

Ближний Восток

Микрогравиметрические исследования запасов подземных вод и площади для хранения ее в Абу-Даби. Microgravity investigation of an aquifer storage and recovery site in Abu DhabiCurtis C. Bradley,^{1*} Mohammed Y. Ali,¹ Ibrahim Shawky,² Arnaud Levannier,³ and Mohamed A. Dawoud⁴

В этой статье микрогравиметрические исследования использованы для изучения геологической структуры области, которая рассматривается с целью выявления запасов подземной воды и хранения ее по проекту (ASR) в северо-восточной части эмирата Абу-Даби в UAE. Этот проект является результатом сотрудничества между Агентством по охране окружающей среды – Абу-Даби (EAD), службой водоснабжения Шлюмберже и Нефтяным Институтом. Цель проекта заключается в исследовании геологической структуры, подстилающей водоносный горизонт, и возможности использования гравиметрии для последующего оконтуривания нижней границы водоносного горизонта. Район проведения работ, приблизительно 4 км² по площади, содержит водоносный горизонт на глубине 50 м под поверхностью, которая разделяется пополам сбросом, идущим приблизительно с севера на юг.

Экспериментальное исследование, спонсированное Агентством по охране окружающей среды – Абу-Даби (EAD), направлено на исследование возможности для поиска запасов подземных вод и ее хранения в Shuwaib районе эмирата Абу-Даби. Служба водоснабжения Шлюмберже заключила контракт с EAD, чтобы поддержать работы на месте проведения экспериментальных исследований бурением, геофизическими исследованиями скважин и проведением испытательных работ по запасам подземной воды. Экспериментальное исследование включает закачивание опресненной воды в малоглубинный водоносный горизонт, определение притока воды и смешивания в водоносном горизонте и последующие возвращение и тестирование выкачанной воды. Микрогравиметрические измерения были проведены для изучения подстилающей геологической структуры в месте проведения экспериментальных исследований и изучения возможности применения гравиметрии для дальнейшего оконтуривания границ малоглубинного водоносного горизонта. Эта работа поможет обосновать разработку модели водоносного горизонта и повысить качество последующего планирования контрольных работ ASR и прогнозов для работ ASR в этом регионе. Расход воды, пригодной к употреблению, связанный с планомерным приростом населения в ближайшем будущем Абу-Даи и отдыхающих в UAE, требует интенсивно возрастающей добычи опресненной воды, емкостей для хранения свежей воды и пополнения грунтовых вод. Поэтому предполагается, что ASR сыграет важную роль в будущем.

Запасы подземных вод и добыча ее в Абу-Даби

С 2003 года более 96% чистой воды, поставляемой для бытовых и других нужд в эмирате Абу-Даи, вырабатывается опреснением солоноватой грунтовой воды или

привозной опресненной морской водой. Это обусловлено огромным увеличением в настоящее время сельскохозяйственных, лесоводческих, бытовых и промышленных запросов, при снижении уровня подземных вод и увеличении солености грунтовых вод. Несмотря на возрастающую стоимость добычи и плохое качество воды, оставшиеся грунтовые воды все еще остаются важным источником рационального пользования воды, особенно для аварийного (чрезвычайного) резервирования источников опресненной воды и для снабжения водой удаленных областей.

Решение должно сводиться к использованию дополнительных хранилищ опресненной воды для пополнения существующих малоглубинных водоносных горизонтов посредством использования запасов подземных вод и добычи в другом месте (Brook, 2006). Решающим фактором должно быть то, что современные технологии опреснения должны рассматриваться как ключевой способ снабжения удовлетворяющей требованиям бытовой водой в настоящее время и в будущем стран GCC (Gulf Cooperation Council - Совет по сотрудничеству стран Персидского залива) (Dawoud, 2005). Более того, использование ASR позволит долговременное хранение, по крайней мере, в течение одного года, чистой воды, срока, необходимого для сооружения новых опреснительных установок (Al Katheeri, 2007). В результате за последние годы возникло несколько ASR проектов, таких как один из них в нашей работе.

Геологическое положение

Место проведения экспериментальных работ ASR расположено в 10 км к юго-западу от Shuwaib, к востоку от Абу-Даи на западной границе северных Оманских гор (рис. 1). Район работ покрыт невысокими песчаными дюнами (с высотой ~30 м) и занимает площадь около 4 км². Большая часть грунтовых вод в поверхностных водоносных горизонтах стекает с Оманских гор к Аравийскому заливу, в 125 км к западу.

