

Применение геофизических методов при картировании активных тектонических структур, связанных с разрушительными землетрясениями в Сирии

Application of geophysical methods for mapping of active tectonic structures connected with destructive earthquakes in Syria

Ключевые слова: землетрясения; археосейсмологические исследования; георадиолокация; сейсморазведка; электрическое осевое зондирование; разрывные нарушения.

Key words: earthquakes; archeoseismic investigations; georadar; seismic surveying; electric axial sounding; faults.

Аннотация: представлены результаты применения комплекса геофизических методов при картировании сейсмогенерирующих разломов, с которыми связаны древние землетрясения, разрушившие средневековые города и сооружения в Сирийской Арабской Республике.

Abstract: the article presents results of using a complex of geophysical methods for mapping of seismogenerating faults caused ancient earthquakes destroyed some medieval towns and structures in the Syrian Arab Republic.

ГРИБ Н.Н.

Заместитель директора по научной работе
Технического института (филиала) Северо-Восточного федерального государственного университета, д.т.н., г. Нерюнгри, grib@nfygu.ru

ИМАЕВ В.С.

Заведующий лабораторией сейсмологии Института земной коры СО РАН, д.г.-м.н., г. Иркутск, imaev@crust.irk.ru

ИМАЕВА Л.П.

Старший научный сотрудник Института земной коры СО РАН, к.г.-м.н., г. Иркутск, imaeva@crust.irk.ru

ТРИФОНОВ В.Г.

Главный научный сотрудник Геологического института РАН, д.г.-м.н., г. Москва, trifonov@ginras.ru

СЯСЬКО А.А.

Начальник центра информационных технологий Технического института (филиала) Северо-Восточного федерального государственного университета, к.т.н., г. Нерюнгри, siasko@rambler.ru

GRIB N.N.

Deputy director for science of the Technical Institute (Branch) of the North-Eastern Federal University, DSc (doctor of science in Technics), Neryungri,

grib@nfygu.ru

IMAEV V.S.

Head of the Seismogeology Laboratory of the Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), Irkutsk, imaev@crust.irk.ru

IMAEVA L.P.

Senior researcher of the Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Irkutsk, imaeva@crust.irk.ru

TRIFONOV V.G.

Principal researcher of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), Moscow, trifonov@ginras.ru

SYASKO A.A.

Chief of the Centre of Information Technologies of the Technical Institute (Branch) of the North-Eastern Federal University, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Neryungri, siasko@rambler.ru

