3). По сравнению с выше- и нижележащими горизонтами они выделяются бóльшими средними значениями $\delta^{18}O$ и δD. Возможно, это является следствием их формирования в результате смешения атмогенных и морских вод (этот факт обсуждался выше). Однако эти процессы не оказывают влияния на средние характеристики изотопного состава кислорода и водорода других водоносных горизонтов неогена.

Подземные воды в водоносном горизонте мезозойском отложениях фундамента недостаточно изучены для оценки их генезиса. В целом проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Подземные воды в дельте Меконга формируются в основном за счёт инфильтрации метеорных вод. Отметим, что эксплуатационные возможности водоносных горизонтов ограничены и чрезмерная эксплуатация прежде всего верхнесреднеплейстоценового (qp_{2-3}) водоносного горизонта может привести к ухудшению качества подземных вод.

2. Значения содержаний изотопов ^{18}O и D для подземных вод среднего плиоцена (n_2^2), нижнего плиоцена (n_2^1) и миоцена (n_1^3) расположены на линии смешения подземных вод с морской водой. Этот факт подтверждается высокой 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 счёт 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bui T.V., Phan N.L., Le H.N.,Project «Assessment of the impact of climate change to groundwater in Mekong delta, proposed solutions to respond» // Report №. 14. 2013. P. 26–28. [In Vietnam].
2. Department of Geology and Mineral Vietnam. Groundwater in Nambo plain // Department of Geology and Mineral Vietnam. 1998. 66p. Fig. II-20. [In Vietnam].
3. Do T.H. Doctoral thesis «Formation of the chemical compositions of groundwater and its importance in the premise of the exploitation of groundwater in the Cenozoic deposits in the Mekong Delta» // Mining and Geological University (Hanoi, Vietnam). 1996. P. 22. [In Vietnam].
4. IAEA, IAEA/GNIP precipitation sampling guide // IAEA Water Resources Program; V2.02 September 2014. P. 4–15.
5. 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].
6. 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].
7. Mook W.G. Environmental isotopes in the hydrological cycle, technical documents in hydrology No.39 Vol.1 UNESCO, Paris, 2000. P. 120–123.
8. 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 (Clean WAS 2017). 25–27 August 2017 — Bangkok, Thailand, 2017.
9. Nguyen K.C. Applying Isotope Techniques to investigate Groundwater Dynamics of deep aquifers in the Nambo Plain for sustainable Groundwater Resource Management// IAEA/RCA Final Meeting of the RAS/7/022 Project,Bali, Indonesia, 23–27 Nov. 2015.