Два тектонических события сжатия создали Оманские горы и сформировали поверхностные структуры окружающего региона, включая исследуемую область. Первое из этих событий имело место в течение поздне-Мелового времени. Это событие включало становление множества надвиговых пластов, каждый из которых устанавливался в направлении с северо-востока на юго-запад на окраине Аравийской плиты. Эти надвиговые пласты, показанные на рис. 1 и 2, включают Sumeini Group, содержащую отложения окраины шельфа и карбонаты склона; Hawasina Complex, содержащий удаленные от склона и глубоководные осадки; Haybi Complex, содержащий специфические известняки, вулканы (Haybi вулканы), меланж и субофиолитовые

¹ The Petroleum Institute, P.O. Box 2533, Abu Dhabi, UAE.² Schlumberger Water Services, P.O. Box 21, Abu Dhabi, UAE.³ Schlumberger Water Services, P.O. Box 9261, Dubai, UAE.⁴ Environmental Agency - Abu Dhabi, P.O. Box 45553, Abu Dhabi, UAE. *

Corresponding author, E-mail: cbradley@pi.ac.ae.

Ближний Восток

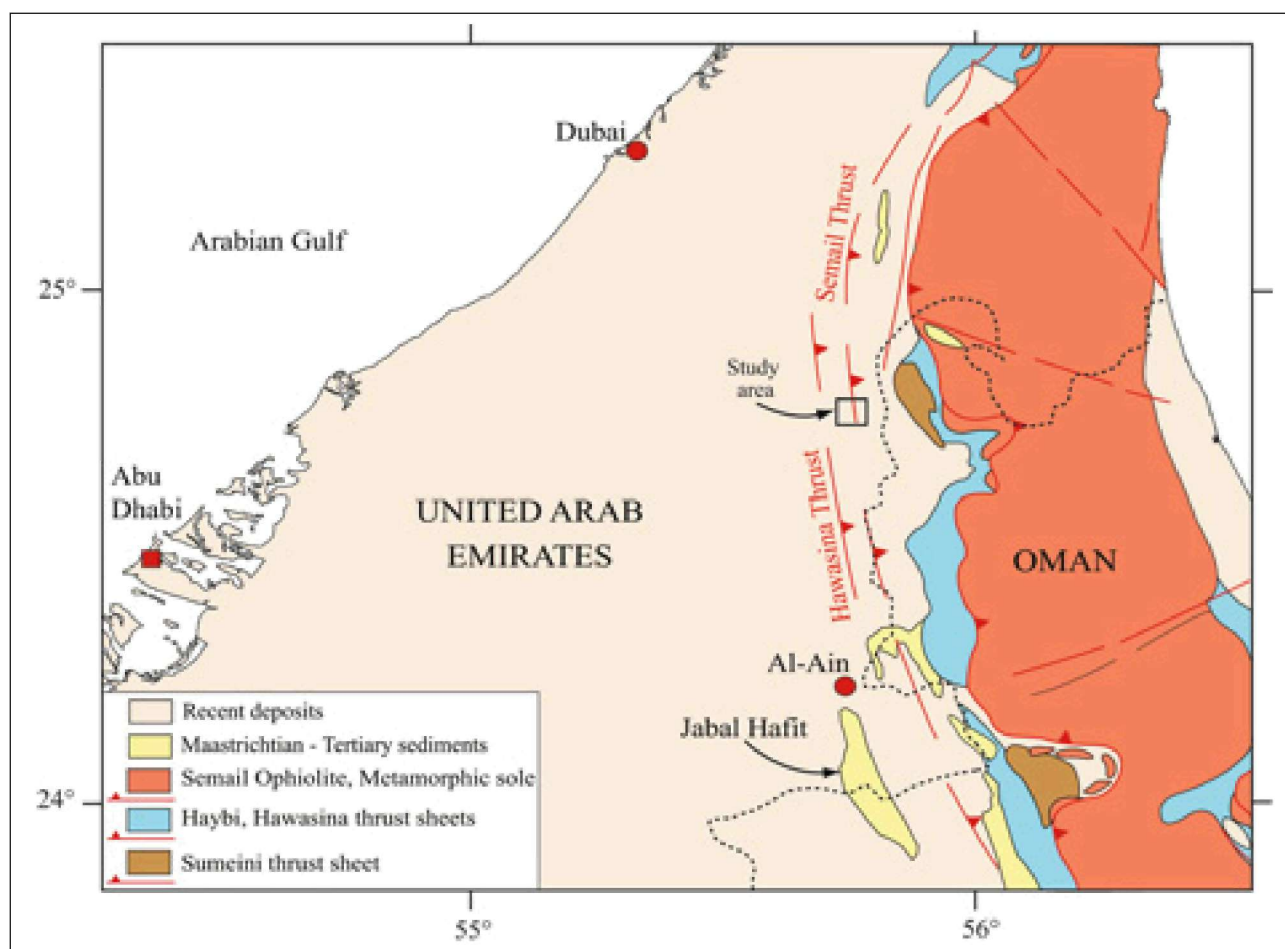


Рис. 1 Положение района исследования в северо-восточном регионе Эмирата Абу-Дау и на фланге Оманских гор.

