

СТРОЕНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПО АНОМАЛИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

© 2022 А.А. Петрова, О.В. Латышева

*Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, 199034; e-mail: office@izmiran.spb.ru*

Поступила в редакцию 08.06.2022; после доработки 26.06.2022; принята в печать 27.06.2022

Представлены результаты исследования основных характеристик и особенностей строения систем водоносных горизонтов холодных и термальных вод на примере известных источников стран Ближнего Востока. Исследование водоносных горизонтов подземных вод проведено на основе технологии комплексной интерпретации геофизических данных с учетом особенностей геологического строения водоносных слоев. Водоносные горизонты и подземные резервуары визуализируются в виде зон пониженной намагниченности и плотности пород на глубинных петрофизических разрезах, рассчитанных по аномалиям магнитного поля и силы тяжести. Горизонтальные водоводы отчетливо прослеживаются на площадных распределениях намагниченности и плотности по простираниям линияментов с пониженными значениями. Вертикальные водоводы ярко выделяются на магнитных и плотностных разрезах в виде восходящих треков. В результате проведенного исследования глубинных разрезов через зоны известных термальных источников получена оценка зависимости температуры источника от глубины залегания подпитывающих подземных резервуаров. Рассмотрен потенциал водоносных горизонтов подземных ресурсов засушливых территорий Израиля, Королевства Саудовская Аравия и Объединенных Арабских Эмиратов, для которых актуальность водной проблемы, по-видимому, не снизится в ближайшие десятилетия. Сделан вывод о том, что прогноз местоположения карстовых резервуаров подземных вод может осуществляться по магнитным и плотностным разрезам с учетом двумерных моделей распределения намагниченности и плотности пород, а методика исследования систем водоносных горизонтов применима для анализа подземных ресурсов засушливых районов.

Ключевые слова: водоносные горизонты, резервуары подземных вод, водные ресурсы.

ВВЕДЕНИЕ

Аравийский полуостров (АП) за исключением участка, прилегающего к Оманскому заливу, представляет собой древнюю наклоненную к востоку глыбу. Кристаллический фундамент (рис. 1) выходит на дневную поверхность на западе и юго-западе полуострова. В остальных районах он скрыт юрскими, меловыми и палеогеновыми отложениями разнообразного состава, частично смятыми в слабые складки, а частично залегающими горизонтально.

Цель настоящего исследования — оценить потенциал подземных водных ресурсов районов Ближнего Востока на основе комплексной интерпретации водоносных горизонтов известных источников, опубликованных в работах

(Aboud et al., 2021; Al-Sand et al., 2011; Alsharhan et al., 2020; Chebotarev, 1955; Dafny et al., 2010; Gavrieli et al., 2019; Rizk et al., 2003; Sherif et al., 2021; UN-ESCWA, 2013; Weinberger et al., 2012) (рис. 1).

Потребность в воде в регионе АП растет в результате роста населения. Для разведки подземных вод и обнаружения водонасыщенных полостей в Объединенных Арабских Эмиратах (ОАЭ) успешно использовались методы электромагнитного зондирования во временной области (TDEM) и классического вертикального электрического зондирования (VES). В 2005 г. впервые был использован метод 2D ERI в районах ОАЭ, где есть несколько мониторинговых скважин с известной информацией о бурении (Sherif et al., 2006).

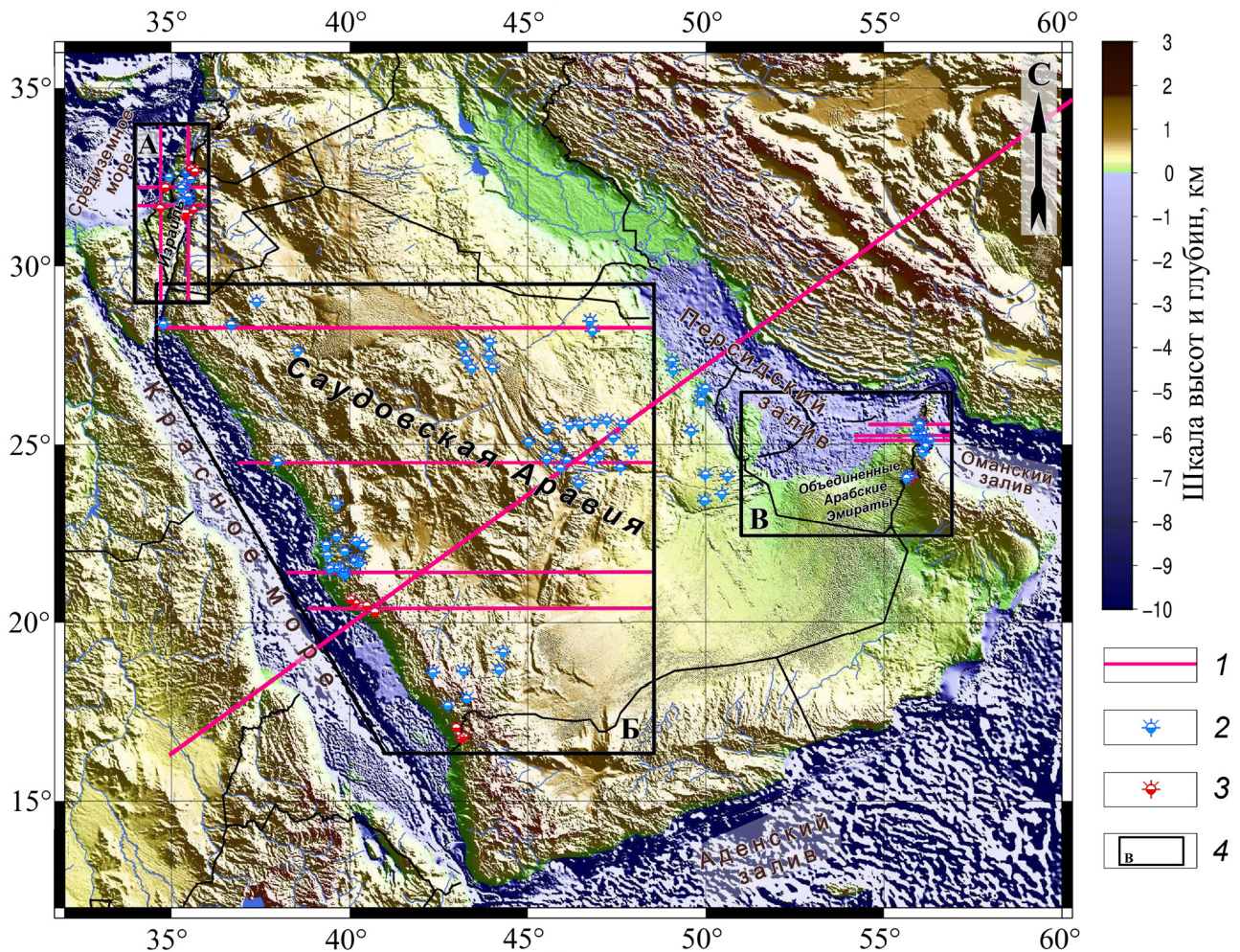


Рис. 1. Источники холодной и термальной воды Аравийского полуострова: 1 — положение профилей глубинных разрезов. Источники: 2 — холодной воды; 3 — термальной воды; 4 — исследуемые районы.

Fig. 1. Sources of cold and thermal water of the Arabian Peninsula: 1 — position of profiles of deep sections; sources: 2 — cold water; 3 — thermal water; 4 — study areas.

В настоящей статье оцениваются ресурсы различных типов водоносных горизонтов подземных вод территорий Израиля, Королевства Саудовская Аравия (КСА) и ОАЭ на основе комплексной интерпретации аномалий магнитного поля и силы тяжести. Геологическое строение существенно влияет на распределение подземных вод, типы водоносных горизонтов и характер их залегания. Проводимое нами исследование глубинного строения водоносных слоев основано на интеграции различных дисциплин науки, включая геологические, гидрогеологические, геофизические и гидрологические.

Источниками пресной воды в засушливых районах являются природные подземные воды. Влияние климатических изменений ощущается на незащищенных или неглубоких водоносных горизонтах, глубокие и замкнутые водоносные горизонты могут не подвергаться серьезному воздействию изменений климата, поскольку они не находятся в контакте с современным

гидрологическим циклом. Среди них наиболее интересными являются невозобновляемые хранилища ископаемых подземных вод (Awadh et al., 2021). Приповерхностные водоносные горизонты подпитываются водами из глубинных резервуаров через трещиноватые породы.

Петрофизические разрезы, построенные вкрест простирания водоносных слоев исследуемых территорий, иллюстрируют изменение с глубиной физических параметров пород, составляющих сложные системы поверхностных и глубоких горизонтов подземных вод (рис. 2–7).

Для моделирования потока подземных вод первостепенное значение имеет определение местоположения и ориентации зон трещиноватости и дизъюнктивных нарушений земной коры. Наземные геофизические методы рассматриваются как быстрое и недорогое дополнение определения местоположения и ориентации зон трещиноватости в коренных породах. Интерпретация магнитных аномалий модуля,

Н-компоненты и аномалий поля силы тяжести успешно используется в сочетании с геологическими, гидрологическими и скважинно-геофизическими исследованиями для оптимизации местоположения установки скважин. Шовные зоны, подвижные пояса и другие разломные нарушения четко прослеживаются на двумерных площадных моделях магнитных и плотностных свойств разных глубинных уровней в виде линиаметов с пониженными параметрами. Перспективные источники

воды залегают вдоль линий, контролируемых глубинными разломами. Глубина разломных нарушений земной коры отслеживается на плотностных и магнитных разрезах в виде вертикальных и наклонных разуплотненных и слабомагнитных зон (рис. 2–7) (Петрова, Копытенко, 2019, 2019а; Петрова и др. 2020, 2022; Petrova et al., 2019).

