

ՀՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ
ԵՐԿՐԱԲԱՆԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ՄԱԿԱՐՅԱՆ ԽԱԶԱՏՈՒՐ ՎԱՐԴԱՆԻ

**ԳՐՈՒՆՏՆԵՐԻ ԶՐԻԿԱՑՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ. ՆՈՐ ՏՎՅԱԼՆԵՐ
ՍԱՐԴԱՐԱՊԱՏԻ ԿԱՌՈՒՅՑԻ, ՓԱՄԲԱԿ-ՍԵՎԱՆ-ՍՅՈՒՆԻՔ ԱԿՏԻՎ ԽՁՎԱԾՔԻ ԵՎ
ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ԱՎԱԶԱՆԻ ՍԵՅՍՄԻԿ ԱԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ**

Ատենախոսություն

ԻԴ.01.01 «Ընդհանուր երկրաբանություն» մասնագիտությամբ երկրաբանական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման համար

Գիտական ղեկավար՝

Երկրաբանական գիտությունների դոկտոր

Ա.Ս. Կարախանյան

Երևան, 2018

Национальная Академия Наук Республики Армения

Институт Геологических наук

Макарян Хачатур Варданович

**АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА: НОВЫЕ ДАННЫЕ О
СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ САРДАРАПАТСКОЙ СТРУКТУРЫ,
ПАМБАК-СЕВАН-СЮНИКСКОГО АКТИВНОГО РАЗЛОМА И
БАССЕЙНА ОЗЕРА СЕВАН**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата геологических наук

по специальности 24.01.01 Общая геология

Научный руководитель: доктор геологических наук

Караханян А. С.

ЕРЕВАН - 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИИ И АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.	11
1.1. Общая характеристика активной тектоники.	11
1.2. Основные характеристики исследуемых участков	14
1.2.1. Бассейн озера Севан.	14
1.2.2. Сардарapatская Структура	17
1.3. Памбак – Севан – Сюникский разлом (PSSF)	19
1.4. Проведенные ранее исследования феномена разжижения грунта на территории Армении.....	20
1.4.1. Опасные эффекты, возникающие при разжижение грунта.....	20
1.4.2. Исследования, проведенные на территории Республики Армения	28
ГЛАВА 2. ФЕНОМЕН РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА В РАЙОНЕ САРДАРАПАТСКОЙ СТРУКТУРЫ	30
2.1. Исследуемый участок: Сардарapatская структура	30
2.1.1. Общие сведения о Сардарapatской структуре	30
2.1.2. Геофизические данные (2009-2011 гг.) Сардарapatской структуры.....	38
2.2. Феномен разжижения грунта на восточном и западном флангах Сардарapatской структуры	41
2.3. Выводы:	48
ГЛАВА 3. ФЕНОМЕН РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА В РАЙОНЕ БАССЕЙНА ОЗЕРА СЕВАН.....	49
3.1. Общие сеймотектонические сведения о бассейне озера Севан	49
3.1.1. Гаварагетский разлом (GF).....	50
3.1.2. Сегменты PSSF-2 и PSSF-3.	52
3.1.3. Норатус – Канагехский разлом.	53
3.1.4. Норатуская перемычка.....	54

3.2. Магнитометрические исследования 2002 года.....	57
3.3. Феномен разжижения грунта в бассейне озера Севан.....	62
3.3.1. Феномен разжижения грунта в районе села Норатус	62
3.3.2. Следы феномена разжижения грунта в бассейне озера Севан.	67
ГЛАВА 4. ФЕНОМЕН РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА В РАЙОНЕ ГОРОДА СИСИАН...	70
4.1. Сисианский участок исследований: общие сведения	70
4.1.1. Сегмент PSSF-3.....	70
4.1.2. Хуступ – Гиратахский разлом.....	74
4.2. Феномен разжижения грунта недалеко от села Агиту.	74
4.3. Выводы:	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
5.1. Феномен разжижения грунтов и сейсмоструктура.....	89
5.2. Выводы и рекомендации:	92
Список использованной литературы	94

ВВЕДЕНИЕ

Территория современной Армении находится в зоне континентальной коллизии Евразийской и Аравийской литосферных плит, что обуславливает высокую сейсмическую активность и наличие активных протяженных разломов. Ещё в исторический период были задокументированы сильные землетрясения, ставшие причиной большого количества жертв и сильно повлиявшие на геополитику региона.

История исследований по сейсмотектонике Армении имеет два временных периода - до Спитакского землетрясения (07.12.1988) и после него. Спитакское землетрясение стало поворотным во многих отношениях, в том числе и в переоценке использовавшихся ранее методик и организации исследований активных разломов, геологии землетрясений и оценке сейсмической опасности. До Спитакского землетрясения исследования сейсмической опасности в Армении в основном сводились к анализу инструментального и, отчасти, исторического каталогов землетрясений, проводимого, как правило, сейсмологами и геофизиками. Исследования активных разломов не проводились, а редкие монографии, посвященные сейсмотектонике, публиковались специалистами в области региональной геологии и стратиграфии. Результатом явилась сильно заниженная оценка сейсмической опасности как для области Спитакского землетрясения, так и для остальной территории Армении. Спитакское землетрясение ($M_w=6.9$) стало трагическим уроком для Армении и послужило толчком для начала исследований по активной тектонике, сейсмотектонике, палеосейсмологии. Новый подход к исследованиям сейсмического режима позволил уже в 1994 году создать новую сейсмотектоническую модель территории Армении. Сотрудничество с иностранными специалистами и обмен опытом позволил за последние 30 лет существенно улучшить понимание сейсмотектонической ситуации на Малом Кавказе.

До сегодняшнего времени не теряется актуальность исследований в области архео- и палеотектоники. Одним из возможных направлений развития этой научной области является изучение феномена разжижения грунта.

Актуальность работы: Исследования феномена разжижения грунта как вторичного эффекта, вызванного сильными землетрясениями, имеют высокий приоритет на территории Армении. Актуальность изучения этого феномена в следующем:

1. Находясь в сейсмически активной зоне, Армения подвержена угрозе землетрясений с $M > 6$, и вероятность возникновения разжижения грунта здесь велика.