метаморфические породы; и офиолитовый комплекс Semail, мощный слой океанической коры и мантии Сеноман-Туронского возраста, который образовался над внутриокеанической субдукционной зоной с северо-восточным погружением.

Второе пост обдукционное явление сжатия имело место в позднем Эоцен-Миоцене, в течение которого Аравийская плита двигалась на северо-восток и вступила в столкновение с Евразийской плитой (Searle et al., 1983). Это событие образовало складки сжатия и надвиги и возобновило деятельность глубинных разломов в изучаемом районе (Searle et al., 1990).

Woodward (1994), базируясь на структурной интерпретации профилей сейсмических отражений, документировал множество складок сжатия и надвигов, которые простираются в районе в ССЗ-ЮЮВ направлении. Один из этих главных надвигов, ступенчато погружающийся на восток, имеет место в центре исследуемого района (рис. 1 и 3). Цель микрогравиметрических измерений заключается в исследовании влияния этого надвига на место проведения экспериментальных работ ASR.

На рис. 4 приведена стратиграфия двух скважин, пробуренных в изучаемом районе. В частности, рис. 4а относится к скважине W3, а рис. 4б к скважине W4, как показано на рис. 3. Мелководные осадочные образования

района разделены на четыре зоны: ненасыщенные водоносные горизонты, насыщенные водоносные горизонты, верхние удаленные и нижние удаленные горизонты. Поверхность, состоящая из неконсолидированных, кварц-обогащенных песчаных дюн, подстилает водоносный горизонт. Большая часть водоносного горизонта сформирована четвертичными неконсолидированными эоловыми песками, илистыми глинами и известковистыми материалами, отложенными в палео руслах, вырезанных в миоценовых алевроито-глинистых породах и аргиллитах. Этот поверхностный водоносный горизонт разделяется на два комплекса – верхний ненасыщенный водоносный горизонт и нижний насыщенный водоносный горизонт. Он подстилается тонко-зернистыми миоценовыми осадочными породами, которые подразделены на верхний и нижний удаленные комплексы. Верхний удаленный комплекс состоит из преимущественно аргиллитов с прослоями известняков и алевроитов. Нижний удаленный комплекс включает, в основном, алевроито-глинистые породы и эвапориты. Как определено по диаграммам скважинного каротажа и другим данным, средние плотности комплексов составляют приблизительно 1.9, 2.1 и 2.35 г/см³ для ненасыщенного водоносного горизонта, насыщенного водоносного горизонта и верхнего удаленного комплекса, соответственно. Единственная скважина, расположенная в 60 м к юго-востоку от W4, зарегистрировала