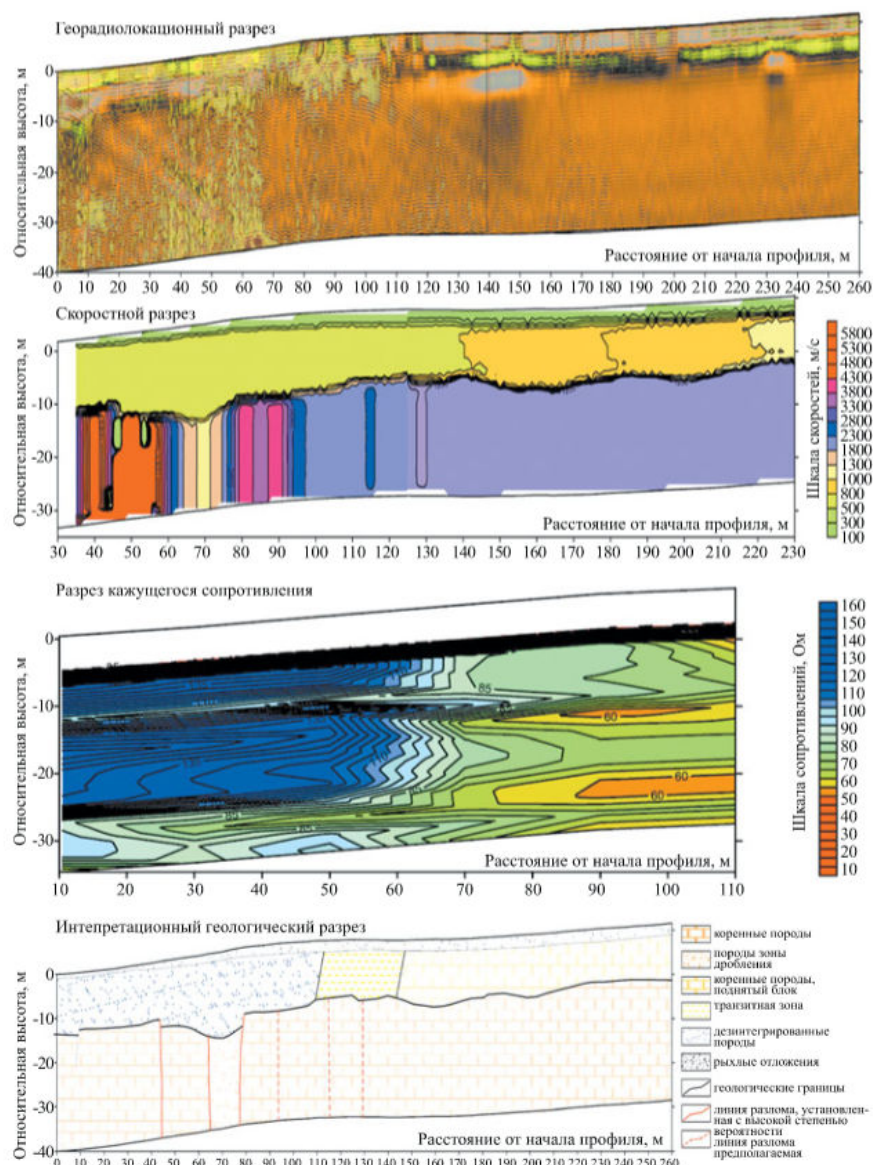


Рис. 1. Комплексная интерпретация данных георадиолокации, электрического зондирования и сейсморазведки в окрестностях города Афамия

Введение

Согласно историческим данным разрушение и упадок городов Среднего Востока и Средней Азии, замедление в развитии средневековых культур приписывались нашествию воинственных варваров. Вместе с тем повреждения, наблюдаемые в древних постройках и сооружениях, могут быть связаны также с технологией строительства, процессами выветривания, а также с разрушительными землетрясениями.

Публикации по археосейсмологии [1, 2] указывают на сейсмический характер разрушения некоторых средневековых городов Среднего Востока.

Основным источником информации о землетрясениях доинструментального периода являются письменные свидетельства. В них сообщается о разрушенных городах, причем наиболее полные сведения приводятся о повреждении культовых, правительственных и общественных сооружений.

Археологические и палеосейсмологические данные содержат вместе с тем лишь косвенные сведения о масштабах катастроф. Более полную картину способна дать археосейсмология, позволяющая выявить разрушения конкретных построек и оценить макросейсмический эффект [3].

С целью картирования сейсмогенерирующих разломов, с которыми многие авторитетные исследователи связывают разрушения древних городов и технических сооружений в Сирийской Арабской Республике, нами были проведены геофизические исследования в окрестностях ряда археологических памятников Сирии: городов Афамя, Пальмира, Алеппо, монастыря Святого Симеона, античного акведука вблизи г. Миссиаф. Разрушение их конструкций связывается с катастрофическими землетрясениями прошлого [5, 6, 9].

Методы исследования

Для решения поставленных задач нами использовались три основных метода малоглубинной геофизики: 1) метод дипольного осевого зондирования (ДОЗ), 2) сейсмический метод корреляции преломленных волн (КМПВ), 3) метод георадиолокации.

Дипольное осевое зондирование выполнялось геоэлектрической аппаратурой ERA-MAX, созданной в НПО ЭРА (г. Санкт-Петербург, Россия). Оборудование работает в режиме переменного электрического тока с частотой 625 Гц. Зондирование основано на возбуждении электрического источника с расстоянием 10 м на земной поверхности между генерирующими электродами А и В; расстояние между заземлениями дипольными электродами — М, N и т.д. — также составляет 10 м. Максимальная длина системы электродов составляет 150 м. Сила тока на линии варьирует от 20 до 200 мА и зависит от гео-