2. Ряд населенных пунктов находится в непосредственной близости от мест задокументированных свидетельств феномена разжижения грунта. В случае повторения данного явления, возможны разрушения и жертвы среди населения.

3. Эффективного инженерного решения для предотвращения разрушений от эффекта разжижения грунта не существует.

4. Феномен разжижения грунта, как маркер палеосейсмичности, является очень интересным и важным объектом для будущих исследований. Большой объем работ, выполненных иностранными коллегами по изучению данного явления, и разработанные методики дают возможность не только выявить и задокументировать новое, ранее неизвестное, сейсмическое событие, но и в полевых условиях оценить его предположительную интенсивность. Дополненные каталоги землетрясений существенно повысят качество оценки сейсмической опасности и риска.

5. Исследования феномена разжижения грунта и его последствия помогут пролить дополнительный свет на различные исторические сейсмические события.

Цель работы и решаемые задачи: Основной целью диссертационной работы является выявление и изучение феномена разжижения грунта с целью уточнения оценки опасности некоторых регионов территории Армении. Основные решаемые задачи данного исследования:

1. Повторный анализ имеющихся данных о ранее задокументированных структурах с целью выделения возможных свидетельств разжижения грунта.

2. Макросейсмические исследования зафиксированных нептунических даек, образованных в результате разжижения грунта, выявление новых таких объектов, оценка на их основе интенсивности и магнитуды землетрясений.

3. Отбор образцов грунта, деформированного феноменом разжижения грунта, для изотопного анализа с целью определения относительного возраста событий, вызвавших феномен разжижения грунта.

4. Интерпретация полученных геологических и лабораторных данных и их сравнение с имеющимися каталогами исторических землетрясений.

5. Создание базы данных по пространственному распределению выявленных последствий разжижения грунта для определения направлений будущих исследований.

Фактический материал и методика исследований. Основу диссертационной работы составляют результаты полевых и лабораторных исследований автора с 2013 по 2017 годы. Пересмотрены данные полевых работ, проведенных после 2002 года на выделенных участках, и на их основе систематизированы и выделены наиболее перспективные направления исследований. В работе была использована литература, посвященная Малому Кавказу и его сеймотектонической позиции, различные публикации, касающиеся темы диссертационной работы. На исследуемых участках были проведены полевые работы, в том числе в рамках проектов по международным грантам LIA (Laboratoires Internationaux Associés), PEER (Partnerships for Enhanced Engagement in Research), ISTC (International Centre for Theoretical Sciences). Макросейсмические исследования позволили сравнить полученные данные с работами иностранных специалистов для более полного понимания ситуации. Анализы проб, отобранных для гранулометрических исследований, были выполнены в лаборатории ЕГУ, а полученные результаты были использованы для интерпретации геологических и геофизических контекстов исследуемых регионов. В иностранных лабораториях (Beta Analytic Inc., США, лаборатории университета Глазго, Шотландия) был проведен изотопный анализ проб почвенного слоя из задокументированных обнажений.

В рамках выполненной диссертационной работы, было осуществлено свыше 10 гранулометрических анализов пород, 5 изотопных анализов C14.

Структура и объем диссертационного исследования:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, насчитывающего 71-наименований. Работа изложена на 101-ти страницах, содержит 52 рисунков. (Общий объем текста - 99 страниц, включая 2 рисунков).

Научная новизна исследования:

1. Макросейсмические исследования в районе Сардарapatской структуры позволили задокументировать поверхностный разрыв от сильного землетрясения, а также следы феномена разжижения грунта. Полученные результаты позволили сделать вывод об активности Сардарapatской структуры, её кинематике и о приблизительной дате сейсмического события.

2. Геологические исследования вблизи села Норатус (Севанский бассейн) выявили следы сильного землетрясения в виде дайки песка, видимой мощностью более 30 см., внедренной в верхние слои. Гранулометрический анализ подтвердил выводы макросейсмических данных – дайка внедренного песка является эффектом разжижения грунта. Результаты изотопного анализа связали данный эффект с землетрясением, произошедшим до VI-ого тысячелетия до н.э. Задокументированные обнажения и их анализ позволили определить интенсивность сейсмического события значениями IX-X по шкале MSK64.

3. Новые задокументированные свидетельства феномена разжижения грунта в нескольких километрах от города Сисиан, и их анализ показал наличие сильного землетрясения. Внедренная дайка песка соответствовала землетрясению с интенсивностью X-XI по шкале MSK64. Датировка образцов почвенного слоя ограничила дату события между IX и XVI веками нашей эры. Сравнение полученных данных с имеющимся историческим каталогом позволили связать данный феномен с землетрясением 1406 года.

4. Задокументированное недалеко от города Сисиан угловое несогласие слоев четвертичных грунта явилось результатом подвижки по разлому при сильном землетрясении. На основе выполненных исследований намечена структурная связь

Памбак-Севан-Сюникского разлома с Хуступ-Гиратахским разломом. Для более полного обоснования которой необходимо проведение дополнительных работ

Практическая новизна исследования:

1. Результаты диссертационной работы позволяют уточнить сеймотектоническую модель исследуемых территорий.

2. Результаты диссертационной работы расширяют и уточняют сведения о некоторых событиях исторического периода как в сейсмологическом, так и в археологическом отношении.

3. Результаты диссертационной работы позволяют наметить направления дальнейших исследований по уточнению расположения некоторых известных и, возможно, выявлению новых тектонических структур.

Апробация работы:

Отдельные положения диссертационной работы докладывались:

1. На III Международной научной конференции молодых ученых: “Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства”. 01-04.11.2017г., Гюмри-Цахкадзор, (Республика Армения).

2. На научных семинарах ИГН НАН РА.

3. Организованный Тбилисский государственный университет и Государственный университет Ильи международный форум «Моделирование активной деформации коры», Абастумани, Грузия 28.08.2015-01.09.2015

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях автора:

1. **Х.В. Макарян.** «Норатузская перемычка: гипотезы образования и их реанализ» Ереван. Изд. “Гитутюн” НАН РА. «Наука о Земле» 2/2017, стр. 66-74.

2. **Караханян А.С., Баласанян С.В., Макарян Х.В., Геворкян М.Р.** Сардарпатская структура (Армения): Новые данные о сейсмической активности.