По результатам интерпретации геофизических данных исследуется влияние геологического строения, карстовой системы на

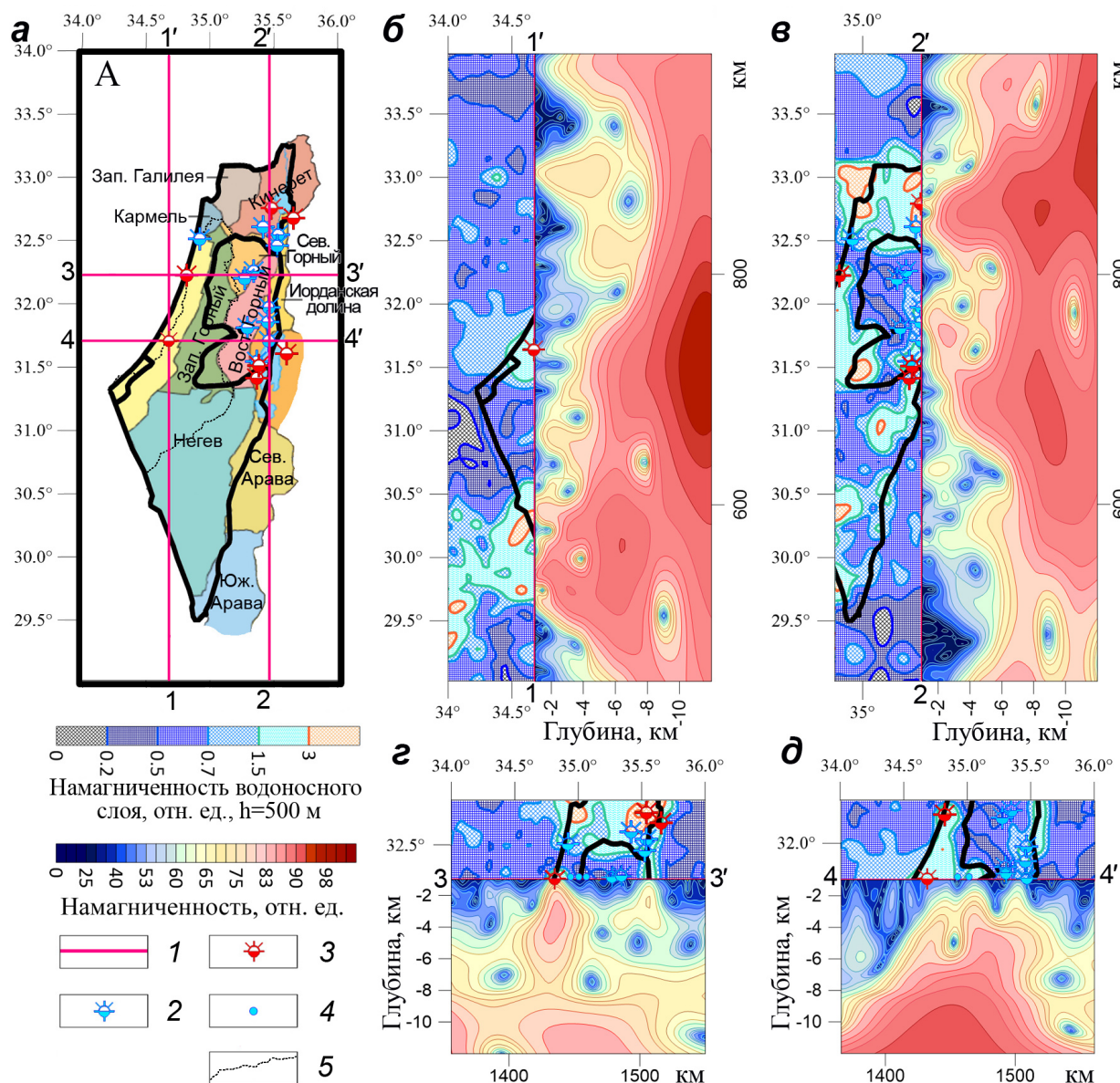


Рис. 2. Расположение водоносных горизонтов Израиля (Weinberger et al., 2012) с некоторыми дополнениями: (а) — схема расположения профилей глубинных разрезов; (б–д) — магнитные разрезы водоносных горизонтов источников холодной и термальной воды, построенные по аномалиям модуля МПЗ, подоснова — площадное распределение намагненности пород вдоль профилей на глубине 500 м. 4 — колодцы (холодная вода); 5 — граница провинции Яркон — Таниним. Условные обозначения 1–3 представлены на рис. 1.

Fig. 2. Location of aquifers in Israel (Weinberger et al., 2012) with some additions: (а) — layout of depth profiles; (б–д) — magnetic sections of aquifers of cold and thermal water sources, constructed according to the anomalies of the EMF module, background — areal distribution of rock magnetization along profiles at a depth of 500 m. 4 — wells (cold water); 5 — border of the Yarkon — Taninim province. The symbols 1–3 are shown in fig. 1.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

режим выхода питьевых и минерализованных подземных вод. На плотностных и магнитных разрезах отчетливо визуализируется характер складчатости водоносных горизонтов, картируемый надвигами, и литология водоупоров, сдерживающих подповерхностные водоносные слои. На плотностных разрезах ярко отражаются горизонты, сложенные карстовыми известняками. Гидравлическая проводимость пород — важный фактор перспективности подземных водоносных слоев, который увеличивается на несколько порядков в процессе карстификации известняков.

В работе представлена методика исследования внутреннего строения глубинных водоносных слоев и поиск новых долгоживущих источников, подпитывающихся из глубинных резервуаров большой емкости.

2D моделирование петрофизических разрезов по аномалиям магнитного поля и поля силы тяжести позволяет выявить особенности структурно-тектонического строения земной коры. Глубинный разрез дает возможность

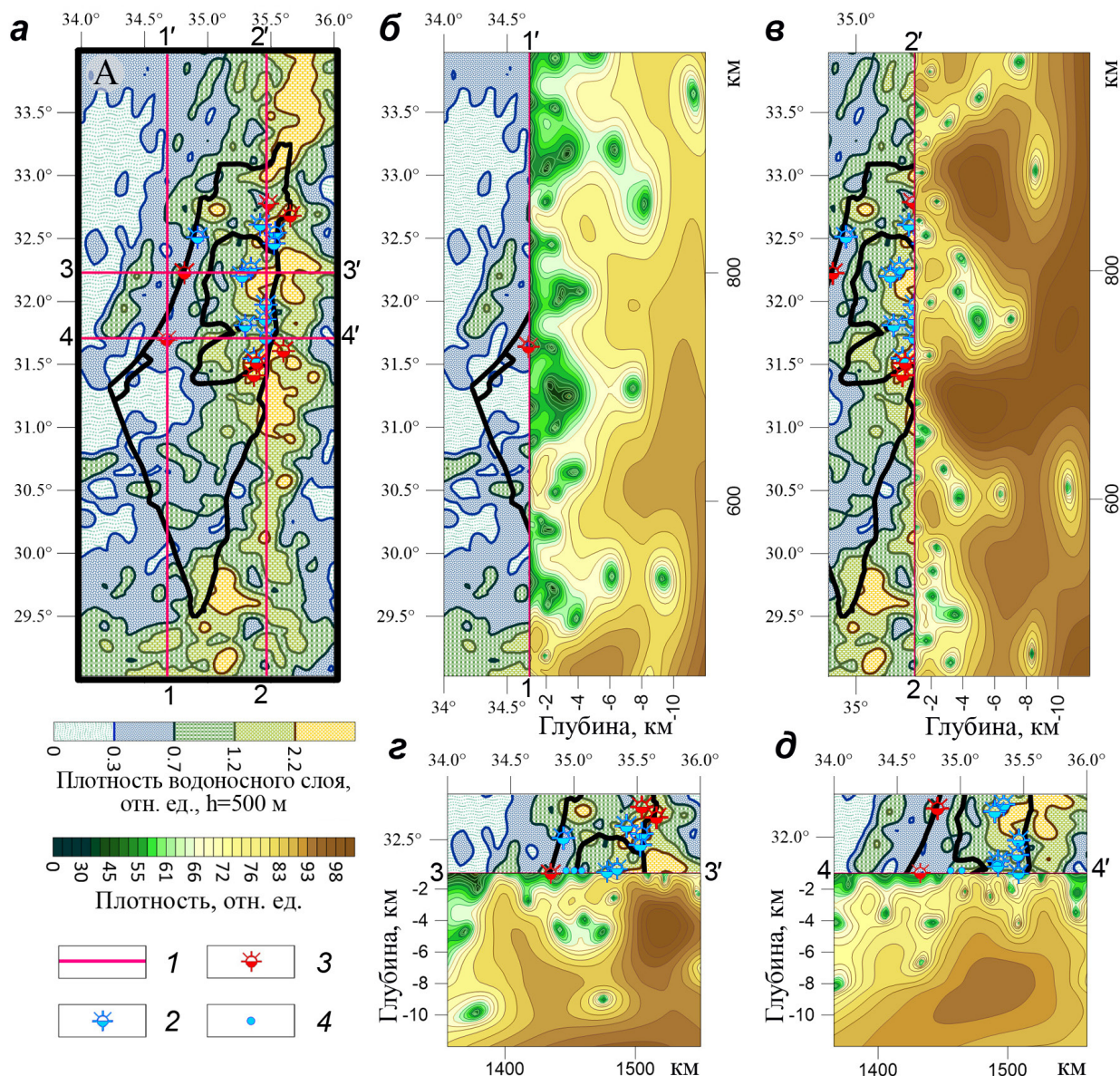


Рис. 3. Плотностные характеристики водоносных горизонтов Израиля: (а) — схема распределения плотности, положение профилей; (б–д) — глубинные плотностные разрезы водоносных горизонтов, подоснова — площадное распределение плотности пород вдоль профилей на глубине 500 м. 4 — колодцы (холодная вода) (Weinberger et al., 2012). Условные обозначения 1–3 представлены на рис. 1.

Fig. 3. Density characteristics of aquifers in Israel: (a) density distribution scheme, profile positions; (б–д) — deep density sections of aquifers, background — areal distribution of rock density along profiles at a depth of 500 m. 4 — wells (cold water) (Weinberger et al., 2012). The symbols 1–3 are shown in fig. 1.

оценить мощность и глубину залегания комплексов, отличающихся по магнитным и плотностным свойствам, обусловленным как вещественным составом, так и физическим состоянием пород.

Петрофизические разрезы демонстрирует картину распределения с глубиной намагниченности и плотности пород, создающих аномалии

от различных литолого-стратиграфических комплексов. Исследование земной коры известных источников показало, что наиболее характерным свойством водоносных горизонтов трещинно-карстового происхождения является пониженная намагниченность и плотность горных пород. Это позволяет использовать это свойство в качестве критерия обнаружения водоносных