Рис. 2. Руины города Афамя

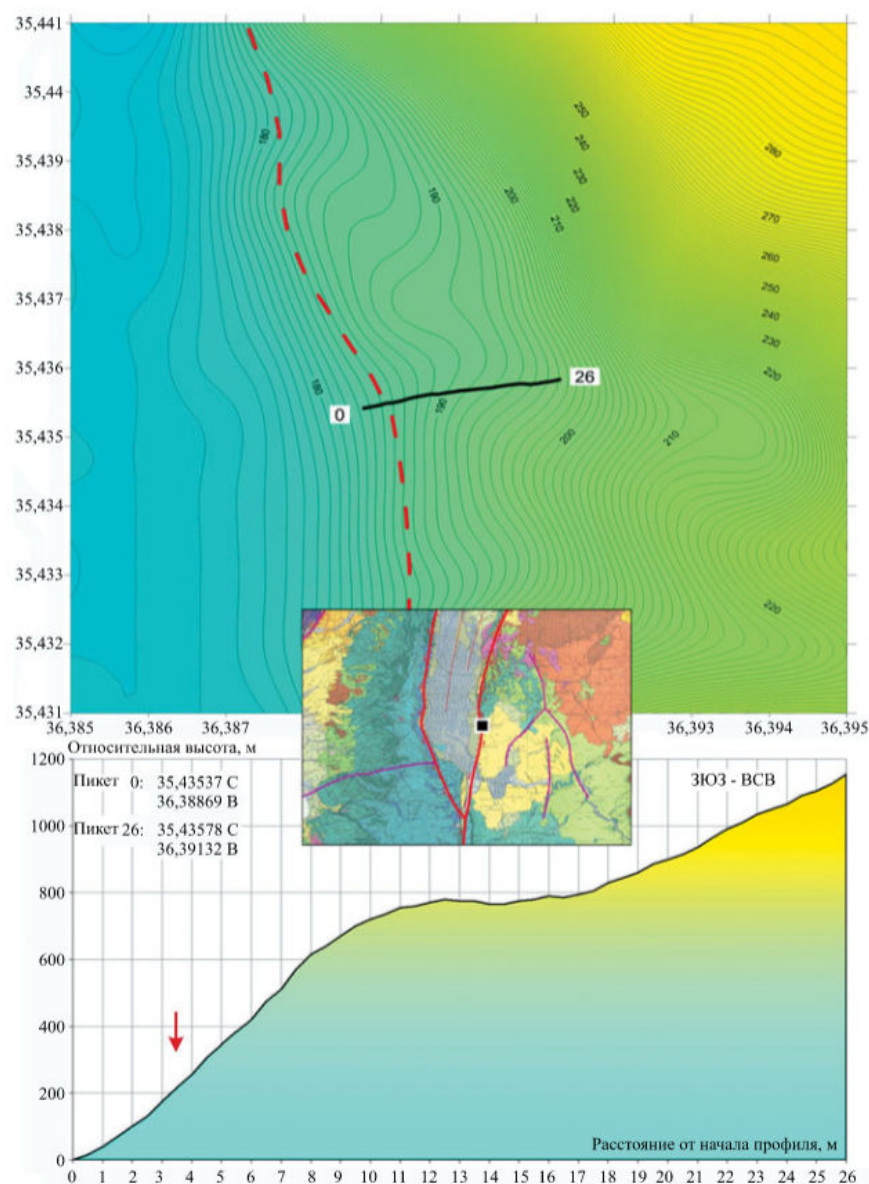


Рис. 3. Местоположение геофизического профиля на топографической основе (верхняя часть рисунка), геологической карте (центральная часть рисунка, местоположение профиля обозначено черным квадратом) и гипсометрического профиля с указанными координатами (нижняя часть рисунка). Красным пунктиром на топографической карте показан предполагаемый разлом, красной стрелкой обозначено начало профиля

электрических свойств слоев грунта на глубинах, достигающих 1/4 от длины линии (до 40 м).

Полученные данные обрабатывались на миникомпьютере HP/PAQ. Для их визуализации использовался метод построения разрезов распределения сопротивлений. Расчет производился по формуле:

$$\rho_k = \kappa \Delta U / I,$$

где $\kappa = 2\pi/[1/BM - 1/AM - 1/BN + 1/AN]$, ρ_k — кажущееся электрическое сопротивление; ΔU — разность электрических потенциалов на измерительных электродах MN; I — ток питания измерительной установки; BM, AM, BN, AN — геометрические размеры установки, м.

Построение разрезов распределения сопротивлений позволяло оценить геоэлектрическую ситуацию на профиле в целом. Профиль распределения сопротивлений экспортировался в формат AutoCAD для дальнейшей комплексной интерпретации.

Сейсмический метод корреляции преломленных волн. Для проведения анализа сейсмические волны возбуждались ударами кувалды. Для регистрации сейсмических сигналов использовалась 24-канальная цифровая сейсмическая станция «Сейсмолог-24» (изготовлена в г. Хабаровске, Россия) с вертикальными приемниками, имеющими частоту собственных колебаний 20 Гц. Расстояние между приемниками составило 5 м, а общая длина сейсмической линии с приемниками — 115 м. Мы применили схему четырех пунктов последовательного возбуждения сигналов, которые регистрировались приемниками, расположенными на расстоянии от 2,5 до 30 м от такого пункта. Время регистрации сигнала составляло 1024 мс с периодом дискретизации 0,5 мс. Для уменьшения ошибок мы повторяли возбуждение сигнала несколько раз из одного пункта и суммировали полученные сейсмограммы, что позволяло уменьшить влияние шума и поднять уровень сигналов. Дальнейшая интерпретация производилась по стандартной технологии обработки сейсмических преломленных волн (КМПВ). В результате строился разрез распределения скоростей сейсмических волн для профиля в целом. Он экспортировался в формат AutoCAD для дальнейшей комплексной интерпретации.