Ближний Восток

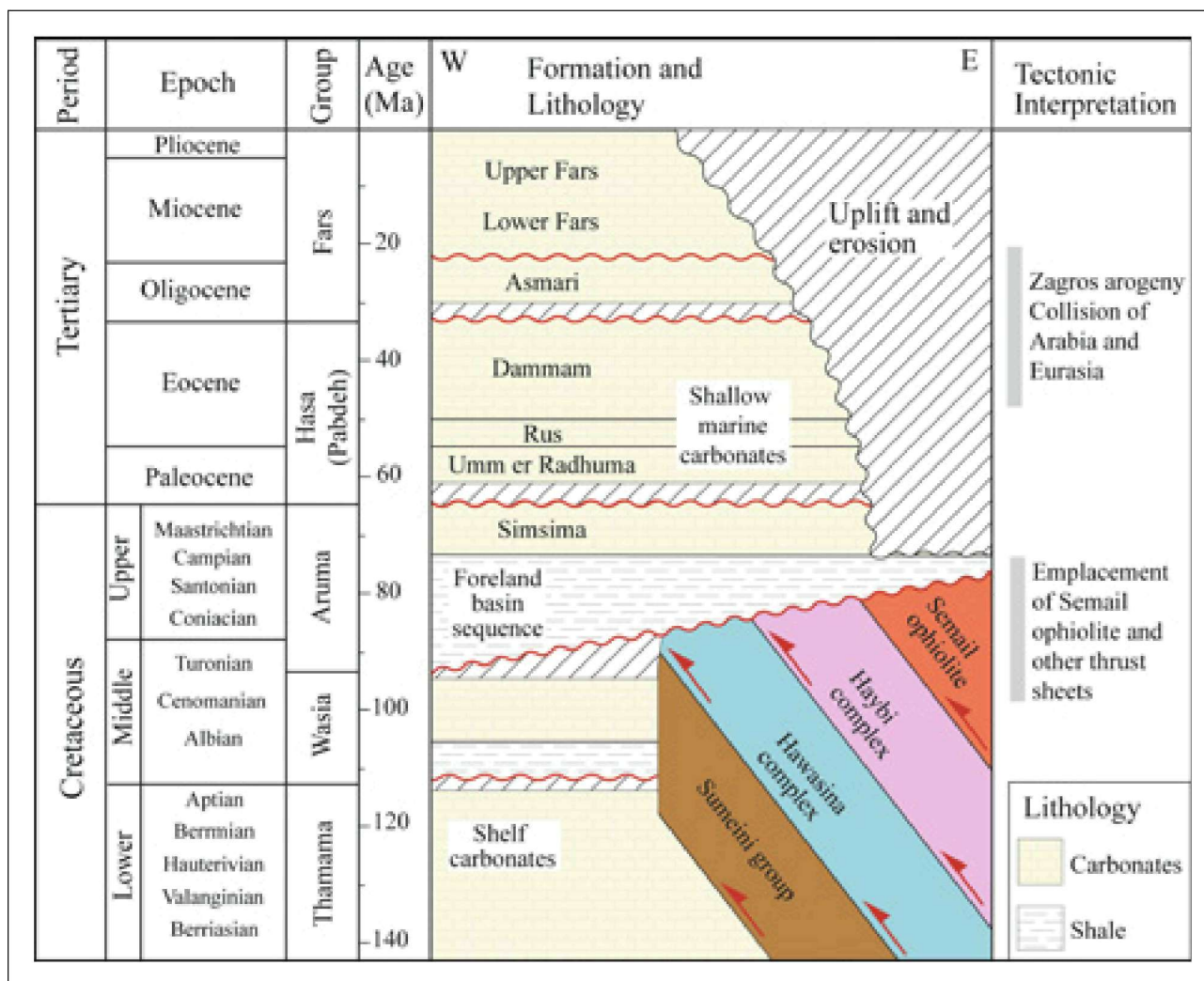


Рис. 2 Стратиграфическая колонка, показывающая современные верхний и нижний удаленные комплексы и надвиговые пласты, важные для геологии региона.

максимальную глубину около 300 м, показывающую среднюю плотность около 2.5 г/см³ для нижнего удаленного комплекса.

Гравиметрические измерения

Было выбрано два параллельных профиля, пересекающих разломную зону и проходящих через каротажные скважины, как показано на рис. 3. Используя портативную GPS для навигации, были установлены точки наблюдения, обозначенные флажками, обычно на расстоянии 50 м друг от друга; гравиметрические измерения проведены гравиметром Scintrex CG-5, а затем была проведена топографическая съемка с применением дифференциального GPS. Северный профиль содержит 44 точки наблюдения. Было также проведено 12 дополнительных измерений до, в течение и после наблюдения на точках профиля для последующего контроля за ошибками измерений и коррекции за сползание нуля-пункта. Южный профиль, состоящий из 46 точек был получен с дополнительными 11 гравиметрическими измерениями для последующего контроля за ошибками измерений и коррекции за сползание нуля-пункта. Каждое значение является

осредненным в течение 60 с значением по гравиметру. Как показано, два профиля расположены на расстоянии 0.6 км друг от друга, имеют длину приблизительно 2.4 км, вытянуты с Запада на Восток с азимутом 80°(10° к северу от востока).