Владикавказ, Межд. научный журнал: Устойчивое развитие горных территорий. /Науки о Земле/, 2017, Т.9, № 4 (34), с. 332-343.

3. **Karakhanyan A., Badalyan R., Harutyunian A., Avagyan A., Philip H., Davtyan V., Alaverdyan G., Makaryan K., Martirosyan M.** « Archaeoseismological studies at the Pambak-Sevan-Syunik fault system, Armenia », in Sorkhabi, R., ed., Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian's Forty Years of Research Contributions: Geological Society of America Special Paper 525-15, 2016, p. 21.

Благодарности. Данная работа была выполнена в рамках базовых и тематических программ ИГН НАН Армении, проектов LIA (Laboratoires Internationaux Associés) “Природные опасности и стратегии адаптации в Армении, начиная с 10 000 г до н.э.”, “Крупные высокогорные озера как ключевые компоненты локальной экологии: изучение природных и антропогенных воздействий” МНТЦ (Международный научно-технический центр), и “Active Geodynamics of the Caucasus Region” PEER (Partnerships for Enhanced Engagement in Research). Автор благодарит Ч. Коннора и полевую группу Университета Южной Флориды за предоставленные материалы полевых работ 2002 года, Е. Ж. Абгарян за её помощь в процессе подготовки рукописи, а также С. Р. Аракеляна за помощь в составлении GIS базы данных для её дальнейшего анализа. За поддержку и помощь при проведении полевых работ, анализе результатов и оформлении диссертационного исследования выражаю большую благодарность сотрудникам ИГН и НИК “Геориск”: Бабаян Г., Геворкян М., Игитян А., и т. д. Особая благодарность адресована научному руководителю А. С. Караханяну, который внес большой вклад в понимание геологических и геофизических контекстов исследуемых регионов, за ценные советы и правильную мотивацию. Автор выражает глубокую признательность директору ИГН Меликсетяну Х. и ученому секретарю института Шагиняну Г. за твердую поддержку и понимание, проявленную ими на всех стадиях выполнения и подготовке к оформлению и защите диссертационной работы.

Защищаемые положения:

- Сардарпатская структура является активным разломом со взбросовым механизмом подвижки и со следами поверхностного разрыва и разжижения грунта от сильного землетрясения, произошедшего после VII века до н.э.
- Многочисленные следы разжижения грунта на окраине села Норатус связаны с землетрясением, произошедшим более 6000 лет назад с интенсивностью около IX-X по шкале MSK 64.
- Феномен разжижения грунта, задокументированный в четвертичных обнажениях возле г. Сисиан, является свидетельством сильного землетрясения с интенсивностью X-XI (INQUA, MSK-64), произошедшим между 878 - 1013 cal AD и 1485 - 1650 cal AD. Этот феномен, как и обнаруженное угловое несогласие в позднечетвертичных слоях стали результатом подвижки по разлому при сильном землетрясении.
- Выявленные автором в Армении явления разжижения грунта при сильных исторических и доисторических землетрясениях позволили уточнить параметры этих землетрясений и сейсмический потенциал активных разломов, с которыми такие землетрясения связаны.

ГЛАВА 1. ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИИ И АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

1.1. Общая характеристика активной тектоники.

Республика Армения находится в центральной части зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит; область испытывает меридиональное сжатие и широтное растяжение, сопровождаемые интенсивным разломообразованием, сильными землетрясениями и активным вулканизмом. В результате этой конвергенции, Анатолийская плита выжимается на запад, а Иранский блок – на восток (Sengor, 1990; Sosson et al., 2010) (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Активные разломы зоны коллизии Евразийской и Аравийской плиты.

Согласно данным GPS, Аравийская литосферная плита движется в сторону Евразийской плиты со скоростью приблизительно 17 мм/год (Reilinger et al., 2006).

Тектоническое сжатие и растяжение на Малом Кавказе приводят к образованию активных разломов со сдвиговой кинематикой, сочетающейся со сбросовой и взбросовой компонентами (Karakhanyan et al., 2004) (рис. 1.2).