Георадарные исследования выполнялись аппаратурой ОКО-2, произведенной НПО «Логис» (г. Раменское, Россия). Использовался неизолированный антенный блок «Тритон» с частотами дипольной антенны 50 и 100 МГц, что давало 20-метровую глубину зондирования. Сигналы регистрировались программой регистрации и обработки GeoScan. Профиль зондировался дважды: с частотой 100 МГц при движении вперед по профилю и с частотой 50 МГц при возвращении. Оценка полевых радиогамм делалась по специальной программе GeoScan НПО «Логис». Полученные данные экспортировались в

формат AutoCAD для дальнейшей комплексной интерпретации.

Первичная обработка материалов георадиолокации

Первый этап интерпретации включал в себя технологические операции обработки первичных полевых данных: анализ исходных радарограмм, объединение фрагментов протяженных профилей, выделение волн-помех, определение уровня относительного нуля шкалы глубин, топографическая привязка меток радарограммы.

Второй этап — выделение георадарных комплексов. Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что в случае георадиолокационных наблюдений оси синфазности отраженных электромагнитных волн приурочены в основном к границам слоев с различной литологией [4]. Выделение георадарных комплексов производилось по признакам как угловых, так и стратиграфических несогласий. При обработке данных георадиолокации были выделены два основных георадарных комплекса — современных четвертичных отложений и верхней части осадочных коренных пород различной степени нарушенности.

Третий этап — выделение георадарных фаций. В составе георадарного комплекса осадочных коренных пород выделены фации неизмененных коренных пород и коренных пород зоны предполагаемых разрывных нарушений. Выделение фаций производилось путем визуального анализа волновой картины, при

котором исследовались основные параметры:

- конфигурация осей синфазности;
- интенсивность осей синфазности;
- частотный состав записи;
- протяженность осей синфазности;
- форма фациальных единиц в пространстве.

Каждый параметр несет определенную информацию о геологическом строении данной части разреза. Конфигурация отражений позволяет определить основные типы напластования. Амплитуда отражений зависит от изменения литологии, наличия различных флюидов и используется при прогнозировании латеральной изменчивости отложений. На частотный состав записи влияет взаимное расположение отражающих границ, наличие флюидов и т.д. [4].

На рисунке 1 приведены волновые картины, которые наиболее характерны для зон разрывных нарушений, совмещенные с данными сейсморазведки и электрического зондирования.

Материалы сейсморазведки (метод преломленных волн)

При обработке абсолютно всех сейсмических данных была принята трехслойная модель строения: зона малых скоростей, представленная по большей части рыхлыми отложениями верхней части разреза; зона разгрузки скального массива, представленная верхней интенсивно выветренной частью коренных пород; относительно ненарушенные скальные породы.