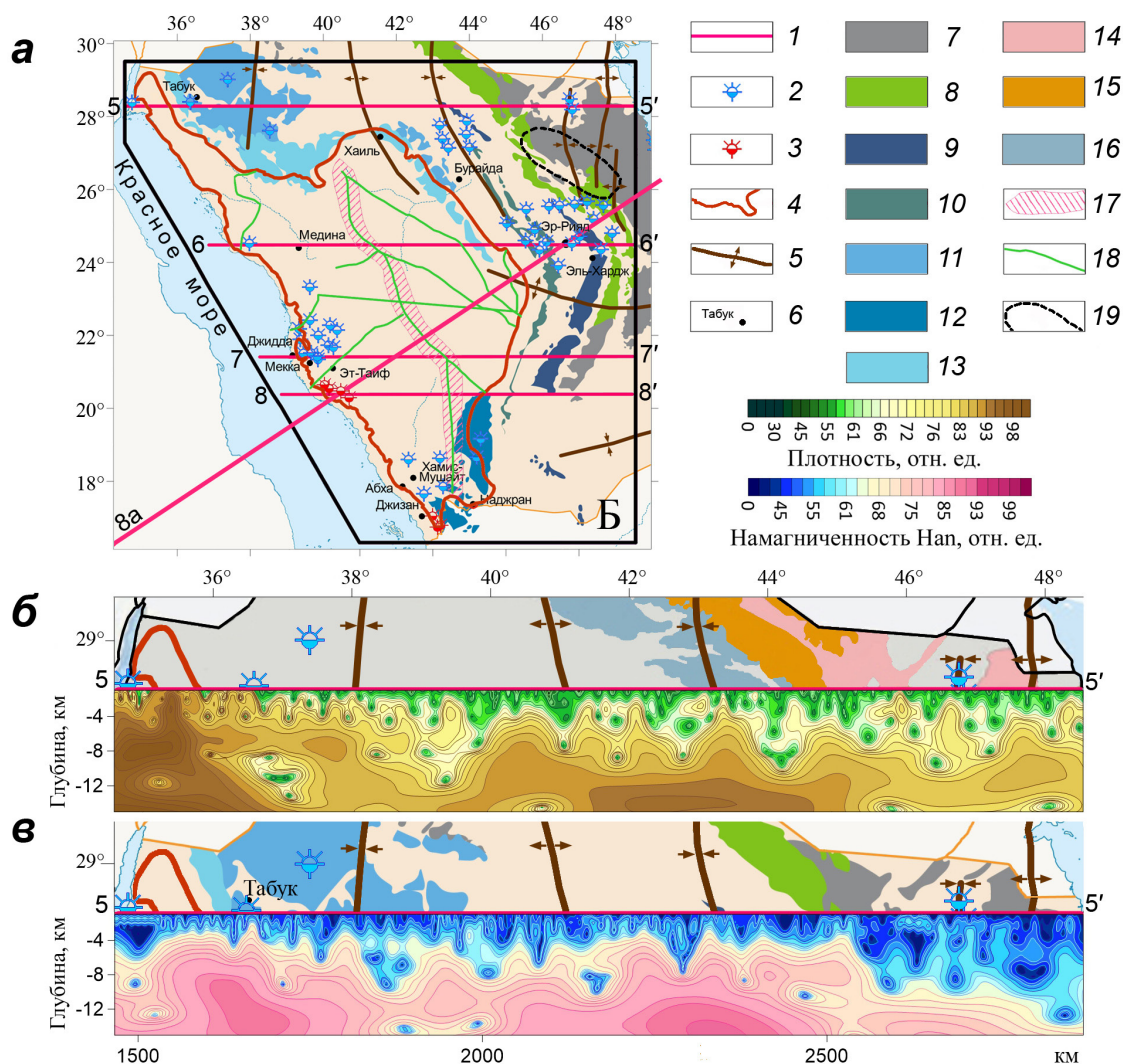


Рис. 4. Обнажения известковых формаций водоносных горизонтов КСА (Chowdhury, Al-Zahrani, 2015; Hird et al., 2019) с некоторыми дополнениями: (а) — схема карстовых горизонтов и положение профилей глубинных разрезов; Профиль 5: (б) — плотностной разрез, подоснова — границы водоносных горизонтов известковых пород разных формаций (UN — ESCWA and BGR, 2013): 4 — Аравийский щит; 5 — разломные зоны; 6 — города; 7 — Неоген; 8 — Умм-эр-Радхума; 9 — Рияд-Васия; 10 — Минджур-Дурма; 11 — Табук; 12 — Ваджид; 13 — Асир. (в) — магнитный разрез по аномалиям Н-компоненты МПЗ, подоснова — формации пород, подверженных растворению и склонных к проседанию (Eldosouky et al., 2022; Forti et al., 2003): 14 — Неоген; 15 — Палеоген; 16 — Поздний мел; 17 — подвижный пояс; 18 — шовная зона; 19 — плато Ас Сульб. Условные обозначения 1–3 представлены на рис. 1.

Fig. 4. Outcrops of calcareous formations of KSA aquifers (Chowdhury and Al-Zahrani, 2015; Hird et al., 2019) with some additions: (a) — scheme of karst horizons and position of profiles of deep sections; Profile 5: (b) — density section, background — boundaries of calcareous aquifers of different formations (UN — ESCWA and BGR, 2013): 4 — Arabian shield; 5 — fault zones; 6 — cities; 7 — Neogene; 8 — Umm er Radhuma; 9 — Riyadh and Wasia; 10 — Minjur and Dhurma; 11 — Tabuk; 12 — Wajid; 13 — Aseer. (c) magnetic section along the anomalies of the H-component of the EMF, background — rock formations subject to dissolution and prone to subsidence (Eldosouky et al., 2022; Forti et al., 2003): 14 — Neogene; 15 — Paleogene; 16 — Late Cretaceous; 17 — movable belt; 18 — suture zone; 19 — As Sulb Plateau. The symbols 1–3 are shown in fig. 1.

СТРОЕНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

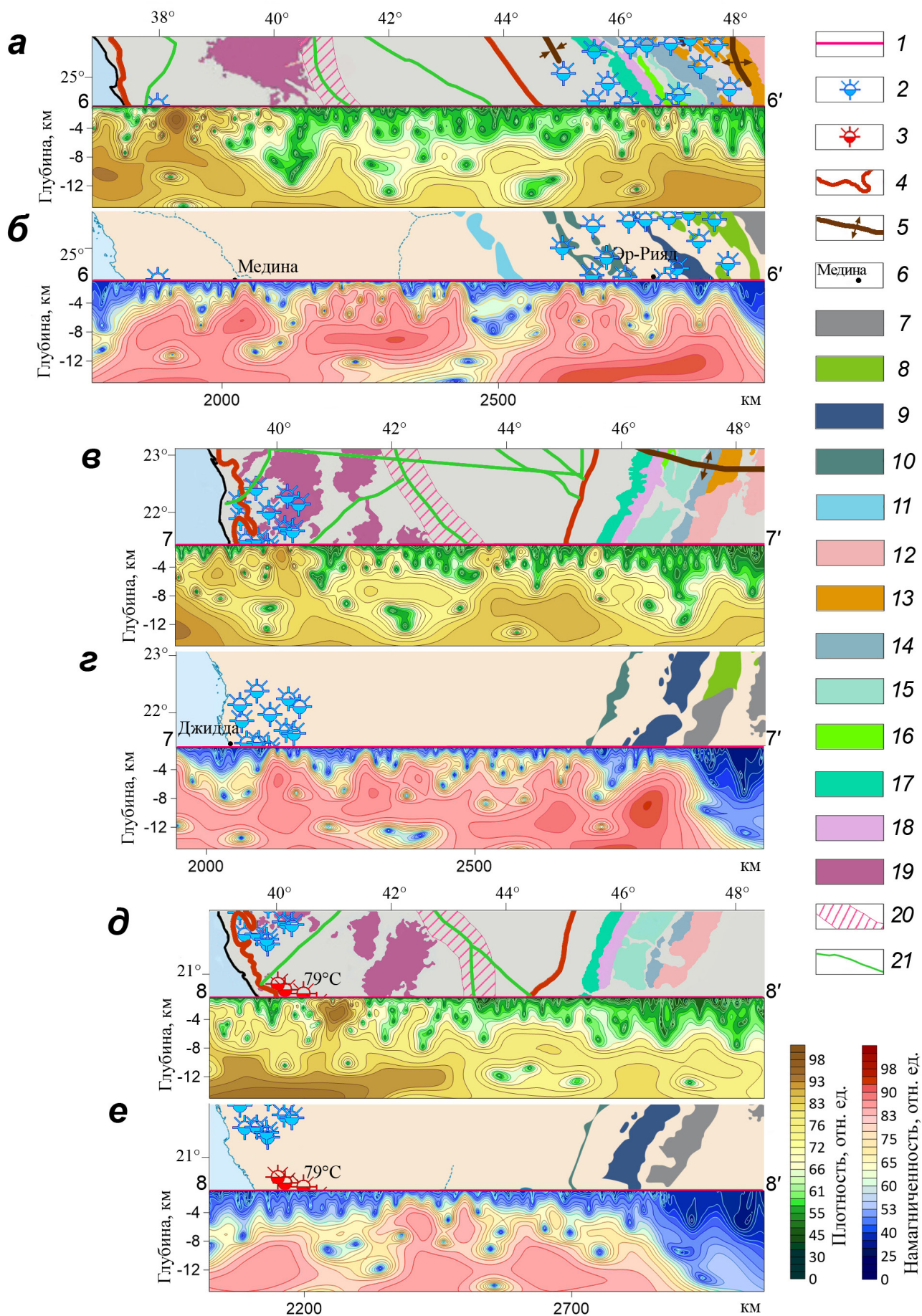


Рис. 5. Плотностные и магнитные характеристики глубоких водоносных горизонтов КСА (Chowdhury, Al-Zahrani, 2015; Hird et al., 2019). Разрезы по профилям 6–8: (а, в, д) — плотностные, подоснова — известковые водоносные горизонты; (б, г, е) — магнитные по аномалиям модуля МПЗ, подоснова — формации пород, подверженные карстификации (Eldosouky et al., 2022; Forti et al., 2003): 11 — Асир; 12 — Неоген; 13 — Палеоген; 14 — Поздний мел; 15 — Средний мел; 16 — Нижний мел; 17 — Верхняя юра; 18 — юра; 19 — харраты; 20 — подвижный пояс; 21 — шовная зона. Условные обозначения 1–3 представлены на рис. 1. Условные обозначения 4–10 представлены на рис. 4.

Fig. 5. Density and magnetic characteristics of deep aquifers KSA (Chowdhury, Al-Zahrani, 2015; Hird et al., 2019). Sections along profiles 6–8: (a, v, d) — density, background — calcareous aquifers; (b, g, e) — magnetic according to EMF module anomalies, background — rock formations subject to karstification (Eldosouky et al., 2022; Forti et al., 2003): 11 — Asee; 12 — Neogene; 13 — Paleogene; 14 — Late Cretaceous; 15 — Middle Cretaceous; 16 — Lower Cretaceous; 17 — Upper Jurassic; 18 — Jurassic; 19 — harrats; 20 — movable belt; 21 — suture zone. The symbols 1–3 see fig. 1. The symbols 4–10 see fig. 4.

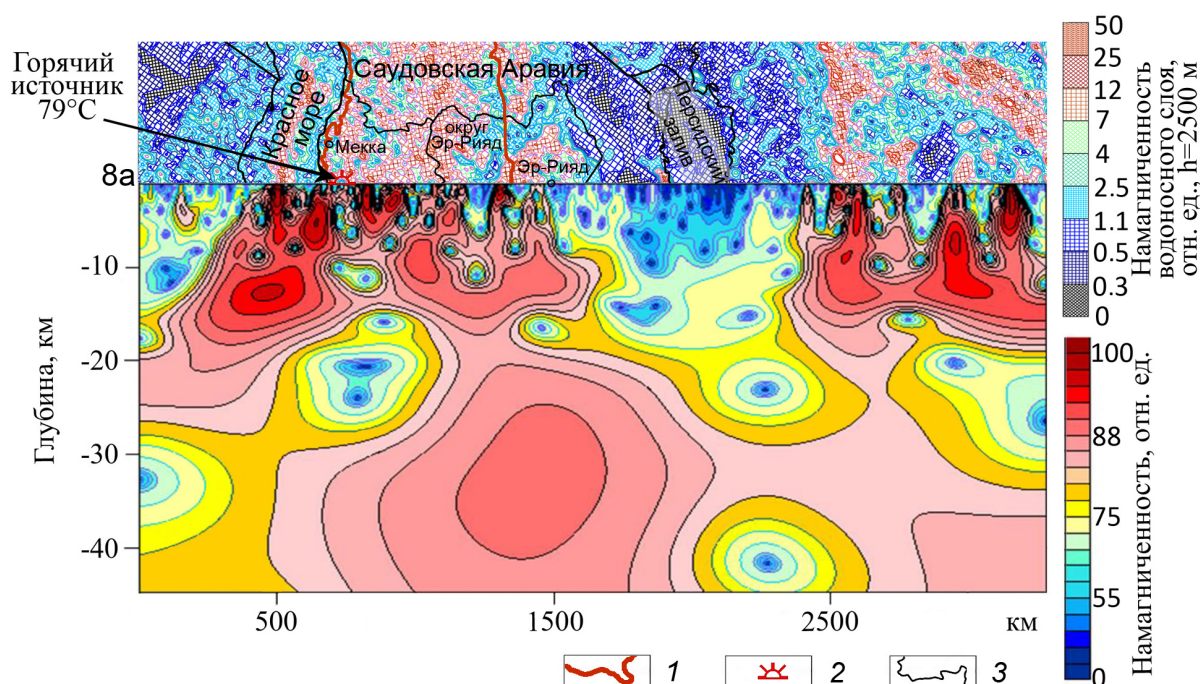


Рис. 6. Магнитные характеристики земной коры термального источника КСА (Петрова и др., 2013) с некоторыми дополнениями. Подоснова — площадное распределение намагниченности пород вдоль профиля 8а. 1 — Аравийский щит; 2 — источник термальной воды; 3 — границы округов.