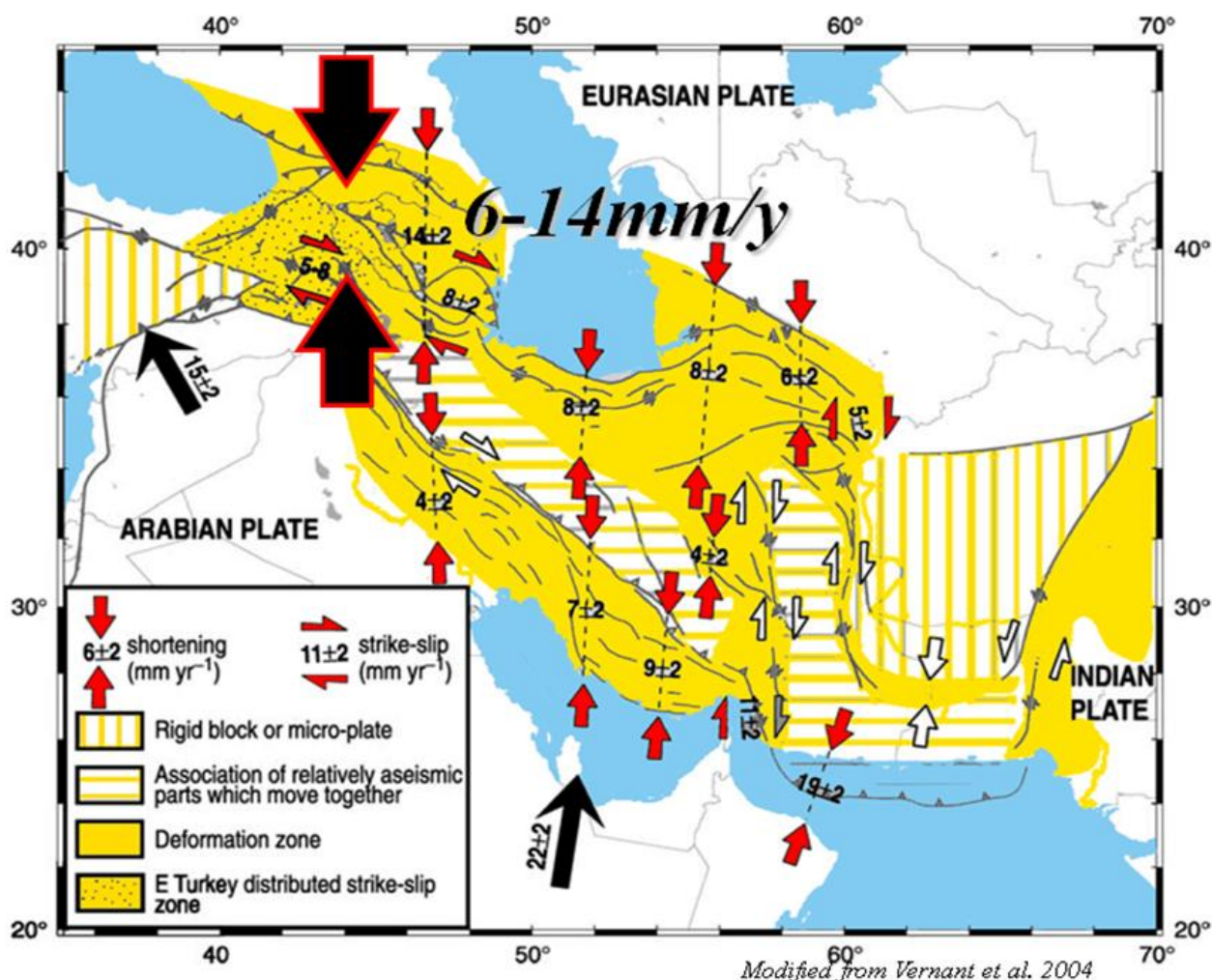


Рис. 1.2. Скорости смещений по активным разломам на основе данных GPS съемок (Vernant et al., 2004). Меридиональное сжатие области, на которой находится РА отмечено черными стрелками.

Активные разломы на территории Армении являются источниками сильных землетрясений. Согласно сеймотектонической модели SM-Georisk (Karakhanyan et al., 2004) была создана таблица (табл. 1.1) с оценками M_{\max} для активных разломов РА.

N	Код зоны	Название зоны	Оценка Mmax
1	PSSF	Памбак-Севан-Сюникская	7.7
2	GF	Гарнийская	7.5
3	Af	Ахурянская	7.1
4	ESF	Желтореченско-Сарикамышская	6.7
5	GSKF	Гайлату-Сиячеще-Северотевризская	7.6
6	PDNF	Паракар-Двин-Нахичеванская	6,8
7	MF-DF	Маку-Догубаязет	6.8
8	IF	Игдирская	6.7
9	SF	Сардарапатская	6.6.

Таблица 1.1 Основные сейсмогенные зоны модели SM-Georisk (Караханян и др, 2004, Karakhanyan et al. 2011)

Согласно SM-Georisk, Памбак – Севан – Сюникский разлом (PSSF) имеет приблизительно 400 км в длину и является наиболее активным на территории Армении. На его протяжении горизонтальная скорость движения варьирует от 0.5 до 3-4 мм/год (Philip et al., 2001; Трифонов, 2008), а по данным GPS 0.3–3 мм/год (Reilinger et al., 2006; Karakhanian et al., 2013). Двухсоткилометровый Гарнийский субрегиональный разлом имеет правосдвиговую кинематику и предполагаемую скорость смещения 3 мм/год. Палеосейсмологические и археосейсмологические исследования показали, что эти разломы могут генерировать землетрясения магнитудой до 7.5-7.7 (Karakhanian et al., 2004; Трифонов, 2008, Avagyan, 2009).

Древние города и столицы Армении - Ерзнка, Двин, Ани - неоднократно разрушались сильными землетрясениями. Современная столица – Ереван - была

сильно разрушена Гарнийским землетрясением 1679 года. Максимально высокая оценка магнитуды исторического землетрясения – 7.5–7.7 для события 1139 года AD на PSSF (Nikonov, 1986).

1.2. Основные характеристики исследуемых участков

1.2.1. Бассейн озера Севан.

Озеро Севан является самым большим озером Кавказа и ценным источником пресной воды. Его площадь составляет 1241 км², а площадь бассейна – 4891 км² (рис. 1.3). Озеро расположено на высоте 1900 м. Северо-западная часть озера носит название Малый Севан и имеет максимальную глубину 83 м. Юго-восточная часть, или Большой Севан, в два раза больше по площади, но имеет глубину до 15-17 м.

Бассейн озера Севан изучался многими исследователями. Е.Е. Милановский (1968) описал Севанскую впадину как брахисинклиналь груботреугольной формы, местами ограниченную и осложненную молодыми разломами. В течении мэотиса, плиоцена и антропогена в центральной части, прогибавшейся Севанской впадины существовало озеро, размеры которого неоднократно изменялись вплоть до полного или почти полного его осушения (Милановский, 1968). Изучение структурно-текстурных особенностей осадков озера Севан показало, что деформации в коричнево-серых глинах являются следствием тектонически беспокойной обстановки в период седиментации и пост-седиментационного времени (Сатиан, 1994). Основываясь на результатах многих исследований, можно заключить, что Севанская впадина является сложно построенной депрессией типа брахисинклинали или мульды, возникшей во внутренней части мегантиклинория Малого Кавказа (Саядян, 2009).

Северо-восточный берег озера Севан представлен Севано-Акеринской офиолитовой сутурой среднеюрского и раннемелового возраста, которая является структурной границей между Евразийской периферией и Северо-Армянским блоком (Sosson et al., 2010; Asatryan et al., 2010). Континентальная коллизия на севере Северо-Армянского блока завершилась в палеоцене (Sosson et al., 2010).