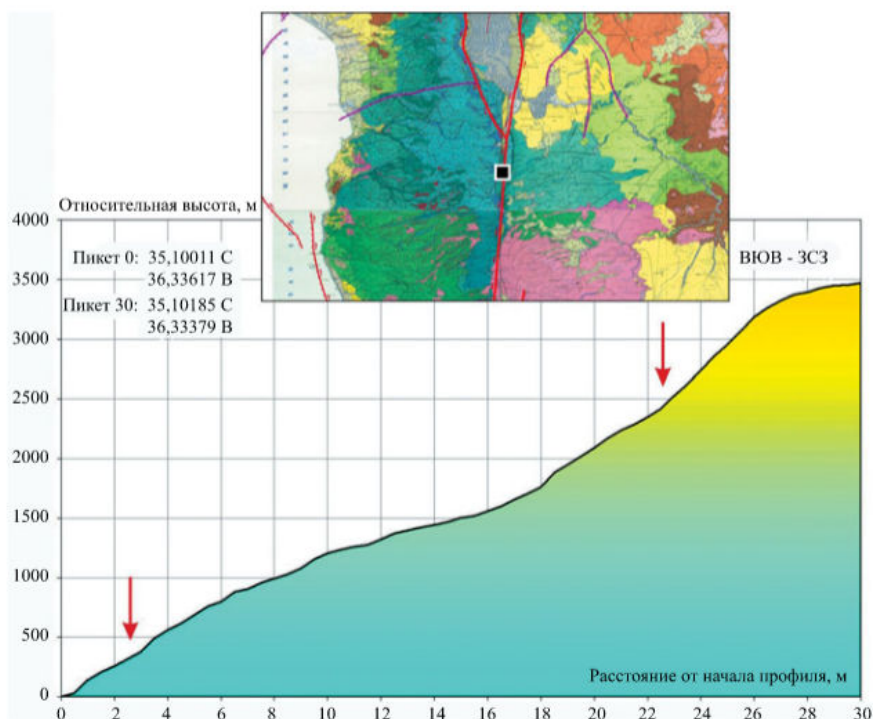


Рис. 4. Местоположение геофизического профиля участка Аль-Хариф на геологической карте (верхняя часть рисунка, местоположение профиля обозначено черным квадратом) и гипсометрического профиля с указанными координатами (нижняя часть рисунка). Красными стрелками обозначены начало и конец профиля

Скоростной разрез представлен на рис. 1. При интерпретации данных сейсморазведки отмечены следующие особенности разреза:

- относительная выдержанность мощности зоны малых скоростей (ЗМС);
- существенная изменчивость мощности зоны разгрузки скального массива при относительной выдержанности скоростных характеристик;
- существенный разброс скоростей распространения упругих волн в третьем слое, соответствующем скальному массиву.

В качестве рабочей принята следующая гипотеза: зоны разрывных нарушений выражены на скоростных разрезах существенным увеличением мощности второго слоя (зона разгрузки скального массива) и резким уменьшением скоростей распространения упругих волн в третьем слое (коренные породы). При сопоставлении скоростного разреза с геофизическими разрезами, полученными другими методами, и с космофотоснимками рабочая гипотеза в целом подтверждается.

Материалы электрического осевого зондирования

При интерпретации данных дипольного осевого зондирования важным фактором, влияющим на последующие построения, является определение положения точки отсчета. С теоретической точки зрения точкой отсчета следует считать середину расстояния между питающим и приемным диполями. Глубина точки отсчета принимается примерно от 1/6 до 1/3 разноса установки. Однако, по опыту предшествующих исследований, наиболее контрастным и геометрически близким к реальному геологическому строению является построение, при котором точка отсчета отнесена к середине питающего (неподвижного) диполя. Помимо преимуществ визуализации этот способ построения имеет еще одно неоспоримое достоинство: при отнесении точки отсчета к питающему диполю однозначно отбраковываются аномалии, связанные с приповерхностными и поверхностными объектами.

Все разрывные нарушения на интерпретационных разрезах ДОЗ выражены резким нарушением корреляции изолиний, высокоградиентными линейными зонами кажущихся сопротивлений (см. рис. 1).

Обсуждение результатов

Рассмотрим пример применения геофизических методов при археосейсмологических исследованиях тектонического разлома, образовавшегося в результате землетрясения, приведшего к разрушению г. Афамя в XII веке (рис. 2) [5–8].

На площади города геофизический профиль пересекает восточную зону активных разломов Эль-Габского прогиба (рис. 3).

Были проведены: дипольное электрическое зондирование (ДОЗ), георадиолокация и сейсморазведка корреляционным методом преломленных волн (КМПВ). Указанная площадь расположена в 1 км севернее современного города Афамя. Комплексная интерпретация полученных данных позволила выделить зону разрушения и смещения мощностью примерно 3 м в активной ветви зоны разрывных нарушений Восточный Эль-Габ. Кроме того, была выявлена зона менее активных раннечетвертичных разломов, которая расположена восточнее. В восточном крыле малоактивных (более древних) разломов верхний слой представлен деструктурированными породами неогена с геофизическими характеристиками, близкими к характеристикам пород самой зоны разломов.

Основная задача, которую необходимо было решить с помощью геофизических

исследований, — выявить разрывные нарушения, расположенные в пределах изучаемой площади, и провести детальное изучение их морфологии.

При первичном анализе полученных геофизических разрезов была отмечена высокая степень корреляции аномалий, выделяемых на разрезах разными методами. Выбор базового метода локализации аномалий был сделан исходя из соображений обеспечения максимальной точности определения положения аномалии по профилю. Эта задача решается с привлечением данных георадиолокации: шаг трасс по профилю наблюдений — 20 см. Для сравнения: шаг точек электрического зондирования по профилю — 20 м, шаг сейсмоприемников в методе КМПВ — 5 м. Таким образом, точность определения положения аномалии в плане составляет: для электрического зондирования $DO \pm 10$ м,