Гравиметрические данные были обработаны, чтобы ввести поправки за широту точки наблюдения, сползание нуля-пункта, высоту точки наблюдения и учесть региональную изменчивость гравитационного поля. Поправка за широту точки наблюдения была вычислена встроенным пакетом программ на гравиметре Scintrex CG-5, ее алгоритм основан на формуле Лонгмана (Longman, 1959). Разрешение гравиметра 0.001 мГал ((1 x 10⁻⁸ м/с²). Поправка за сползание нуля-пункта 0.503 мГал/день была определена по повторным измерениям на пункте, расположенном на базовой станции. Использовалась полная топографическая поправка, равная +0.227 мГал/м, на основании поправки за свободный воздух +0.307 мГал/м и поправки Буге -0.0797 мГал/м (используя среднюю поверхностную плотность 1.9 г/см³ по данным каротажной диаграммы). Так как точки измерений расположены по профилю с азимутом 80°, положения задавались как проекции расстояний на направление запад-восток для каждого профиля. Наконец, региональный градиент силы тяжести +0.400 мГал/км (увеличение на восток) был

Ближний Восток

определен по региональным гравиметрическим исследованиям 1981 г Национальной нефтяной компании Абу-Дали – Поисково-разведочное Управление (перс. Сообщ.), а затем удален из данных. Два профиля размещены так, что южный профиль имеет среднее аномальное значение, равное нулю. Данные не приведены к какому либо абсолютному значению силы тяжести. После введения поправки за сползание нуля-пункта расхождение при повторных наблюдениях составляли ± 0.003 мГал. Расчетная точность топографической съемки составляет ± 7 см по каждому направлению, соответствующему поправке за высоту с погрешностью приблизительно ± 0.006 мГал.

Гравитационное моделирование

Профили аномалий силы тяжести приведены кружочками на рис. 5а для северного профиля и на рис. 5б для южного профиля. Для каждой точки, спроектированной на направление запад-восток, показано значение силы тяжести. На рис. 5а исходное расстояние совпадает с расстоянием в восточном направлении в точке 370,000 м, а для рис. 5б исходное расстояние совпадает с расстоянием в восточном направлении в точке 370,250 м. Графики аномалий силы тяжести показывают возрастание значений силы тяжести с запада на восток на 2.07 и 1.82 мГал для северного и южного профилей, соответственно, при среднем градиенте значений аномалий силы тяжести с запада на восток в +1.0 и +1.2 мГал/км. Также, сравнивая амплитуды минимумов на двух профилях, видим, что может быть выявлен градиент аномалий силы тяжести в направлении с юга на север, приблизительно равный +0.7 мГал/км. Среднее значение амплитуды аномалий силы тяжести на северном профиле на 0.46 мГал больше, чем на южном профиле.

Оба профиля сопоставлены со значениями аномалий силы тяжести, вычисленными по двухмерной модели земли. Модели приведены на рис. 5 с глубинами, показанными на вертикальной оси. Плотности слоев показаны цветом, а стратиграфические комплексы помечены названиями. Для этого рисунка нулевая глубина соответствует высоте 270 м, самой маленькой высоте точки наблюдения. Скважины, которые лежат на гравиметрических профилях, показаны черным цветом с указанной максимальной истинной глубиной. Различия между наблюдаемыми и модельными значениями аномалий силы тяжести показаны тонкими голубыми и красными линиями.

Каротажные диаграммы обеспечивают ограничения при моделировании. Первое, места заложения скважин дают постоянный уровень грунтовых вод около 240 м, соответствующий постоянной границе на глубине 30 м между ненасыщенными и насыщенными водоносными горизонтами. Второе, совпадение скважин с гравиметрическими профилями накладывает ограничения на границы малоглубинных комплексов. Для W1, например, каротажная диаграмма показывает подошву водоносного горизонта вблизи уровня грунтовых вод и среднюю плотность 2.5 г/см³ на дне скважины. Наклон разлома, использованный в модели, оценивался по результатам Woodward (1994). Гравитационные модели четко показывают положение соответствующего надвига около 1000±50 м, как показано жирной красной линией. Если экстраполировать относительно поверхности, положение сброса расположено на северном профиле на расстоянии 370,000 м, а на южном на 371,250 м. Базируясь на данных аномалий силы тяжести и моделях сброс согласуется с предполагаемой линией разлома, показанной на карте на рис. 3, с его линией на поверхности, расположенной в 250 м по направлению на запад.