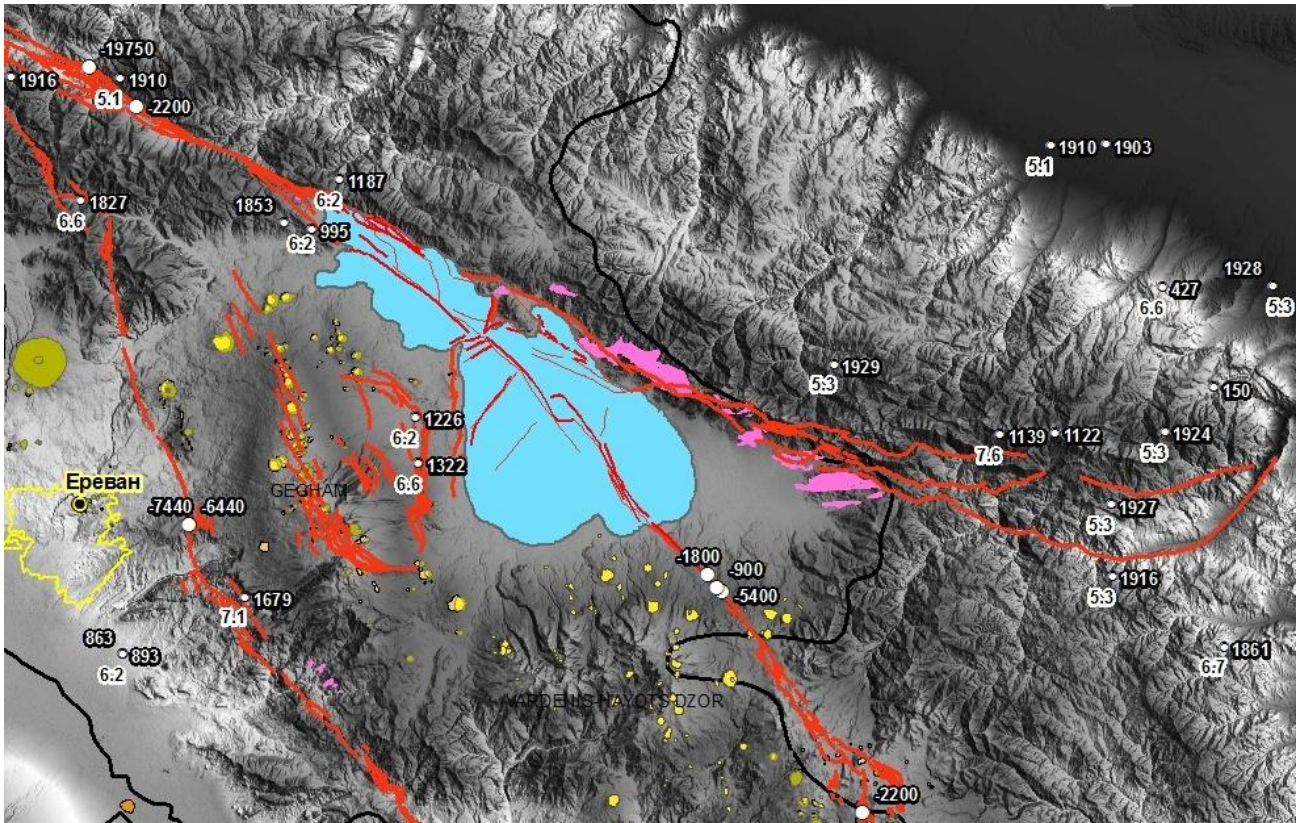


Рис. 1.3. Активные разломы (красные линии), эпицентры сильных землетрясений (белые точки), четвертичные вулканы (желтый), выходы пород офиолитовой ассоциации (фиолетовый) в бассейне озера Севан (Karakhanyan et al., 2011).

Юго-западный берег озера сформирован системой сбросовых Гаварагетских разломов с простиранием С-Ю, образовавших грабеновые и горстовые структуры.

С запада и юга озеро Севан ограничено Гегамским и Варденискими вулканическими хребтами с многочисленными центрами четвертичного ареального вулканизма. Продолжением Варденинского хребта на юг является Сюникский вулканический хребет с ареальным вулканизмом четвертичного возраста (до голоцена). Многие центры ареального вулканизма Гегамского, Варденинского и Сюникского хребтов имеют четкую линейную организованность, вытягиваясь в отдельные кластеры (Karakhanyan et al., 2002; Avagyan et al., 2005). Данные GPS наблюдений за 10 лет зафиксировали растяжение в направлении запад-восток всего бассейна озера Севан со скоростью 2.4 мм/год (+/- 1) (Davtyan, 2007).