Fig. 6. Magnetic characteristics of the Earth's crust of the KSA thermal source (Petrova et al., 2013) with some additions. The background basis is the areal distribution of rock magnetization along profile 8a. 1 — Arabian shield; 2 — source of thermal water; 3 — borders of districts.

горизонтов с целью прогнозирования резервуаров подземных вод.

Для получения представления о простирании неоднородностей водоносных слоев и ориентации зон трещиноватости строятся элементы 3D модели в виде срезов на разных уровнях, например, на глубинах, доступных для бурения. Они визуализируются в виде двумерных матриц на всей площади работ (рис. 2–3, 6–7). Уровень срезов земной коры определяется по 2D моделям петрофизических разрезов на глубине зон пониженных значений намагниченности и плотности. Совместное представление вдоль профиля глубинного петрофизического разреза двумерной площадной матрицы на уровне оптимального среза позволяет провести

моделирование потока подземных вод с учетом ориентации зон трещиноватости.

В основе построения глубинных разрезов водоносных горизонтов и резервуаров подземных вод лежит спектрально-пространственное представление аномальных полей, конвертируемых в петрофизические разрезы на основе закона изменения спектральной структуры аномального поля с высотой (Петрова, 1976, 1977; Петрова, Колесова, 1986; Петрова, Копытенко, 2019; Петрова, и др., 2020; Petrova et al., 2019). Методика применения спектрально-пространственного анализа (СПАН) для формирования магнитной и плотностной модели глубинных разрезов изложена авторами в работах (Петрова, Копытенко, 2019; Петрова и др.,

2022; Petrova, Petrishchev, 2011, 2014; Petrova et al., 2019). Плотностные разрезы построены по аномалиям силы тяжести (Bonvalot et al., 2012), магнитные — по аномалиям модели СПбФ ИЗМИРАН (Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук) (Копытенко, Петрова, 2016, 2020; Koryutenko et al., 2021; Petrova et al., 2022).

По результатам СПАН на основе материалов высокоточных съемок Западной и Восточной Сибири сделан прогноз месторождений подземных вод и проведен анализ земной коры геотермальных источников Западной Европы и западного побережья АП (Копытенко и др., 2011; Петрищев, Петрова, 2011; Петрова и др., 2013; Петрова, Копытенко, 2019, 2019а; Петрова, Петрищев, 2011; Petrishchev et al., 2011; Petrishchev et al., 2013; Petrova, Petrishchev, 2011, 2014).

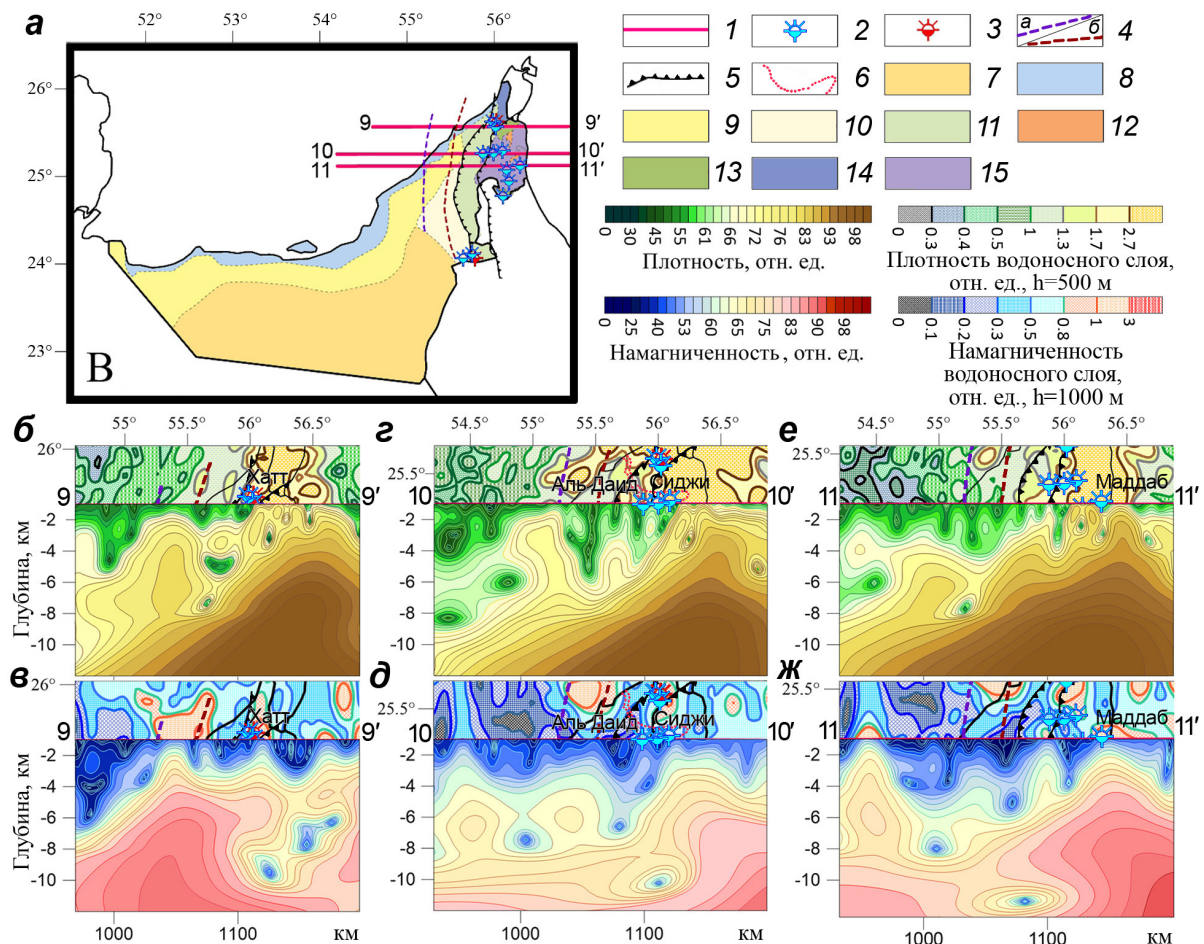


Рис. 7. Плотностные и магнитные характеристики глубоких водоносных горизонтов ОАЭ: (а) — упрощенная геологическая схема (Mitchell, 2016) с некоторыми дополнениями, положение профилей. Разрезы по профилям 9–11: (б, г, е) — плотностные, подоснова — схема распределения плотности пород; (в, д, ж) — магнитные по аномалиям модуля МПЗ, подоснова — схема распределения намагниченности пород. 4а — ось прибрежного бассейна Рас эль Хайма; 4б — ось прибрежного бассейна Арума; 5 — зона субдукции; 6 — супер — бассейн Аль Даид; 7 — четвертичные перевеваемые ветром (дюнные) пески; 8 — морские и прибрежные карбонаты голоцена; 9 — осадочные породы позднего миоцена; 10 — речной гравий; 11 — позднемеловые — палеогеновые отложения прибрежного бассейна; 12 — полидеформированные метаморфические породы; 13 — осадочные отложения зоны Дибба и Хата; 14 — известняки триасса и верхнего мела; 15 — офиолиты (Alsharhan, Rizk, 2020). Условные обозначения 1–3 представлены на рис. 1.

Fig. 7. Density and magnetic characteristics of UAE deep aquifers: (a) Simplified geological map (Mitchell, 2016) with some additions, profile positions. Sections along profiles 9–11: (b, g, e) — density, background — scheme of rock density distribution; (v, d, ж) — magnetic by EMF modulus anomalies, background — rock magnetization distribution scheme. 4a — axis of the Ras el Khaimah coastal basin; 4b — axis of the Arum coastal basin; 5 — subduction zone; 6 — super — basin Al Daid; 7 — Quaternary windblown (dune) sands; 8 — marine and coastal Holocene carbonates; 9 — sedimentary rocks of the Late Miocene; 10 — river gravel; 11 — Late Cretaceous — Paleogene deposits of the coastal basin; 12 — polydeformed metamorphic rocks; 13 — sedimentary deposits of the Dibba and Khata zones; 14 — Triassic and Upper Cretaceous limestones; 15 — ophiolites (Alsharhan and Rizk, 2020). Symbols 1–3 are shown in fig. 1.

Применение методики СПАН для исследования глубинного строения АП позволило изучать структурные особенности региона. Обнаружена хорошая корреляция между отражениями геологических структур, исследованных в работах (Rehman, Shash, 2005; Stern, Johnson, 2010), и проявлениями траекторий дизъюнктивных нарушений, визуализированных на петрофизических разрезах. В процессе работы выявлены критерии отражения на магнитных и плотностных разрезах геотермальных зон и подземных резервуаров холодных вод АП.

По материалам изучения водоносных горизонтов известных источников холодных и термальных вод в районах Ближнего Востока на основе магнитных и плотностных разрезов нами проводится оценка экспериментальной зависимости температуры источников от глубины залегания резервуаров подземных вод.

Методика, применяемая в настоящей работе, дает возможность исследовать внутреннее строение водоносных горизонтов, прогнозировать местоположение возобновляемых источников и оценивать потенциал водных ресурсов на основе комплексной интерпретации аномалий магнитного поля и силы тяжести.

СТРОЕНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ИЗРАИЛЯ

Израиль расположен на восточном побережье Средиземного моря в северо-западной части АП (рис. 1). На 95% территория состоит из засушливых районов, более 60% Израиля занимает пустыня Негев. Водные ресурсы страны крайне ограничены и формируются в основном за счет атмосферных осадков. Вода в Израиле добывается из поверхностных и подземных природных водных источников. По мере роста населения и экономического развития возрастает актуальность проблемы обеспечения качественной питьевой водой. Постоянно осуществляется поиск новых методов получения пресной питьевой воды. Основным источником пресной воды в Израиле являются воды подземных источников (Orlovsky, Zonn, 2018). Целью исследования является изучение влияния геологического строения, складчатости, разломной тектоники, литологии и типа карстовой системы на потенциал природных водных ресурсов.