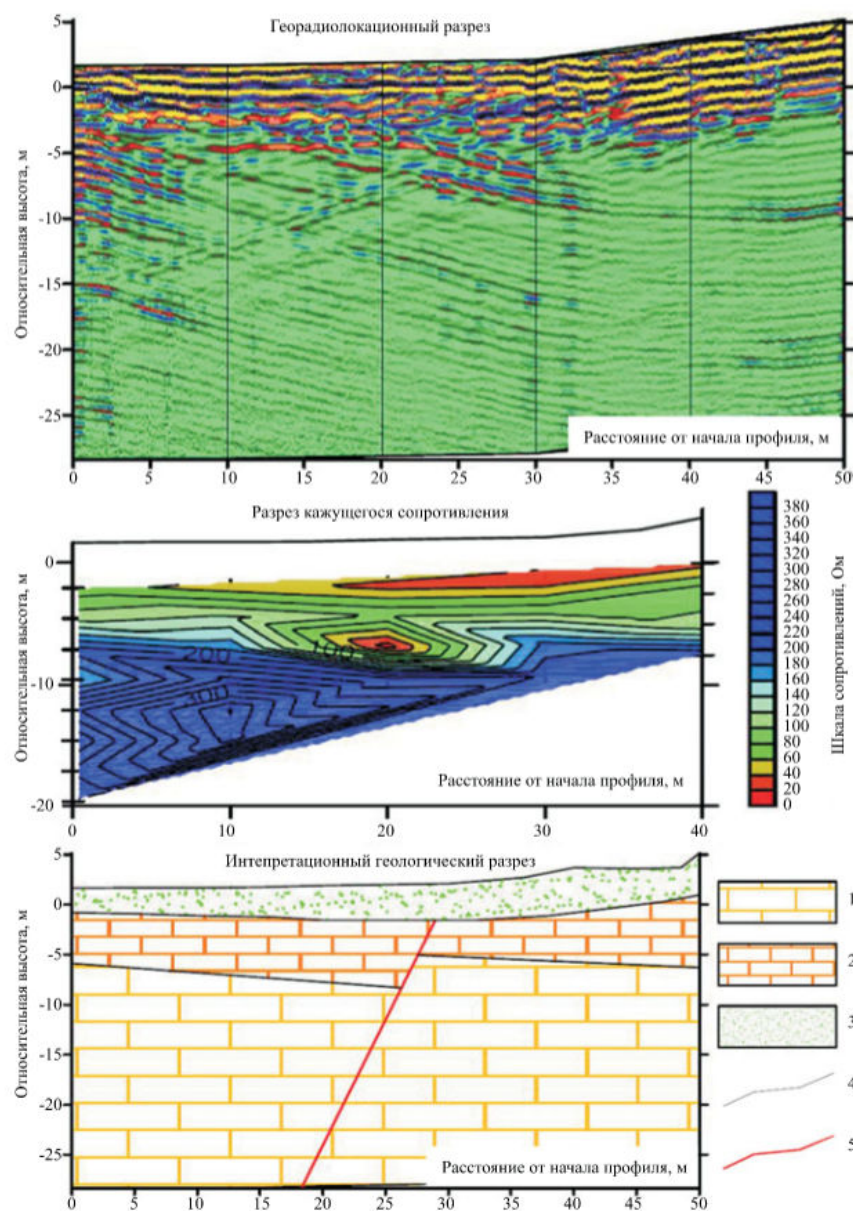


Рис. 5. Комплексная интерпретация данных георадиолокации, электрического зондирования и сейсморазведки в окрестностях г. Аль-Хариф (профиль А): 1 — скальный цоколь, 2 — слой-индикатор цоколя, 3 — рыхлые породы, 4 — геологические границы, 5 — разлом