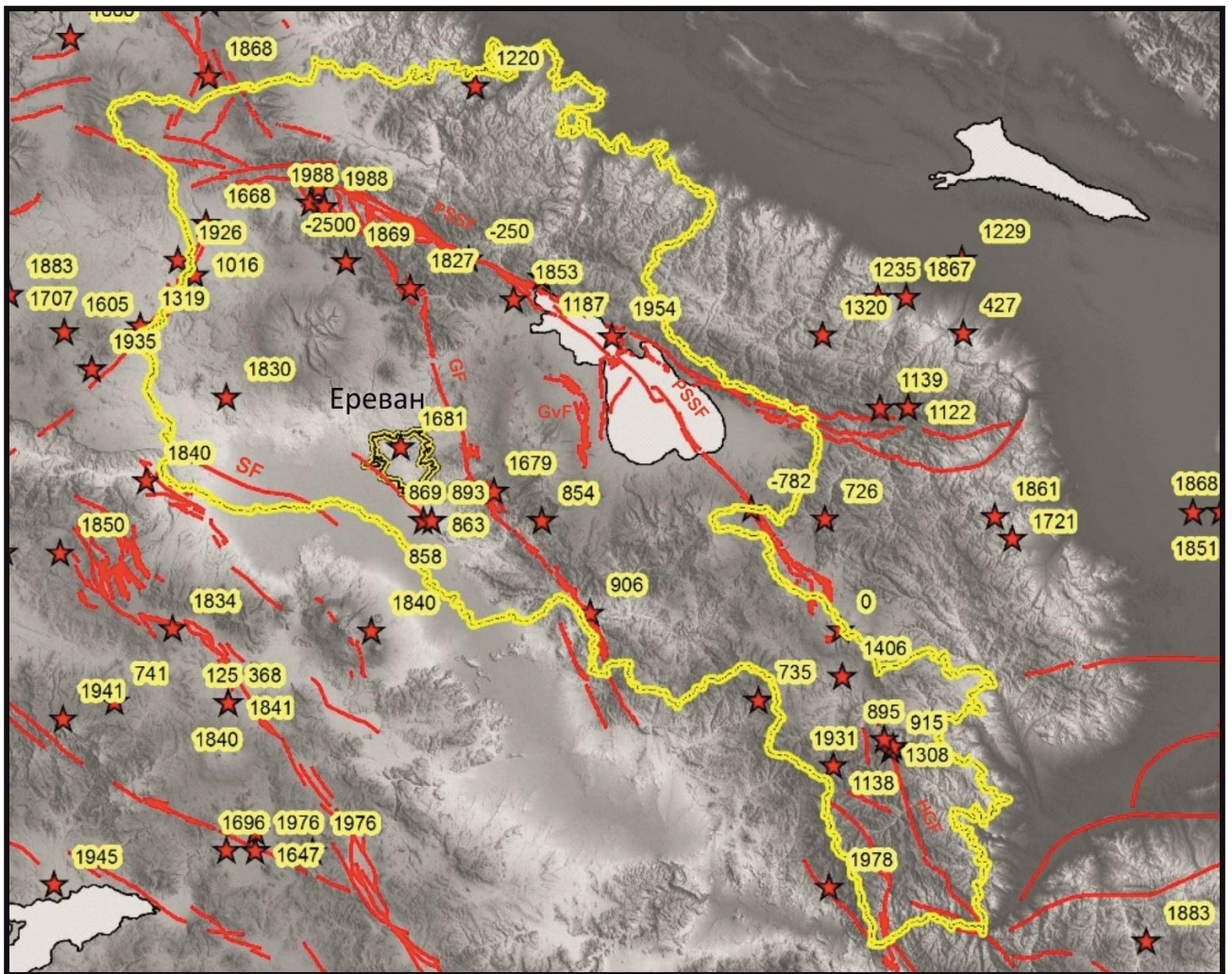


Рис. 1.4. DEM территории Республики Армения с активными разломами (красные линии) и эпицентрами сильных землетрясений (звездочки)

С Памбак-Севан-Сюникским и Гаварагетским разломами связаны многочисленные исторические и доисторические землетрясения с магнитудами от 6.2 до 7.7 (рис. 1.3, 1.4). Современная сейсмическая активность представлена несколькими землетрясениями - 1933, 1936, 1945, 1947, 1992, 1993 и 1996 годов с магнитудами от 4.3 до 5.0.

1.2.2. Сардарапатская Структура

Сардарапатская структура имеет общую длину в 46 ± 5 км. Она впервые была выделена в модели SM-1995, созданной в НССЗ (Караханян и др., 2004), однако в окончательный вариант модели SM-1995, доработанной в “Армэнергосейсмопроекте”, данные о ней включены не были (рис. 1.4, 1.5).

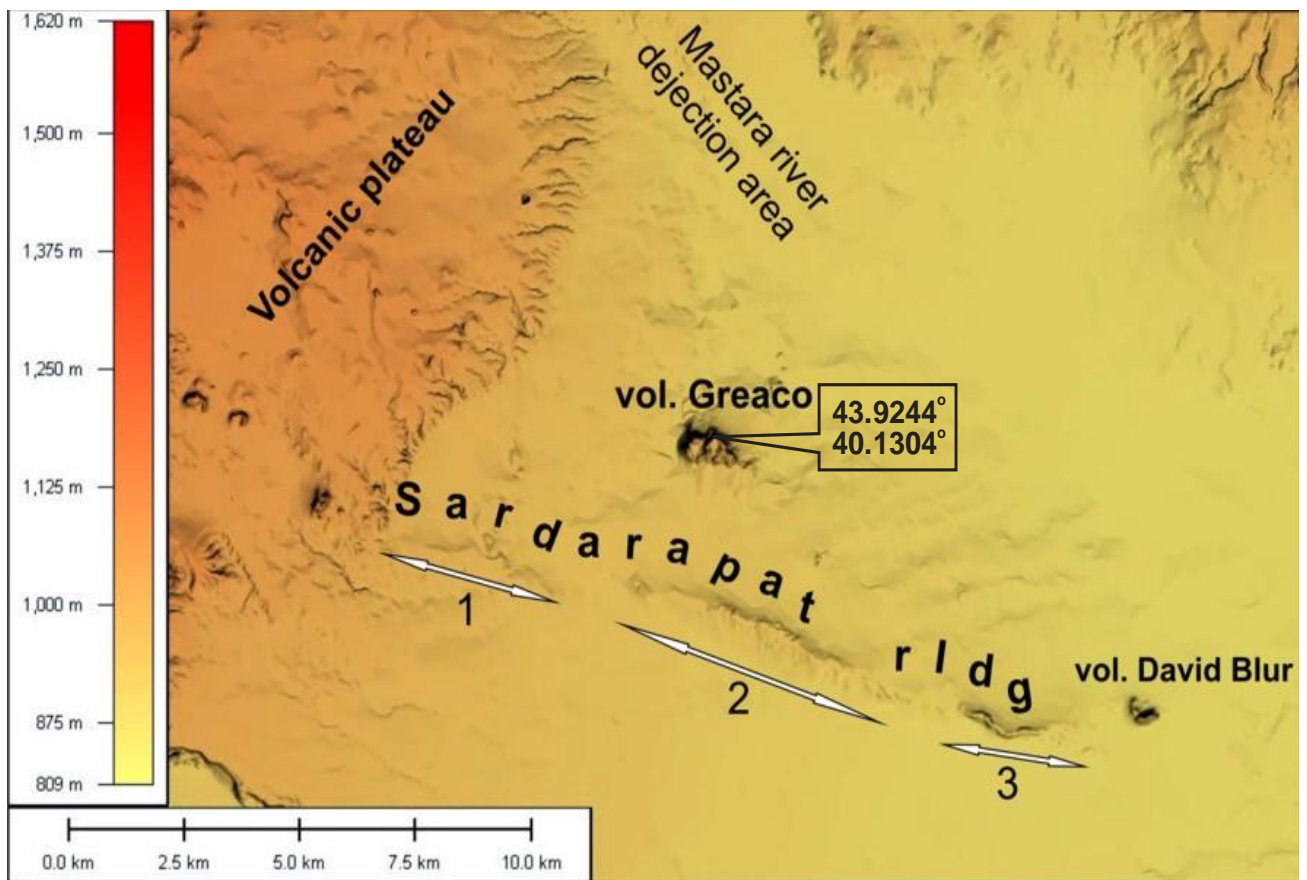


Рис. 1.5. Сардарапатская структура. Сегменты (Seismic, 2011b).