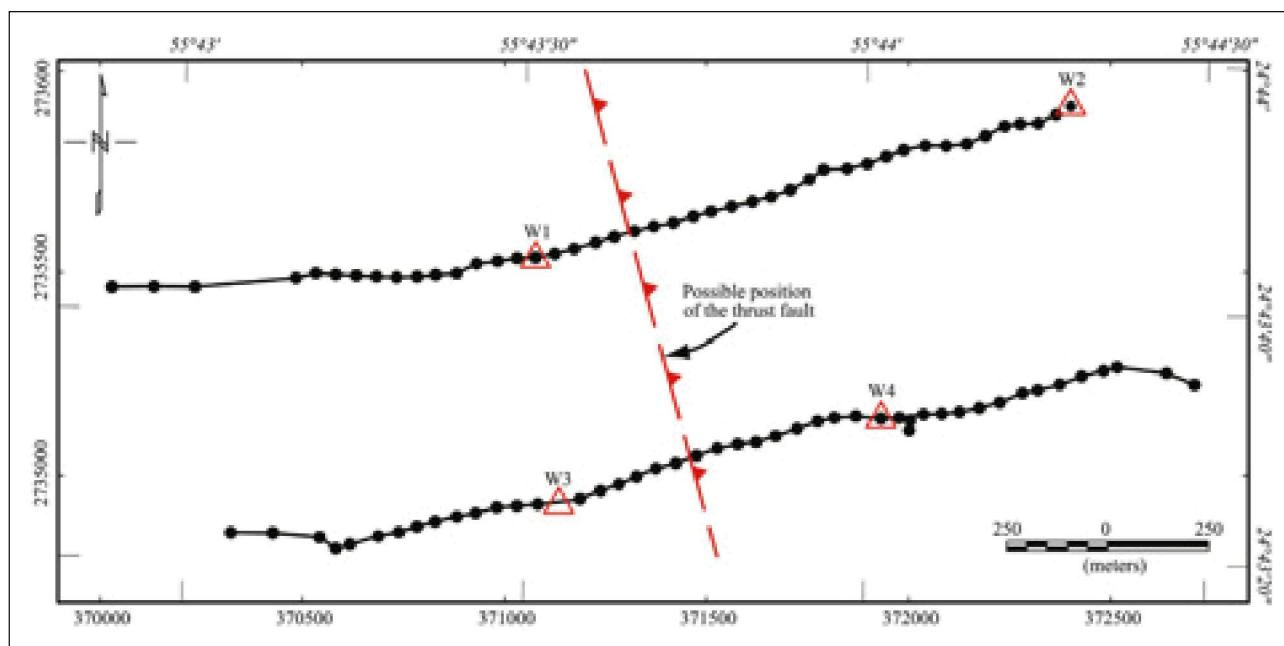


Рис. 3 Карта местности, показывающая возможное положение надвига, проходящего через расположение двух профилей гравиметрических измерений, и положения четырех каротажных скважин на профилях.

Ближний Восток

Модели также показали существенные изменения глубин водоносного горизонта и верхнего удаленного комплекса. В частности, на северном профиле водоносный горизонт и верхний удаленный комплекс значительно тоньше, чем на южном профиле. Как правило, обогащенный эвапоритами нижний удаленный комплекс приблизительно на 350-400 м ниже земной поверхности, а надвигообразование переместило комплекс на глубины менее 100 м от поверхности земли. Эта близость обогащенного эвапоритами комплекса к ASR может оказывать воздействие на соленость водоносного горизонта. Эти результаты

указывают, что надвиг может быть посредником в распределении в районе грунтовой воды хорошего качества, зависящего от объема смешения с циклами вторичного хранения, и может оказывать влияние на качество воды, сохраненной на этом месте в будущей системе ASR.