На примере известных источников холодных и термальных вод проведено изучение строения водоносных горизонтов между Средиземным морем и восточной границей (Dafny et al., 2010; Gavrieli et al., 2019; Weinberger et al., 2012). Карстовые термальные воды являются очень важным экономическим ресурсом Израиля с точки зрения гидрогеологии, геотермальной энергии,

спелеогенетики и бальнеологии. Гидротермальные системы развились в результате неотектонической активности, а геотермальные участки возникли вдоль активных тектонических зон.

Горный водоносный горизонт простирается от Израильской долины на севере страны до города Беер-Шева на границе пустыни Негев. Горный карстовый район подпитывает Восточный и Западный водоносные горизонты. Карстовые системы, существующие в горном водоносном горизонте, содержат естественные подземные резервуары, наполненные чистой водой высокого качества. В горных районах через карстовые отверстия вытекает множество источников (рис. 1, 2).

Наибольшее число подземных источников холодных и теплых минерализованных вод в Израиле расположено в Западном горном бассейне Яркон-Таниним (Yarkon-Taninim), водоносный горизонт которого относится к доломитово-известняковой группе Иудеи. Водоносный горизонт Яркон-Таниним простирается от предгорий провинции Кармель на севере Израиля до северных антиклиналей пустыни Негева и от центрального горного хребта на востоке до побережья Средиземного моря на западе (рис. 1, 2). Бассейн Яркон-Таниним является одним из важнейших ресурсов пресной воды для Израиля. Подземные воды текут в пределах водоносного горизонта Иудейской группы, состоящего из карстовых проницаемых известняков и доломитов, прослоенных терригенными глинами и мергелями. Высокая степень карстификации обусловлена не только толщиной и чистотой известняка, климатом и высотой, но и тектоническим строением. Карстовые особенности определяют специфику вертикальных и горизонтальных движений потоков и химические характеристики подземных вод.

Значимость увеличения гидравлической проводимости в результате процессов карстификации подтверждена петрофизическими разрезами через месторождения в бассейне Яркон-Таниним, который представляет собой комплекс систем водоносных горизонтов подземных вод с хорошо развитыми вертикальными и горизонтальными карстовыми системами (Dafny et al., 2010; Weinberger et al., 2012). На магнитных и плотностных разрезах отмечаются зоны увеличенной гидравлической проводимости и проницаемости пород в результате процессов карстообразования до глубин 2000–3000 м и более (рис. 2, 3).

Карстовые системы соединяют различные части бассейна и разные водоносные горизонты, что уравнивает давление в горизонтальном и вертикальном водоводах и тем самым обеспечивает быструю подпитку основного водоносного горизонта. Карст является

наиболее заметной особенностью карбонатных водоносных горизонтов, четко отражающейся на плотностных и магнитных разрезах в виде ареалов пониженных значений магнитных и плотностных свойств (профили №№ 1, 3–4 (39°C)) (рис. 2, 3).

Бассейн Кинерет (Kinneret) на севере страны является крупнейшим из бассейнов и обеспечивает более трети запасов пресной воды в Израиле (рис. 2а) (Dafny et al., 2010). Водоносные горизонты бассейна Кинерет представлены, в основном, карбонатным известняком, доломитом и мелом. Магнитный и плотностной разрезы по профилю № 2 пересекают источники холодной и термальной воды (60°C). Глубинные разрезы создают представление о возможном потенциале водоносного горизонта бассейна Кинерет (рис. 2в и 3в).

Северный горный бассейн (рис. 2а) состоит из мела и известняка. На глубине водоносные горизонты сложены известняками с доломитами и характеризуются высоким качеством воды. Гидравлическая проводимость в водоносном горизонте высока благодаря развитию процессов карстообразования, что создает многочисленные источники, вытекающие из Иудейской группы (рис. 2, 3). Термальный источник (40°C) Северного горного бассейна пересечен широтным профилем № 3 (рис. 2г, 3г).

Восточный Горный бассейн Иудейской группы Израиля является очень важным источником пресной воды, его восточная граница проходит по долине реки Иордан (рис. 2). Водоносный горизонт восточного горного бассейна состоит в основном из известняка и доломита мелового периода, которые обеспечивают очень высокое качество воды из породы с высокой гидравлической проводимостью. Естественный сброс водоносного горизонта Иудеи осуществляется в источники, расположенные вдоль западного берега Мертвого моря и вблизи долины реки Иордан (Weinberger et al., 2012).

Прибрежный водоносный горизонт состоит из песчаного известняка и известкового песчаника с вкраплениями слоев глины. Подземные водоносные горизонты существуют в западной части бассейна на расстоянии примерно 4 км от побережья (в восточном направлении).

Анализ петрофизических разрезов карстовых систем Израиля позволил выявить специфику вертикальных и горизонтальных водоносных горизонтов, сложенных из известняка и доломита. Наиболее ярко на плотностных и магнитных разрезах выражены карстовые системы водоносных горизонтов Горных бассейнов Иудейской группы (Gavrieli et al., 2019). Однако такая технология может быть успешно применена для изучения карстовых систем во

всех регионах, где существуют условия, способствующие карстификации известняков водоносных горизонтов.

СТРОЕНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ САУДОВСКОЙ АРАВИИ

КСА расположено в засушливой области юго-западной Азии между 16–32°с.ш. и 35–65° в.д. (рис. 1). Щит, занимающий треть АП, начинается в западной части КСА и простирается от Арабского залива на севере до Аденского залива на юге (Stern, Johnson, 2010). Докембрийский щит состоит из твердых пород и имеет ограниченные запасы подземных вод в аллювиальных отложениях сухих русел (вади), а также в зонах разломов и выветрелых трещинах (UN-ESCWA, 2013; Water Atlas..., 1984). В процессе исследования были изучены доступные материалы об источниках воды и рассмотрена возможность поиска новых подземных источников.

КСА получает максимальную суммарную солнечную радиацию на Земле, и в течение всего года здесь держится высокая температура. В настоящее время в КСА возникла острая необходимость поиска новых источников пресной воды.

На большей части АП постоянные водотоки отсутствуют. Наиболее ценными источниками воды для питья и орошения в КСА считаются подземные воды. Почти все известные ресурсы подземных вод находятся в восьми крупных тектонических бассейнах осадочных пород, граничащих с Аравийским щитом (Vincent, 2008).

Запасы воды в КСА находятся в известняках неогеновых водоносных горизонтов Умм-эр-Радхуме (Ummer Radhuma) Аравийской платформы (рис 4, 5). Основными источниками являются неглубокие аллювиальные и глубокие горизонты подземных вод. Водоносные горизонты залегают в песчаных и карбонатных формациях (Chowdhury, Al-Zahrani, 2015).

Аравийский шельф содержит глубокие осадочные водоносные горизонты, образованные в основном из известняка и песчаника, которые перекрывают скальные породы фундамента Аравийского щита (Abdulrasoul et al., 2013). Водоносные горизонты включают кварцевые песчаники, конгломераты, известняки и четвертичный аллювий. Карстификация увеличивает первоначальную пористость известняков водоносных горизонтов. Наиболее важными водоносными горизонтами в КСА являются Сак (Saq), Ваджид (Wajid), Табук (Tabuk), Минджур-Дурма (MinjurandDhurma), Рияд-Васиа (Riyadh and Wasia), Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma) и Даммам (Dammam) (Chowdhury,

Al-Zahrani, 2015; Abdulrasoul et al., 2013). Расположение границ обнажений водоносных горизонтов (Chowdhury, Al-Zahrani, 2015; Eldosouky et al., 2022; Forti et al., 2003; Hird et al., 2019) показано на схеме (рис. 4).

На глубинных разрезах визуализируются особенности водоносных слоев, обусловленные литологическими разностями и процессами карстообразования. Для изучения внутреннего строения водоносных горизонтов построены магнитные и плотностные разрезы известных источников КСА по широтным сечениям (рис. 4, 5).

Петрофизические разрезы наглядно отразили внутреннее строение тектонических структур АП. Подвижный пояс и шовная зона четко представлены на разрезах №№ 6–8 восточнее вулканических образований (рис. 4, 5). Вертикальная разломная зона рассекает верхнюю кору, достигая глубины ~12 км. Диагональный глубинный разрез № 8а (рис. 4, 6) демонстрирует приуроченность подвижного пояса на глубине 20–28 км к мощному термофлюидному каналу, выходящему из флюидонасыщенной линзы, примыкающей к разломной зоне Красного моря. Ареал выхода мантийного термофлюидного канала в зону подвижного пояса является узлом золотого оруденения (Петрова и др., 2022; Eldosouky et al., 2022).

В прибрежной зоне Красного моря в узкой полосе третичных и юрских слоев присутствуют карбонатные породы (доломитовые известняки), окаймляющие западный край Аравийского щита (рис. 4). Треки источников холодной воды и резервуары прибрежного водоносного горизонта хорошо видны на разрезах № 6–7 (рис. 5).

На площадной схеме распределения намагниченности (рис. 6) видно, что горизонтальные водоводы прибрежной зоны проявляются серией небольших ареалов минимумов, а метаморфизованные известняки в пределах щита образуют совсем незначительные пласты кристаллического известняка и мрамора.

В административном округе Мекка вблизи границы с округом Эр-Рияд четко выражена шовная зона в виде вертикального разлома до 8 км на магнитном разрезе и в виде линиамента с пониженными магнитными свойствами на схеме распределения намагниченности пород на глубине ~2.5 км (рис. 6).

Разломные нарушения водоносных горизонтов влияют на выходы источников воды к поверхности. Грунтовые воды собираются в трещинах и разломах, хорошо визуализируемых на магнитных и плотностных разрезах.

На северо-западе КСА, в бассейне Табук (Tabuk) (рис. 4) находится водоносный горизонт в песчаниках Сак (Saq) (рис. 4, профиль 5).

Вода в источниках этого горизонта отличается хорошим качеством (Alsaleh, 2017).

Однако основными водными ресурсами являются глубокие водоносные горизонты в восточной части разреза (рис. 4, профиль 5). Ископаемая вода приурочена к песчано-известняковым образованиям мощностью около 300 м в интервале глубин 150–1500 м (Chowdhury, Al-Zahrani, 2015). Благодаря вертикальному водоводу возможен водопиток в приповерхностные слои, расположенные на уровнях ~30–100 м, из резервуаров с глубин 2000–4000 м. Подземные воды в глубоких водоносных горизонтах могут представлять собой невозобновляемые «ископаемые» воды, которые образовались примерно 10–32 тысячи лет назад (Water Atlas..., 1984).

Наиболее важным водоносным горизонтом в КСА является водоносный горизонт Васия-Биядх (Wasia-Biyadh), снабжающий Эр-Рияд (рис. 4). Васия-Биядх представляет собой обширный водоносный горизонт, состоящий из проницаемых известняков и песчаников нижнего и среднего мела. На плотностном и магнитном разрезе водоносного карстового горизонта проявлены перспективные области возобновляемых источников холодных вод, подпитываемых подземными резервуарами с глубины 2–4 км (рис. 5, профили 6 и 7).