Сардарапатская структура представлена валообразным поднятием с вертикальной амплитудой 40-70 метров над поверхностью Араратской депрессии. Сардарапатское поднятие состоит из системы валов и холмов, сложенных четвертичными аллювиально-делювиальными, озерными отложениями, туфами и базальтами. (Karakhanyan et al., 2011).

На момент составления модели SM-1995 считалось, что Сардарapatская структура является сдвиговой зоной, сформировавшей «flower structure». Скорость вертикального смещения составила 0.74 мм/год и была определена с использованием данных археологических исследований и изотопного анализа C14. Скорость горизонтального смещения рассчитать не удалось.

Центральная часть Араратской впадины включает в себя сеть палео-русел реки Аракс. Вертикальные и горизонтальные перемещения по выделенному Сардарapatскому сегменту и системе разломов Сардарapat-Нахичеван привели к тому, что русло Аракса мигрировало на 12 км к югу (Karakhanyan et al. 2004). Изгибы и смещения палео-русел реки Аракс подтверждают правостороннее динамическое воздействие разлома Сардарапата. Исторические данные позволяют оценить даты миграции. В древние времена река Аракс текла по подножию вулкана Давтаблур, и тогда там находилась первая столица Королевства Армавир. Согласно данным Мовсеса Хоренаци, армянского летописца, река Аракс ушла от города в 200-220 гг. до н.э., и поскольку воды для города и королевского двора стало недостаточно, столица была перенесена в другое место (Karakhanyan et al., 1994, Seismic Hazard Assessment, 2011).

Вторая фаза активации была связана с сегментом Паракар-Двин и приходится на 300-388 г. н.э. В то время армянская столица Арташат находилась при слиянии Аракс с Мецамором. В результате активизации сегмента Паракар-Двин сток по реке Мецамор прекратился и разделился на пять рек (Севжур, Касах, Раздан, Азат и Веди), которые до сих пор текут отдельно в реку Аракс. Район вокруг Арташата превратился в болота, и воздух там был наполнен зловонием, поэтому король Хосров Котайк перенес столицу в город Двин. Не исключено, что эта перестройка была спровоцирована сильным землетрясением, которое произошло в 368 году до н.э. и разрушило город Аршакаван, расположенный в 60 км к юго-западу от Арташата.

Многочисленные палео-русла реки Аракс прослеживаются на турецкой территории к северу и к востоку от города Игдыр. Последние миграции реки Аракс, зарегистрированные в 1931 году и в 2001 году, привели к пограничным спорам,

поскольку граница между Турцией и Арменией, а также между Ираном и Азербайджаном проходит вдоль этой реки.

1.3. Памбак – Севан – Сюникский разлом (PSSF)

Памбак-Севан-Сюникский разлом (PSSF) (рис. 1.4) - наиболее крупная система активных разломов Армении. Система разломов со всеми сегментами имеет длину 470 км и несет морфологические признаки голоценовых правосторонних сдвиговых движений с переменной взбросо/надвиговой или сбросовой вертикальной компонентой. Памбак-Севан-Сюникский (PSSF) разлом состоит из трех крупных сегментов, которые в свою очередь состоят из нескольких субсегментов. Наиболее западный сегмент PSSF 1 имеет признаки взбросовых и сдвиговых перемещений. Северовосточный сегмент PSSF 2 проходит вдоль Севанской офиолитовой сутуры и демонстрирует в основном взбросовый и надвиговой механизмы. Юго-восточный сегмент PSSF3 является диагональным разломом, и за счет этого сдвиговые перемещения здесь преобладают. Характеристика многих особенностей Памбак-Севан-Сюникского разлома приведена в работах (Милановский, 1952, 1968; Karakhanyan et al., 1997, 2004; Philip et al., 2001; Avagyan, 2001; Давтян и др., 2007).

Для западного сегмента PSSF-1 скорость сдвиговых смещений по геологическим данным оценивается в 2.24 мм/год (+/- 0.96), согласно (Philip et al., 2001), и 3-4 мм/год, согласно (Трифонов, 2008). Скорость сдвиговых смещений, определенная на основе данных GPS наблюдений, демонстрирует близкие к геологическим скоростям значения в 2.2 мм/год и компрессию (сжатие) со скоростью в 0.2-0.7 мм/год (Karakhanyan et al. 2013). Для сегмента PSSF-2 имеются оценки только по GPS измерениям, которые показывают скорость сдвиговых смещений в 1.1 мм/год и сжатие со скоростью 0.9 мм/год (Karakhanyan et al. 2013). Для сегмента PSSF-3 оценки скорости смещения по геологическим данным у разных авторов расходятся, меняясь в диапазоне от 4-5 мм/год (Трифонов, 2008) до 0.53 мм/год (Philip et al., 2001).

С Памбак-Севан-Сюникским разломом связано мало сильных исторических землетрясений. Для сегмента PSSF-1 имеются данные о трех землетрясениях с

магнитудами 6.2-6.1, произошедших в 995, 1187 и 1853 годах. На сегменте PSSF2 выявлено одно очень сильное землетрясение 1139 года, с магнитудой по разным оценкам от 7.5 до 7.7. Палеосейсмологические исследования показывают наличие 9 сильнейших землетрясений с магнитудами 7.3-7.5 на сегментах PSSF-1 и PSSF-3 (Philip et al., 2001, Avagyan, 2001, Davtyan, 2007). С сегментом PSSF-3 связаны также многочисленные голоценовые, и в том числе исторические извержения вулканов (Karakhanyan et al., 1997, Karakhanyan et al., 2002).

Таким образом, PSSF представляет собой наиболее крупный разлом в Республике Армения и на Малом Кавказе, второй сегмент которого совпадает с географическим местоположением офиолитовой сутуры верхнемелового возраста. PSSF хорошо прослеживается на всем своем протяжении многочисленными молодыми деформациями рельефа и характеризуется, в основном, правосдвиговой кинематикой с переменной вертикальной составляющей; наклон плоскости разлома субвертикальный или крутой с падением на СВ и демонстрирует отчетливый геликоидальный характер.