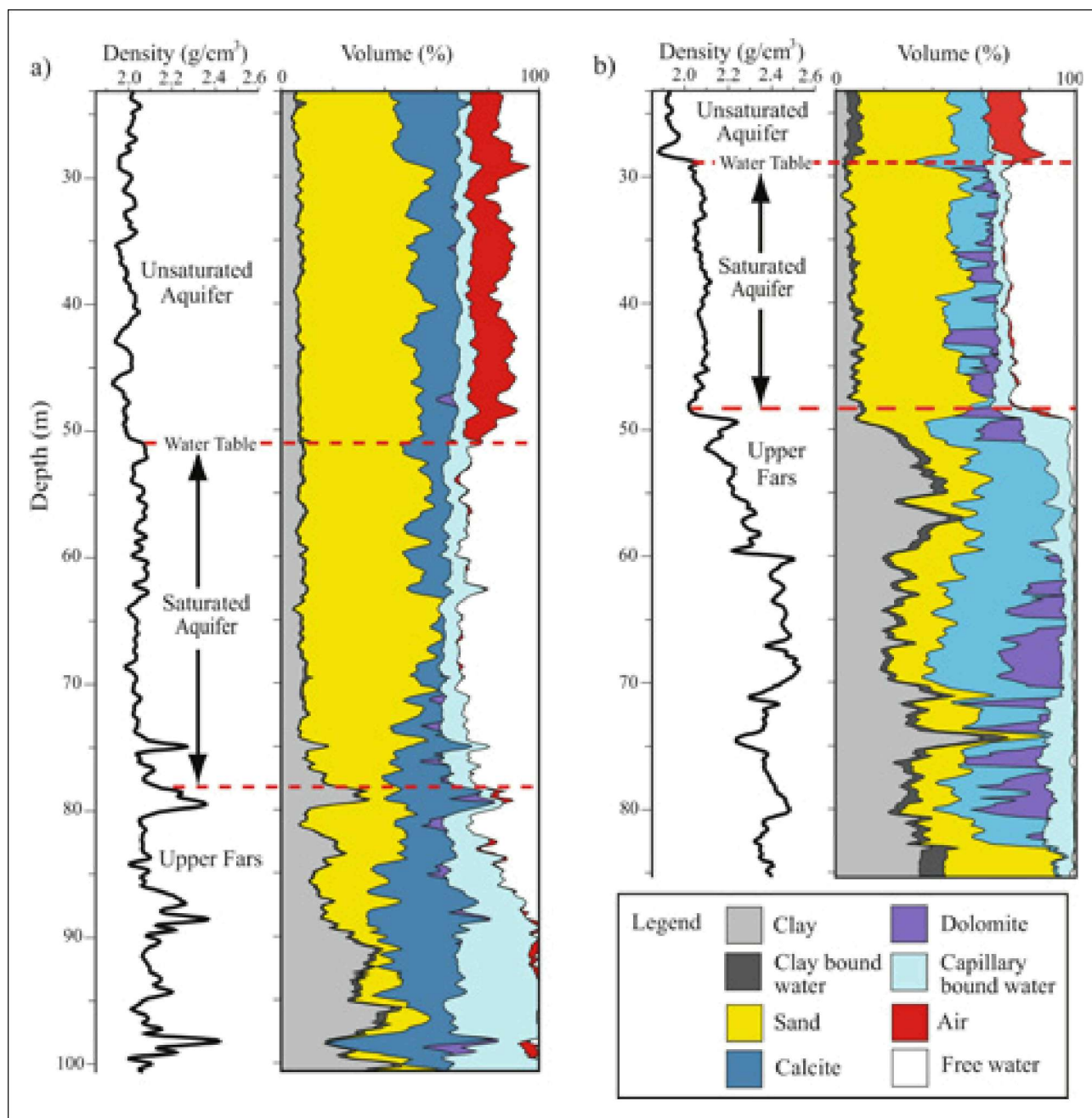


Рис. 4 Геофизические данные каротажных диаграмм, показывающие глубину горизонта грунтовых вод и границы комплексов для (а) скважины W3 и (б) скважины W4.