Вокруг столицы Эр-Рияд видны контуры не крупных карбонатных систем горизонтальных водоносных слоев (рис. 4, 6). Резкое снижение намагниченности пород восточнее водоносных горизонтов столицы четко приурочено к нефтегазонасыщенному бассейну КСА (рис. 6).

Водоносные горизонты Умм-Эр-Радхум содержат ископаемую воду, где она находится более 20 тысяч лет (Awadh et al, 2021). Незакрытые водоносные горизонты распространены в местах, где много карстов и трещин, возникающих в результате растворения или тектонических движений.

В восточном регионе КСА система водоносных горизонтов Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma) является одним из наиболее обширных и значимых водоносных горизонтов. Водоносный горизонт Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma), сложенный карстовыми известняками, плавно опускается к востоку. Емкость подземных резервуаров возобновляемых источников холодных вод зависит от мощности водоносного слоя. Его мощность в Катаре и ОАЭ достигает 370 м, в Омане — до 650 м (Awadh et al., 2021).

Основные процессы карстовых явлений горизонтов Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma) изучены на примере крупной известняковой карстовой зоны плато Ас Сульб (As Sulb) вдоль восточной границы округа Эр-Рияд (рис. 4, 6).

(Awadh et al., 2021). В середине 1980-х годов карстовый район на плато Ас Сульб (As Sulb) был выбран для изучения геологами. Проект сосредоточен на взаимосвязи между карстом и самым плодородным водоносным горизонтом в Саудовской Аравии — горизонтом Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma). В результате были составлены подробные карты 50 пещер, связанных с этой карстовой зоной, признанной важной зоной для подпитки водоносного горизонта Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma) (рис. 4). Обширная карстовая зона плато Ас Сульб приурочена к ареалу пониженных магнитных свойств на схеме распределения намагниченности пород (рис. 6).

Для разработки стратегии устойчивого управления водными ресурсами важно изучить имеющиеся источники питьевой воды и найти подземные резервуары подпитки возобновляемых источников. В результате исследования на примере карстовых горизонтов получены критерии выявления резервуаров подземных вод, показана возможность разработки новых источников воды холодной воды, подпитываемых подземными резервуарами и дан прогноз местоположения возобновляемых источников.

Геотермальные исследования в КСА были начаты в 1980 г. (Berthier et al., 1981). Горячие источники выявлены по результатам гидрогеологической разведки в южной части страны. Геологическая разведка обнаружила в западных районах АП обширные лавовые поля третичных потоков базальта — харраты (harrats) (рис. 4, 5). Они покрывают вадии и погребают естественные полости лавовых трубок, способствующих образованию горизонтальных водоводов. Эта толща, обладая высокой пористостью и проницаемостью, характеризуются высокой скоростью инфильтрации (Forti et al., 2003).

Вулканические области потенциально благоприятствуют образованию термальных вод в западной части территории КСА (рис. 1, 5, 6, профили 8 и 8а) (Al-Dayel, 1988; Rehman, Shash, 2005; Stern, Johnson, 2010; Taleb, 2009). Вулканические террейны склонны к образованию подземных горизонтальных водоводов в виде лавовых полых труб, которые разрушаются из-за подповерхностной эрозии (Fortietal., 2003). Проявления горизонтальных водоводов вулканических образований видны в виде ареалов пониженных значений на схеме распределения намагниченности в районе Мекки (рис. 6).

В Саудовской Аравии известны десять термальных источников (Al-Dayel, 1988). По магнитным и плотностным разрезам авторами были исследованы особенности строения водоносных горизонтов гидротермальных зон геотермальных источников в южной части КСА и в областях развития вулканических образований в западной

части Аравийской плиты (Петрова и др., 2013; Petrishchev et al., 2011).

Траектории выхода термальных вод визуализируются в виде путей флюидных потоков, проявляющихся на глубинных плотностных и магнитных разрезах благодаря пониженным значениям плотности и намагниченности (рис. 4а; 5d, 5е; 6). Узкая субвертикальная разломная зона пород пониженной плотности прослеживается с глубины 8 км на широтном плотностном разрезе № 8 (рис. 5d). На магнитном разрезе 8а крупная слабомагнитная зона гидротермальной проработки горных пород прослеживается в интервале глубин от 8–12 км до 3 км, разделяясь у поверхности на отдельные струи.

С целью идентификации тректов известных термальных зон по глубинным разрезам магнитных и плотностных моделей исследованы пути флюидных потоков. Вертикальный водовод горячего источника (79°C) очень хорошо выражен на глубинном диагональном магнитном разрезе 8а как цепочка линз пониженных значений намагниченности в диапазоне глубин от 25 до 4 км внутри разломной зоны от верхней мантии до верхней коры (Петрова и др., 2013). Для таких термальных источников характерно низкое удельное электрическое сопротивление. Субвертикальные зоны высокой проводимости эффективно выделяются при магнито-теллурическом зондировании от поверхности до глубин порядка 40 км.

Исследования земной коры в областях развития вулканических образований позволили получить представление о специфике земной коры вулканической зоны аравийского щита, что позволяет делать прогнозирование перспективных источников термальных вод.

Особенности разломной тектоники термальных зон КСА в областях развития вулканических образований исследованы по двумерной площадной магнитной и плотностной модели с учетом глубинных сечений выходов геотермальных вод. Специфика строения земной коры термальных зон ярко проявляется в виде признаков флюидной проработки на пути вертикальной миграции флюидного потока (рис. 6). Зоны гидротермальной проработки отчетливо выделяются по геоэлектрическим и сейсмическим данным как зоны повышенной проводимости с пониженными скоростями сейсмических волн (Киссин, 2009; Копытенко и др., 2011; Павленкова, 2013, 2018).

В результате исследований в районе известных термальных источников и вулканических образований получены региональные признаки месторождений источников геотермальных вод по результатам совместной интерпретации магнитных и плотностных разрезов земной коры. Выделены участки, перспективные для

постановки геологоразведочных работ (Петрова и др., 2013).

В процессе работы получены особенности строения водоносных горизонтов холодных вод и проявления треков термальных зон в верхней части земной коры КСА. Петрофизические разрезы позволили выявить характерные структуры, контролируемые системы водоносных горизонтов, сложенные карстовыми известняками.

Для обеспечения устойчивого снабжения водными ресурсами на основе плотностных и магнитных разрезов и схемы площадного распределения магнитных свойств выявлены перспективные области поиска возобновляемых источников холодных вод, подпитываемых подземными резервуарами с глубины 2–4 км.

Исследование специфики строения систем водоносных горизонтов на основе интерпретации аномалий магнитного поля и силы тяжести расширяет возможности оценки потенциала водных ресурсов Саудовской Аравии.

СТРОЕНИЕ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ОАЭ

Географически ОАЭ являются частью засушливой климатической зоны АП и природные возобновляемые водные ресурсы здесь ограничены. В настоящей работе были использованы опубликованные данные о подземных водах разведочных и мониторинговых скважин, литологической стратификации, гидропроводности и электропроводности пород (Alsharhan et al., 2001; Alsharhan, Rizk, 2020; Awadh et al., 2021; Chebotarev, 1955; Csontos et al., 2010; Ebraheem et al., 2014; Rizk, Alsharhan, 2003; Sherif et al., 2012, 2021).

По магнитным и плотностным разрезам выявлены особенности глубинного строения водоносных горизонтов известных источников ОАЭ.

Исследование показало, что источники в ОАЭ делятся на две категории: источники, связанные с неглубокими грунтовыми водами и источники, связанные с глубокими циркулирующими подземными водами.

Система подземных вод в ОАЭ состоит из пяти основных водоносных горизонтов: четвертичного водоносного горизонта, водоносного горизонта песчаных дюн, гравийного, карбонатного и трещиноватого офиолитового водоносных горизонтов.

Наибольший интерес представляют два природных водоносных горизонта: четвертичный поверхностный, состоящий из неуплотненных отложений (в основном аллювиального гравия и песка) и трещиноватый карбонатно-офиолитовый водоносный горизонт (Ebraheem et al., 2014).

Для идентификации плотностных и геомагнитных моделей глубинных разрезов про-

ведены сопоставления с сейсмогеологическими разрезами земной коры, построенными по материалам геофизических исследований складчато-надвигового пояса и надвиговых пластов и эффектных складок с признаками пластичного сдвига, влияющих на расположение резервуаров подземных вод в восточных районах ОАЭ. Разломные зоны и зона субдукции Аравийской окраины ярко проявляются в виде вертикальных зон пониженных значений на глубинных плотностных и магнитных разрезах (рис. 7).

По аномалиям магнитного поля и силы тяжести исследованы особенности строения водоносных горизонтов известных источников северо-восточной части ОАЭ (Khatt Springs, AL Dhaid, Siji Spring, Maddab, Hatta) (рис. 1, 7) (Alsharhan, Rizk, 2020; Sherif et al., 2012, 2021). Резервуары подземных источников залегают в известняковых породах карбонатной осадочной толщи, возраст которой варьируется от триаса до нижнего мела.

Источник Хатт (Khatt Springs) (рис. 7, профиль 9) является источником карстового типа. Большая часть дождевой воды просачивается через разломы коренных пород, скапливается, и впоследствии поступает в качестве подпитки подповерхностного водоносного горизонта. Грунтовые воды собираются в карстах, трещинах и разломах, хорошо визуализируемых на магнитных и плотностных разрезах. Северный известняковый водоносный горизонт ОАЭ в основном состоит из трещиноватого известняка и доломита с обширным внутренним карстованием. Карстовая известняковая толща пород представляет собой потенциально водоносный горизонт. Этот водоносный горизонт может быть разработан для обеспечения водной безопасности северной части ОАЭ (Sherif et al., 2021).

Водоносный горизонт Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma), сложенный карстовыми известняками (Awadh et al., 2021), является пространственным мегаводоносным горизонтом АП, который формирует основную гидрогеологическую систему к западу от зоны субдукции ОАЭ. Водоносный горизонт Умм-Эр-Радхума (Ummer Radhuma) плавно опускается к востоку примерно на 0.1°, где ограничен рекой Евфрат (Dirks et al., 2018). Он имеет толщину 250 м в СА, но утолщается в Катапе и ОАЭ до 370 м, в Омане до 650 м (Nairn, Alsharhan, 1997).

Это неоднородное образование характеризуется вторичной проницаемостью, представленной трещинами, карстом, полостями, открытыми шахтами и карстовыми воронками. Толщина водоносного слоя в центральной части ОАЭ составляет ≥500 м, уменьшаясь на западе до 100 м.

Карбонатная толща перекрыта аллювиальными отложениями, состоящими из песка и

гравия (Abdulrasoul et al., 2013). Основные водоносные слои, используемые в настоящее время, расположены в гравийном водоносном горизонте (Rizk, Alsharhan, 2003).

Вертикальные водоводы ОАЭ прослеживаются по глубинным петрофизическим разрезам в виде вертикальных зон пониженных значений намагниченности и плотности. Горизонтальные водоводы выявляются на площадных распределениях намагниченности и плотности пород в виде линияментов пониженных значений (рис. 7, разрезы 9–11).