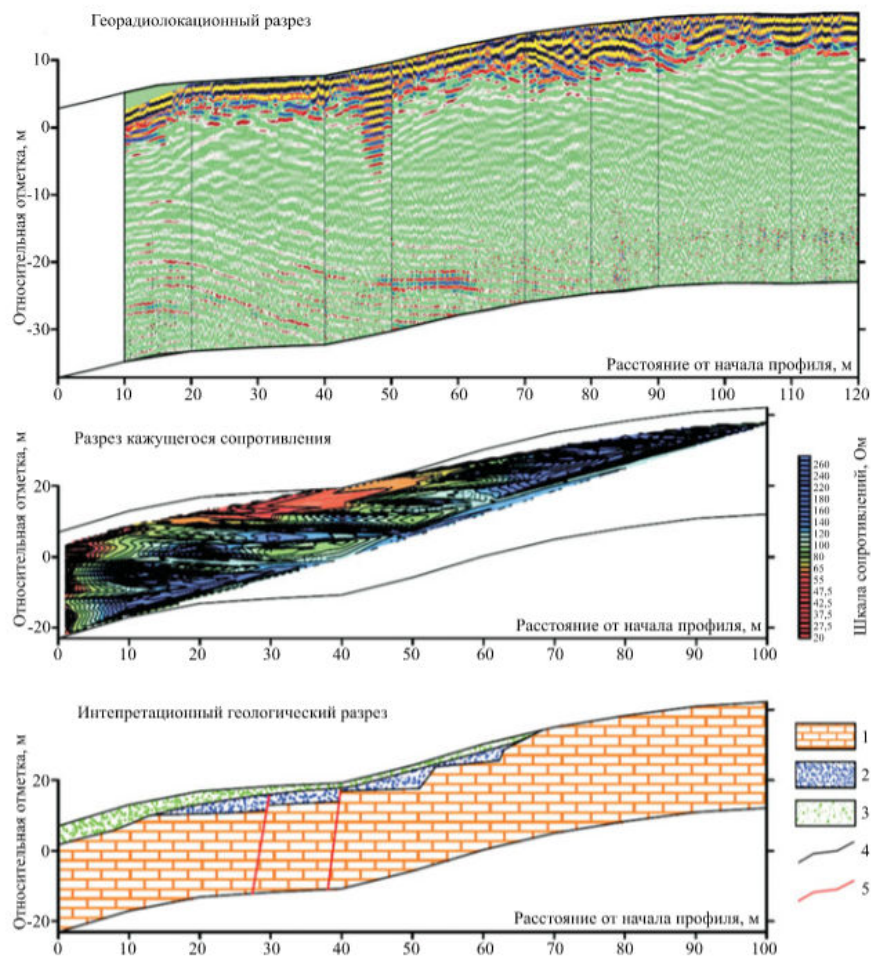


Рис. 6. Комплексная интерпретация данных георадиолокации, электрического зондирования и сейсморазведки в окрестностях г. Аль-Хариф (профиль В): 1 — скальный цоколь, 2 — дезинтегрированные скальные породы, 3 — рыхлые наносы, 4 — геологические границы, 5 — разломы (с высокой вероятностью)



Рис. 7. Смещение римского акведука, произошедшее в результате катастрофического землетрясения 1170 г. н.э. (материалы беспилотной аэрофотосъемки, снимок предоставлен М. Рукие)

для сейсморазведки КМПВ $\pm 2,5$ м, для георадиолокации $\pm 0,10$ м.

Очевидно, что при малой глубинности исследований георадиолокация обеспечивает максимальную точность локализации аномалии в плане. Исходя из этого положения был определен план интерпретации: выделение геологических границ на георадиолокационном разрезе; перенос выделенных границ на разрез кажущихся сопротивлений и скоростной разрез; отбраковка аномалий, не относящихся к возможному разрывным нарушениям (подобные аномалии обусловлены чаще всего поверхностными неоднородностями); выделение аномалий первого порядка, интерпретируемых как наиболее вероятные разрывные нарушения; увязка разрезов по разным профилям с привлечением дополнительных данных (космофотоснимков и ландшафтно-морфологического анализа).

При комплексной интерпретации по данным георадиолокации, электрического зондирования и сейсморазведки КМПВ положение разрывного нарушения на разрезе для всех методов совпало практически абсолютно (см. рис. 1). Литологическое расчленение разреза было произведено по скоростной дифференциации и, в верхней части, по диэлектрической проницаемости.

Второй яркий пример полученных результатов геофизического профилирования относится к участку Аль-Хариф (рис. 4), где система этих профилей пересекла южный (Миссиафский) субсеквент сегмента разломов Эль-Габ возле римского акведука, смещенного по наиболее активной ветви разломов на 12 м [5, 6, 9].

Два профиля, выполненных методами ДОЗ и георадара (рис. 5, 6), пересекли главную ветвь разлома, смещающего римский акведук, и эта ветвь выявляется на профиле.

На третьем профиле обнаруживается, кроме того, более восточный разлом, смещающий акведук на меньшее расстояние, а также два уступа в рельефе без признаков разломообразования. На четвертом профиле, выполненном всеми тремя методами, обнаружено еще несколько ветвей разлома западней той, что смещает акведук. Таким образом, зона разлома образована несколькими ветвями с разной степенью активности (рис. 7–9).

Заключение

Проведенные геофизические работы наряду с комплексом неотектонических и археосейсмологических исследований, а также изучение активных разрывных нарушений сеймотектоническими методами дали необходимую дополнительную информацию о внутренней структуре зон активных разломов, позволили установить особенности формирования сейсмоконтролирующих зон территории Сирийской Арабской Республики и предложить карту сейсмического районирования Сирии [4–6].