Ближний Восток

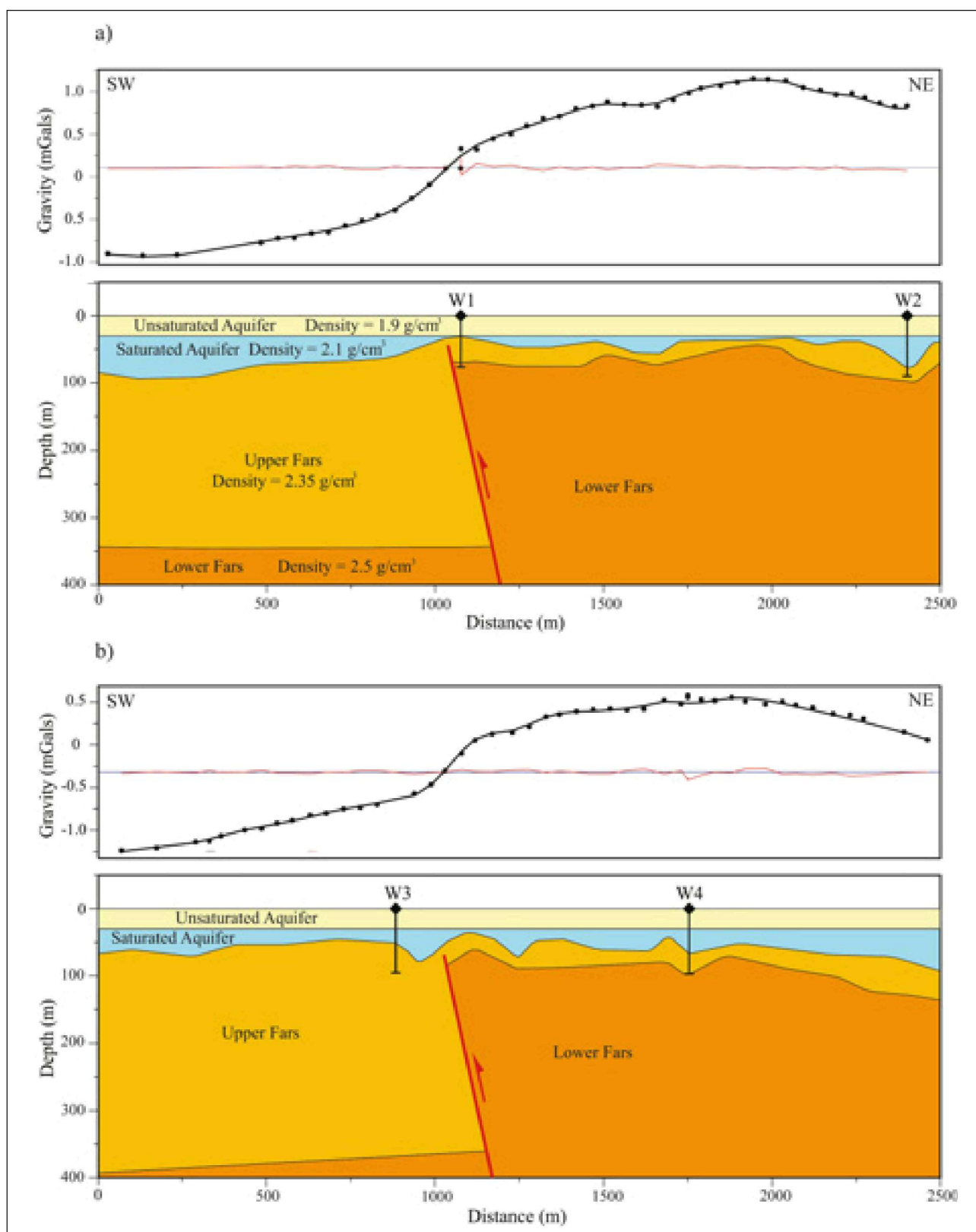


Рис. 5 (а) Северный и (б) южный профили аномалий силы тяжести в редукции Буге и соответствующие модели, определяющие положение надвига и изменчивость мощности поверхностного водоносного горизонта.

Ближний Восток

Выводы

Это микрогравиметрическое исследование раскрыло ценные детали геологической структуры, подстилающей место размещения ASR, и границы между насыщенным водоносным горизонтом и более плотным удаленным комплексом. Важные особенности для обоснования будущего расширения поля ASR связаны с приподнятым нижним удаленным комплексом с его более высокой концентрацией эвапоритов и изменчивостью глубин нижней границы водоносного горизонта, которая вероятно влияет на водный поток в процессе накачивания воды и получения ее обратно. Эти результаты являются обоснованием для будущих гравиметрических измерений, дальнейшего изучения плотностной изменчивости с севера на юг и выявления других направлений и структурных деталей водоносного горизонта.

Литература

- Al Katheeri, E.S. [2007] Towards the establishment of water management in Abu Dhabi Emirate. *Water Resources Management*, DOI 10.1007/s11269-006-9151-y, <http://www.springerlink.com/content/53171340528p3143>.
- Brook, M.C., Al Houqani, H., Darawsha, T., Al Alawney, M., and Achary, S. [2006] Groundwater resources: development and management in the Emirate of Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Proceedings of the 3rd Joint UAE-Japan Symposium on Sustainable GCC Environment and Water Resources*, Conference Paper, Al Ain, UAE, available from the Environmental Agency - Abu Dhabi, <http://www.ead.ae/>.
- Dawoud, M.A. [2005] The role of desalination in augmentation of water supply in GCC countries. *Desalination*, 186 (1-3), 187-198.
- Longman, I.M. [1959] Formulas for computing tidal accelerations due to the moon and the sun. *J. Geophysical Research*, 64, 2351-2355.
- Searle, M.P., Cooper, D. J. W., and Watts, K.F. [1990] Structure of the Jebel Sumeini-Jebel Ghawil area, Northern Oman. In: Robertson, A.H.F., Searle, M.P., and Ries, A.C. (Eds.), *The Geology and Tectonics of the Oman Region. Geological Society of London, Special Publications*, 49, 361-374.
- Searle, M.P., James, N.P., Calon, T.J., and Smewing, J.D. [1983] Sedimentological and structural evolution of the Arabian continental margin in the Musandam Mountains and Dibba zone, United Arab Emirates. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 1381-1400.
- Woodward, D. [1994] Contributions to a shallow aquifer study by reprocessed seismic sections from petroleum exploration surveys, eastern Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Journal of Applied Geophysics*, 31, 271-289.