Продуктивные водоносные горизонты источников супербассейна Аль-Дайд (Al Dhaid) в восточной части ОАЭ приурочены к трещиноватым офиолитам, в западной — к массивам гравийных равнин зоны песчаных дюн (рис. 7, профиль 10).

На северо-западе района Аль-Дайд водоносный горизонт состоит из толстого слоя глины, содержащего песчаные линзы со средним потенциалом грунтовых вод. Эти низкопроницаемые отложения были сформированы в период развития складчатости. Продуктивные гравийные отложения прослоены низкопроницаемыми отложениями глин.

Западная часть супербассейна Аль-Дайд, представляющая обширную равнину, в основном покрыта речными террасами и пойменными отложениями, которые составляют западный гравийный водоносный горизонт. На гидрогеологическое состояние трещиноватых водоносных горизонтов супербассейна Аль-Дайд оказывают влияние вертикальные структуры офиолитов. Благодаря вертикальным водоводам возможны водопритоки в приповерхностные резервуары, расположенные на уровнях ~30–100 м, из водоносных линз с глубины 2000–4000 м. Анализ магнитных и плотностных разрезов позволил выявить возможные пути восходящих потоков глубинной подпитки источников из подземных резервуаров к подповерхностным водоносным горизонтам. На глубинных разрезах приведены примеры отражения структуры подповерхностных водоносных горизонтов и глубоких подземных резервуаров источников супербассейна Аль-Дайд (рис. 6г, 6д).

Район источника Маддаб (рис. 6, профиль 11) расположен в пределах офиолитовых обнажений. Офиолитовый трещиноватый водоносный горизонт, расположенный на востоке ОАЭ, обладает высокой гидропроводностью и накопительностью, что характерно для хорошего водоносного горизонта. Минерализация подземных вод в офиолитовом водоносном горизонте в целом низкая. Источник Маддаб соответствует стандартам питьевой воды. Офиолитовая толща перекрыта четвертичными

аллювиальными отложениями, которые состоят из песка и гравия.

Исследования гидрогеологии восточного гравийного водоносного горизонта источника Маддаб в районе гравийной равнины к западу от Омана, показали, что неуплотненные материалы покрывают толстые карстовые слои известняка и доломита (Ebraheem et al., 2014).

Изученные термальные источники ОАЭ характеризуются теплой водой (Chebotarev, 1955; Water Atlas..., 1984). Согласно регулярным исследованиям температура 1977 г. составляла 30.1°C (источник Маддаб), 39.5°C (источник БуСукхана (BuSukhanah)), 39.0°C (южный источник Хатт (Khatt)) и 41°C (северный источник Хатт (Khatt)). В 1994 году температура воды составляла 33°C (источник Маддаб), 39°C (источник БуСукхана (BuSukhanah)) и 40°C (источники Хатт (Khatt)) (Alsharhan, Rizk, 2020; Rizk et al., 2003; Sherif et al., 2021). В процессе исследования авторами настоящей работы подтверждена эмпирическая зависимость между глубиной залегания подземного резервуара и температурой воды источника. Это эмпирическое соотношение успешно использовано при прогнозе гидротермальных зон (Петрова и др., 2013, 2022; Петрова, Копытенко, 2019).

В засушливых и полусухих районах хранилища подземных вод являются единственным естественным источником воды. Карстовые известняковые горизонты являются потенциальными водоносными слоями. Существует необходимость в детальном изучении этого важного водоносного горизонта, так как на глубокие и замкнутые водоносные горизонты, не находящиеся в контакте с современным гидрологическим циклом, изменения климата оказывают меньшее влияние. Среди наиболее перспективных невозобновляемых хранилищ ископаемых подземных вод стоят древние карстовые известняковые горизонты (Wada, Heinrich, 2013).

В результате быстрого роста населения существует положительная линейная зависимость, предсказывающая будущее увеличение потребности в воде. В исследуемом регионе ОАЭ нуждаются в наибольшем количестве воды, за ними следует Саудовская Аравия (Awadh et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стратегия развития геологоразведочных работ для разработки устойчивого управления водными ресурсами предусматривает выявление перспективных направлений дополнительных исследований особенностей строения систем водоносных горизонтов холодных и термальных вод различного назначения с целью оценки

потенциала подземных запасов засушливых территорий Израиля, КСА и ОАЭ.

Для решения этих задач важно выявить подземные резервуары возобновляемых источников. Для расшифровки специфики структур, контролируемых водоносные горизонты, сложенные карстовыми известняками, построены глубинные магнитные и плотностные разрезы. На примере карстовых горизонтов рассматриваемых территорий исследована возможность разработки возобновляемых источников воды, подпитываемых подземными резервуарами.

Проведенный авторами анализ особенностей глубинного строения водоносных слоев известных источников основан на интеграции различных дисциплин науки, включая геологические, гидрогеологические, геофизические и гидрологические, а также мониторинговые скважины с известной информацией о бурении. По оригинальной технологии интерпретации аномалий магнитного поля и поля силы тяжести исследовано влияние складчатости, разломной тектоники и особенностей карстовых систем на потенциал природных водных ресурсов.

По результатам проведенных исследований сделана оценка различных типов водоносных горизонтов подземных вод и представлены магнитные и плотностные модели глубинного строения основных водоносных карстовых горизонтов и подземных резервуаров Израиля, КСА и ОАЭ.

Новые представления о глубинном строении систем водоносных горизонтов позволяют определить критерии выявления резервуаров подземных вод и дать прогноз местоположений возобновляемых источников.

Прогноз местоположения карстовых резервуаров подземных вод предложен на основе комплексной интерпретации геофизических данных по магнитным и плотностным разрезам с учетом двумерных моделей распределения намагниченности и плотности пород.

По аномалиям магнитного поля и силы тяжести выполнено исследование глубинного строения зон геотермальной активности территорий Израиля, КСА и ОАЭ и осуществлено прогнозирование перспективных источников термальных зон.

В результате анализа глубинных магнитных и плотностных разрезов через зоны известных термальных источников визуализированы траектории термофлюидных каналов, приуроченных к разломам глубинного заложения, и получена оценка зависимости температуры источника от глубины залегания подпитывающих подземных резервуаров.

Методика исследования систем водоносных горизонтов применима для изучения подземных ресурсов в условиях засушливых районов.

Областью применения исследований является решение прогнозных геолого-геофизических задач для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания по теме № 16.5. «Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей».

Список литературы [References]

- Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизический и тектонический аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с. [*Kissin I.G.* Fluids in the Earth's crust: geophysical and tectonic aspects. M.: Nauka, 2009. 328 p. (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С. 88–106 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* Results of the development and application of the component model of the Earth's magnetic field in the interests of magnetic cartography and geophysics. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016. V. 9. Iss. 2. P. 88–106 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 // Труды XV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020а. С. 288–291 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* World maps earth's magnetic field component of the epoch 2020 // *Materials of XV conf. «Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics»*. Saint Petersburg, 2020. P. 288–291 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Петрищев М.С.* Глубинное строение ослабленных зон Прибайкалья // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 140–142 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Petrishchev M.S.* The deep structure of the weakened zones of the Baikal region // *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley*, *Materialy 38-y sessii mejdunarodnogo seminar im. D.G. Uspenskogo*. Perm: GI UrO RAN. 2011. P. 140–142 (in Russian)].
- Павленкова Н.И.* Природа региональных сейсмических границ в земной коре и верхней мантии // Сборник трудов физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле. Москва: ИФЗ РАН, 2018. С. 250–253 [*Pavlenkova N.I.* Nature of regional seismic boundaries in the earth's crust and upper mantle // *Sb. Trudov fiziko-khimicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukah o zemle*. Moscow: IFZ RAN, 2018. P. 250–253 (in Russian)].
- Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании неоднородности земной коры и верхней мантии // Сборник трудов конференции Современная тектонофизика. Методы и результаты. Москва: ИФЗ РАН, 2013. С. 56–68 [*Pavlenkova N.I.* Role of fluids in the formation of inhomogeneity of the earth's crust and

- upper mantle // Sb. trudov konferentsii Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezultaty. Moscow: IFZ RAN, 2013. P. 56–68 (in Russian)].
- Петрищев М.С., Петрова А.А.* Строение зон геотермальной активности Тирренского моря // Двенадцатая уральская молодежная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 176–181 [Petrishchev M.S., Petrova A.A. The structure of geothermal activity zones of the Tyrrhenian Sea // Dvenadtsataya uralskaya molodejnaya shkola po geofizike: Sb. nauch. materialov. Perm: GIUrO RAN, 2011. P. 176–181 (in Russian)].
- Петрова А.А.* Методика спектрально-корреляционного анализа аномального геомагнитного поля // Автореф. дисс. канд. ф.-м. наук. М., 1976. 25 с. [Petrova A.A. Methods of spectral correlation analysis of the anomalous geomagnetic field // Avtoref. diss. kand. f.-m. nauk. M., 1976. 25 p. (in Russian)].
- Петрова А.А.* Методика спектрально-пространственного анализа геомагнитного поля // Геофизический сборник АН УССР. 1977. Вып. 76. С. 55–66 [Petrova A.A. Methods of spectral-spatial analysis of the geomagnetic field // Geofizicheskiy sbornik AN USSR. 1977. Iss. 76. P. 55–66 (in Russian)].
- Петрова А.А., Колесова В.И.* Способ геофизической разведки. А.С. 1289232 СССР. 1986 [Petrova A.A., Kolesova V.I. Method of geophysical exploration. A.S. 1289232 USSR. 1986 (in Russian)].
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Геотермальные зоны юга Восточной Сибири // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 42. № 2. С. 25–41. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41> [Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Geothermal zones of the south of East Siberia // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. V. 2(42). P. 25–41 (in Russian)].
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны Северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 41. № 1. С. 37–53. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53> [Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Fluid system of the Mamsko-Bodaybinskiy mineragenic zone of the Northern Transbaikalia region // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019a. V. 1(41). P. 37–53 (in Russian)].
- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Природные явления эндогенного происхождения в Арктическом бассейне // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020a. № 4. Вып. 48. С. 37–53. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-49-63> [Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A. Natural phenomena of endogenic origin in the Arcticbasin // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2020. V. 4(48). P. 37–53 (in Russian)].
- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Глубинное строение Арктики и Антарктики по магнитным аномалиям компонент и аномалиям силы тяжести // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 4. С. 331–347. <https://doi.org/10.31857/S0023420622030086> [Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A. Deep structure of the Arctic and Antarctic by anomalies of magnetic component and gravity anomalies // Kosmicheskiye issledovaniya. 2022. V. 60. Iss. 4. P. 331–347 (in Russian)].
- Петрова А.А., Петрищев М.С.* Флюидные системы Средиземноморья // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. № 17. С. 23–33 [Petrova A.A., Petrishchev M.S. Fluid Systems of the Mediterranean // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2011. № 1(17). P. 23–33 (in Russian)].
- Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А.* Проявление треков термальных зон в строении земной коры Аравийского полуострова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей // Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. М.: ИФЗ РАН, 2013. С. 268–273 [Petrova A.A., Petrishchev M.S., Kopytenko Yu.A. Manifestation of tracks of thermal zones in the structure of the crust of the Arabian Peninsula // Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii gravitatsionnyh, magnitnyh i elektricheskikh poley. Materialy 40-y sessii Mejdunarodnogo seminar im. D.G. Uspenskogo. M.: IFZ RAN, 2013. P. 268–273 (in Russian)].
- Abdulrasoul M. Al-Omran, Salem E. et al.* Quality assessment of various bottled waters marketed in Saudi Arabia // Environmental Monitoring and Assessment. 2013. V. 185. Iss. 8. P. 6397–6406. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-3032-z>
- Aboud E., Qaddah A., Harbi H., Alqahtani F.* Geothermal Resources Database in Saudi Arabia (GRDiSA): GIS model and geothermal favorability map // Arabian Journal of Geosciences. 2021. V. 14. A.122. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06426-z>
- Al-Dayel M.* Geothermal resources in Saudi Arabia // Geothermics. 1988. V. 17. Iss. 2–3. P. 465–476. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(88\)90076-4](https://doi.org/10.1016/0375-6505(88)90076-4)
- Alsaleh M. A.* Natural springs in northwest Saudi Arabia // Arabian Journal of Geosciences. 2017. V. 10. A335. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3126-6>
- Al-Sand M., Teutsch G., Schüth Ch., Rausch R.* Challenges for an integrated groundwater management in the Kingdom of Saudi Arabia. // International Journal of Water Resources and Arid Environments. 2011. V. 1. Iss. 1. P. 65–70.
- Alsharhan A.S., Rizk Z.E.* Water Resources and Integrated Management of the United Arab Emirates. 2020. 850 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31684-6>
- Alsharhan A.S., Rizk Z.A., Nairn A.E.M. et al.* Hydrogeology of an arid region: The Arabian Gulf and adjoining areas. Elsevier Science. 2001. 331 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50225-4.X5000-3>
- Al-Zahrani M.A., Chowdhury Sh., Abo-Monasar A.* Augmentation of surface water sources from spatially distributed rainfall in Saudi Arabia // Journal of Water Reuse and Desalination. 2015. V. 5. Iss. 3. P. 391–406. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.112>
- Awadh S.M., Al-Mimar H., Yaseen Z.M.* Groundwater availability and water demand sustainability over the upper mega aquifers of Arabian Peninsula and west region of Iraq // Environment, Development and Sustainability. 2021. V. 23. P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00578-z>
- Berthier M.A., J. Demange F. et al.* Geothermal resources of the Kingdom of Saudi Arabia. Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Open File Report BRGM-OF-01-24, 1981. 116 p.

- Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al.* World Gravity Map // Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris. 2012. <http://bgi.omp.obs-mip.fr>
- Chebotaev I.I.* Mechanisms of natural waters in the crust of weathering // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1955. V. 8. Iss. 1–2. P. 22–32. IN1-IN2, 33–48. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90015-6)
- Chowdhury S., Al-Zahrani M.* Characterizing water resources and trends of sector wise water consumptions in Saudi Arabia // *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2015. V. 27. Iss. 1. P. 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.02.002>
- Csontos L., Pocsai T. et al.* Structural evolution of the Hawasina Window, Oman Mountains // *GeoArabia*. 2010. V. 15. Iss. 3. P. 85–124. <https://doi.org/10.2113/geoarabia150385>
- Dafny E., Burgb A., Gvirtzman H.* Effects of Karst and geological structure on groundwater flow: The case of Yaqon-Taninim Aquifer, Israel // *Journal of Hydrology*. 2010. V. 389. Iss. 3–4. P. 260–275 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.038>
- Dirks H., Al Ajmi H., Kienast P., Rausch R.* Hydrogeology of the Umm Er Radhuma aquifer (Arabian peninsula) // *Grundwasser*. 2018. V. 23. P. 5–15. <https://doi.org/10.1007/s00767-017-0388-6>
- Ebraheem A.M., Al Mulla M.M. et al.* Mapping groundwater conditions in different geological environments in the northern area of UAE // *Environmental Earth Sciences*. 2014. V. 72. P. 1599–1614. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3064-5>
- Eldosouky A.M., El-Qassas, R.A.Y et al.* Mapping Main Structures and Related Mineralization of the Arabian Shield (Saudi Arabia) Using Sharp Edge Detector of Transformed Gravity Data // *Minerals*. 2022. V. 12. Iss. 1. A.71. <https://doi.org/10.3390/min12010071>
- Forti P., Pint J.J., Al-Shanti et al.* The development of tourist caves in the Kingdom of Saudi Arabia. Saudi Geological Survey Open-File Report SGS-OF-2003-6, 2003. 32 p.
- Gavrieli I., Guttman J., Yechieli Y. et al.* A highly active karstic aquifer bounded by saline waters: The Judea Group aquifer // *E3S Web of Conferences*. 2019. V. 98. 07008.
- Hird R., Di Matteo N., Gulerce U. et al.* Geohazards of Saudi Arabia // *Journal of Maps*. 2019. V. 15. Iss. 2. P. 626–634. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1642245>
- Kopytenko Yu. A., Petrova A.A., Guriev I.S. et al.* Analysis of the Informativity of the Earth's Magnetic Field in near-Earth Space // *Cosmic Research*. 2021. V. 59. Iss. 3. P. 143–156. <https://doi.org/10.1134/S0010952521030059>
- Mitchell C.* Development and promotion of mineral resources in Fujairah. // Lecture in: 4th Fujairah International Forum for Industrial Rocks & Mining, Expo 2016, Fujairah, United Arab Emirates, 23–25th Feb 2016.
- Nairn A.E.M., Alsharhan A.S.* Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East. Amsterdam: Elsevier, 1997. 843 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82465-3.X5000-1>
- Orlovsky N.S., Zonn I.S.* Water Resources of Israel: Trackrecord of the Development // *Post-Soviet Issues*. 2018. V. 5. Iss. 1. P. 8–36. <https://doi.org/10.24975/2313-8920-2018-5-1-8-36>
- Petrishchev M., Petrova A., Kopytenko Yu. et al.* Electromagnetic imaging of crustal geothermal systems within the Northern Andes // Volume of XII the Scientific Assembly of IAGA, Merida, Mexico. 2013. P. 101.
- Petrishchev M., Petrova A., Kopytenko Yu.* Features of the geothermal structures by geophysical methods of exploration // 4th IUPAP International Conference on Women in Physics. 5–8 April 2011. Stellenbosch, South Africa.
- Petrova A., Petrishchev M.* Features of European geothermal structures by geomagnetic data // Programme book of the 5th IUPAP International Conference on Women in Physics. 5–8 August 2014. Waterloo, Canada.
- Petrova A., Petrishchev M.* Study of the magnetic anomalies from WDMAM 2007 in the geothermal area of alpine folding (Italy and Tyrrhenian Sea) // EGU General Assembly 2011. Geophysical Research Abstracts, 2011. V. 13, EGU2011-14065.
- Petrova A.A., Kopytenko Yu.A., Petrishchev M.S.* Deep fluid systems of Fennoscandia greenstone belts // Practical and Teoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. 2019. P. 239–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I.* Verification of the Arctic Magnetic Field Component Model Based on Observations on the CHAMP and Swarm Satellites // Problems of Geocosmos–2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2022. P. 53–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_5
- Rehman S., Shash A.* Geothermal resources of Saudi Arabia – country update report // Proc. World Geothermal Congress. Turkey: Antalya; 2005. P. 7.
- Rizk Z.S., Alsharhan A.S.* Water Resources in the United Arab Emirates // Development in Water Science. 2003. V. 50. P. 245–264. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(03\)80022-9](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(03)80022-9)
- Sherif M., Al Mahmoudy A., Garamoon H. et al.* A Geoelectrical and hydrogeo chemical studies for delineating ground-water contamination due to salt-water intrusion in the outlet of Wadi Ham // *Environ. Geol. UAE*. 2006. V. 49. Iss. 4. P. 536–551. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0081-4>
- Sherif M., Kacimov A., Javadi A. et al.* Modeling Groundwater Flow and Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Wadi Ham, UAE // *Water Resource Management*. 2012. V. 26. P. 751–774. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9943-6>
- Sherif M., Sefelnasr A., Ebraheem A.A. et al.* Spatial and Temporal Changes of Groundwater Storage in the Quaternary Aquifer, UAE // *Water*. 2021. V. 13. Iss. 6. A. 864. <https://doi.org/10.3390/w13060864>
- Stern R.J., Johnson P.* Continental Lithosphere of the Arabian Plate; a Geologic, Petrologic, and Geophysical Synthesis // *Earth-Science Reviews*. 2010. V. 101. Iss. 1–2. P. 29–67. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.01.002>
- Taleb H.M.* Barriers hindering the utilisation of geothermal resources in Saudi Arabia // *Energy for Sustainable Development*. 2009. V. 13. Iss. 3. P. 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.06.004>
- UN-ESCWA and BGR (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Inventory of Shared Water Resources in Western Asia. Beirut. 2013. 606 p.

- Vincent P.* Saudi Arabia: an environmental overview. CRC Press, 2008. 332 p. <https://doi.org/10.1201/9780203030882>
- Water Atlas of Saudi Arabia. Ministry of Agriculture and Water, Riyadh. 1984.
- Wada Y., Heinrich L.* Assessment of transboundary aquifers of the world—Vulnerability arising from human water use // Environmental Research Letters. 2013. V. 8. Iss. 2. 24003.
- Weinberger G., Livshitz Y., Givati A. et al.* The Natural Water Resources Between the Mediterranean Sea and the Jordan River. Jerusalem: Israel Hydrological Service, 2012. 74 p.

THE STRUCTURE OF AQUIFERS BY MAGNETIC FIELD AND GRAVITY ANOMALIES

A.A. Petrova, O.V. Latysheva

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, 199034

Received June 08, 2022; revised June 26, 2022; accepted June 27, 2022

The results of the study of the main characteristics and structural features of the aquifer systems of cold and thermal waters on the example of well-known sources in the Middle East are presented. The study of groundwater aquifers was carried out on the basis of the technology of geophysical data complex interpretation, taking into account the features of the aquifers geological structure. Aquifers and underground reservoirs are visualized as zones of reduced magnetization and density of rocks on deep petrophysical sections calculated from magnetic field and gravity anomalies. Horizontal subterranean water conduits can be clearly traced on the areal distributions of magnetization and density along the stretches of the lineaments with reduced values. Vertical subterranean water conduits stand out vividly on magnetic and density sections in the form of ascending tracks. As a result of the study of deep sections through the zones of known thermal springs, an estimate of the dependence of the source temperature on the depth of the feeding underground reservoirs was obtained. The article examines the potential of underground resources aquifers of the arid territories of Israel, the Kingdom of Saudi Arabia and the United Arab Emirates, for which the relevance of the water problem, apparently, will not decrease in the coming decades. The forecast of the location of groundwater karst reservoirs can be carried out by magnetic and density sections, taking into account two-dimensional models of the distribution of magnetization and density of rocks. The methodology of the study of aquifer systems is applicable to the analysis of underground resources of Africa and the Middle East arid regions.

Keywords: aquifers, groundwater reservoirs, water resources.