Рис. 8. Смещение римского акведука возле г. Аль-Хариф

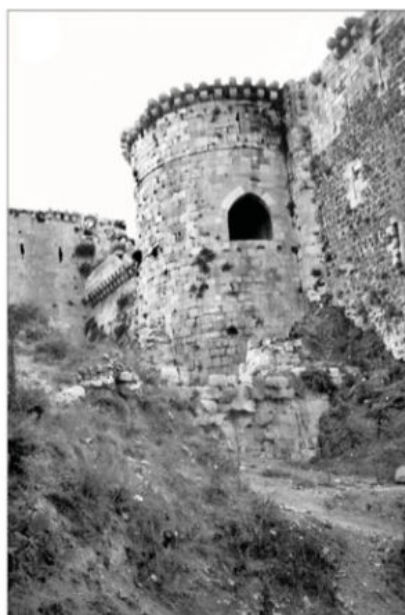
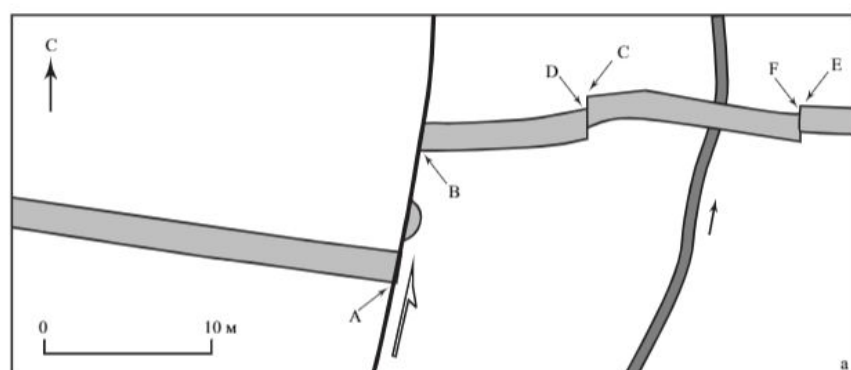


Рис. 9. Смещение римского акведука на Миссиафском субсегменте возле г. Аль-Хариф и в результате сейсмических разрушений в крепости Крак де Шевалье: а — план смещения акведука ([9], с поправками); б — акведук, смещенный на 10 м по главному разлому (А—В) и на 1–1,5 м по сопутствующему более мелкому разлому (С—D); в — смещение на 0,75 м по параллельному мелкому разлому (Е—F); г — крепость Крак де Шевалье, круглая Южная башня была построена в конце XII века на развалинах прямоугольной башни, разрушенной во время землетрясения 1170 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Тарази Э.А., Корженков А.М. Следы сильных землетрясений в древнем городе Айла, Южная Иордания // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозеологические проблемы: Материалы 4-го Междунар. симпозиума, г. Бишкек, 15–20 июня 2008 г. С. 235–238.
2. Корженков А.М., Кросби К., Мамыров Э., Орлова Л.А., Поволоцкая И.Э., Табалдиев К., Эрроусмит Р. О причине разрушения каменной средневековой крепости, Северное Прииссыккулье, Кыргызстан // Геодинамика и геозеология высокогорных регионов в XXI веке. Вып. 2. Бишкек, 2007. С. 30–38.
3. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие. М.: Издательство МГУ, 2008. 192 с.
4. Трифонов В.Г., Караханян А.С. Динамика Земли и развитие общества // Труды Геологического института РАН. Вып. 585. М.: ОГИ, 2008. 436 с.
5. Трифонов В.Г., Бачманов Д.М., Иванова Т.П., Имаев В.С. Принципы и технология использования геологических данных для оценки сейсмической опасности (на примере Сирии) // Инженерные изыскания. 2010. № 4. С. 44–51.
6. Трифонов В.Г., Додонов А.Е., Бачманов Д.М. и др. Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии. М.: ГЕОС, 2012. 215 с.
7. Ambraseys N.N. Earthquakes in Mediterranean and Middle East. Cambridge Univ. Press, 2009. 947 p.
8. Ambraseys N.N., Barazangi M. The 1759 earthquake in the Bekaa Valley: implication for earthquake hazard assessment in Eastern Mediterranean region // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94. P. 4007–4013.
9. Meghraoui M., Gomez F., Sheniat R., Van der Woerd J., Mouty M., Darkal A.N., Radwan Y., Layyous I., Al Najjar H., Darawchen R., Hijazi F., Al Chazzi R., Barazangi M. Evidence for 830 years of seismic quiescence from paleoseismology, archaeoseismology and historical seismicity along the Sci. Dead sea fault in Syria // Earth Planet Sci. Lett. 2003. V. 210. P. 35–52.