Сильные исторические землетрясения на PSSF происходили в 915 г с $M \sim 6.0$, 1407 г. с $M \sim 7.0$, в 1187 и 1853 гг с $M \sim 6.0$ (Караханян, 2004; Shebalin et al., 1997). Самое крупное историческое землетрясение на PSSF произошло на сегменте PSSF 4 в 1139 г с $M \sim 7.5-7.7$; оно сопровождалось гигантскими оползнями, большими разрушениями и человеческими жертвами (Nikonov, 1986).

1.4. Проведенные ранее исследования феномена разжижения грунта на территории Армении

1.4.1. Опасные эффекты, возникающие при разжижение грунта

Сейсмогеотектонисты неоднократно отмечали явления, связанные с разжижением грунта при сильных землетрясениях (Youd 1973, Yeats 1997). Этим явлениям отводится важная роль природных феноменов, являющихся индикаторами сейсмических сотрясений определенной интенсивности в шкале INQUA EEE (Earthquake environmental effects) (Michetti et al., 2004).

Грунты (прежде всего, пески или суглинки) состоят из мелких и мельчайших (до сотых и тысячных долей миллиметра) минеральных частиц, в порах между которыми находятся грунтовые воды. При прохождении упругой волны возбуждаются колебания частиц водонасыщенного грунта с разными скоростями и часть контактов между частицами грунта разрывается тем больше, чем выше энергия волны (рис. 1.6).

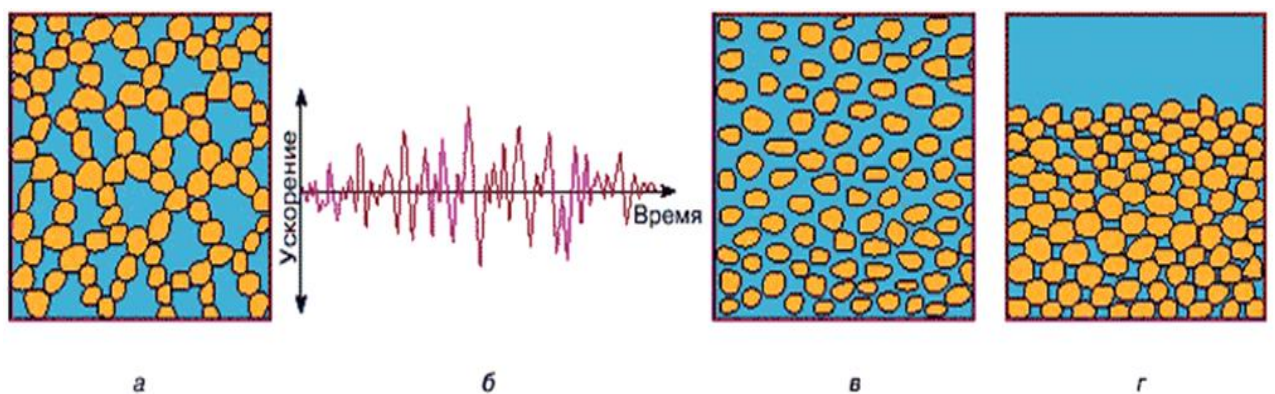


Рис. 1.6. Разжижение грунта (ликвифекшн). Схема.

а - рыхлый водонасыщенный песок с крупными порами до землетрясения; б - сейсмический толчок - характерная запись изменения ускорения колебаний во времени; в - момент разжижения - связи между частицами грунта разорваны, и они оказываются взвешенными в воде; г - уплотненный песок после отжатия воды и оседания частиц.

В результате прочность грунта заметно (иногда в несколько раз) снижается, а стоящее на нем сооружение может осесть вглубь, перекошиться или опрокинуться. Грунтовые воды при этом стремятся просочиться обратно в грунт, но процесс этот требует некоторого времени, поскольку ограничивается водопроницаемостью грунта. В результате сейсмическое разжижение грунтов обычно сопровождается сильными повреждениями даже сейсмостойких сооружений: здания успевают «утонуть» или перекошиться, дороги разрываются на поверхности разжиженных отложений, а подземные емкости с горючим, наоборот, всплывают на поверхность, затопленную водой (Youd 1973, Yeats 1997).

Для разжижения грунта требуется сочетание трех факторов:

1. Рыхлые, окатанные (до агрегатного состояния от 0,01 до 2,5 мм) осадки – озерные или речные отложения в виде гальки, песчаные слои.

2. Песчаный слой должен быть водонасыщенным (вода заполняет промежутки между песком и зернами ила). Грунтовые воды, близость к различным водоёмам, весенние паводки могут являться причиной водонасыщенности песчаных отложений. Например, во многих районах залива Сан-Франциско грунтовые воды наиболее близки к поверхности (насыщая более молодые осадки) зимой / весной, вовремя и после «дождливого сезона». Ярким примером может служить Рурмондское землетрясение 13 апреля 1992 г. на востоке Нидерландов (Trifonov et al., 1994). При сравнительно небольшой магнитуде ($M_s = 5.7$) оно вызвало многочисленные проявления разжижения грунта со значительными разрушительными последствиями. Этому способствовала высокая водонасыщенность грунтов, усиленная сезонным увлажнением.

3. Должно произойти сильное сотрясение, источником которого зачастую является землетрясение (McCalpin, 1996). Многочисленные свидетельства, полученные в разных странах, указывают на то, что явления, связанные с разжижением грунта, происходят, за редкими исключениями, при землетрясениях с магнитудами не менее $M = 5,5-6$ (Ambraseys, 1988).

Наиболее распространённые и опасные явления при разжижении грунта таковы (рис. 1.11):

1. Потеря несущей силы – при этом земля может разжижаться и терять способность поддерживать конструкции (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Разжижение грунта или ликвифекшн.

2. Песчаные кратеры - вода с песком выбрасывается из расположенного глубже сжиженного слоя и извергается на поверхность с образованием песчаных вулканов. Окружающий грунт часто разрушается и оседает (рис. 1.8). Нередко в «кратерах» остаются обломки слоев, деформированных разжижением грунта. Это является веским доводом при идентификации данного феномена.

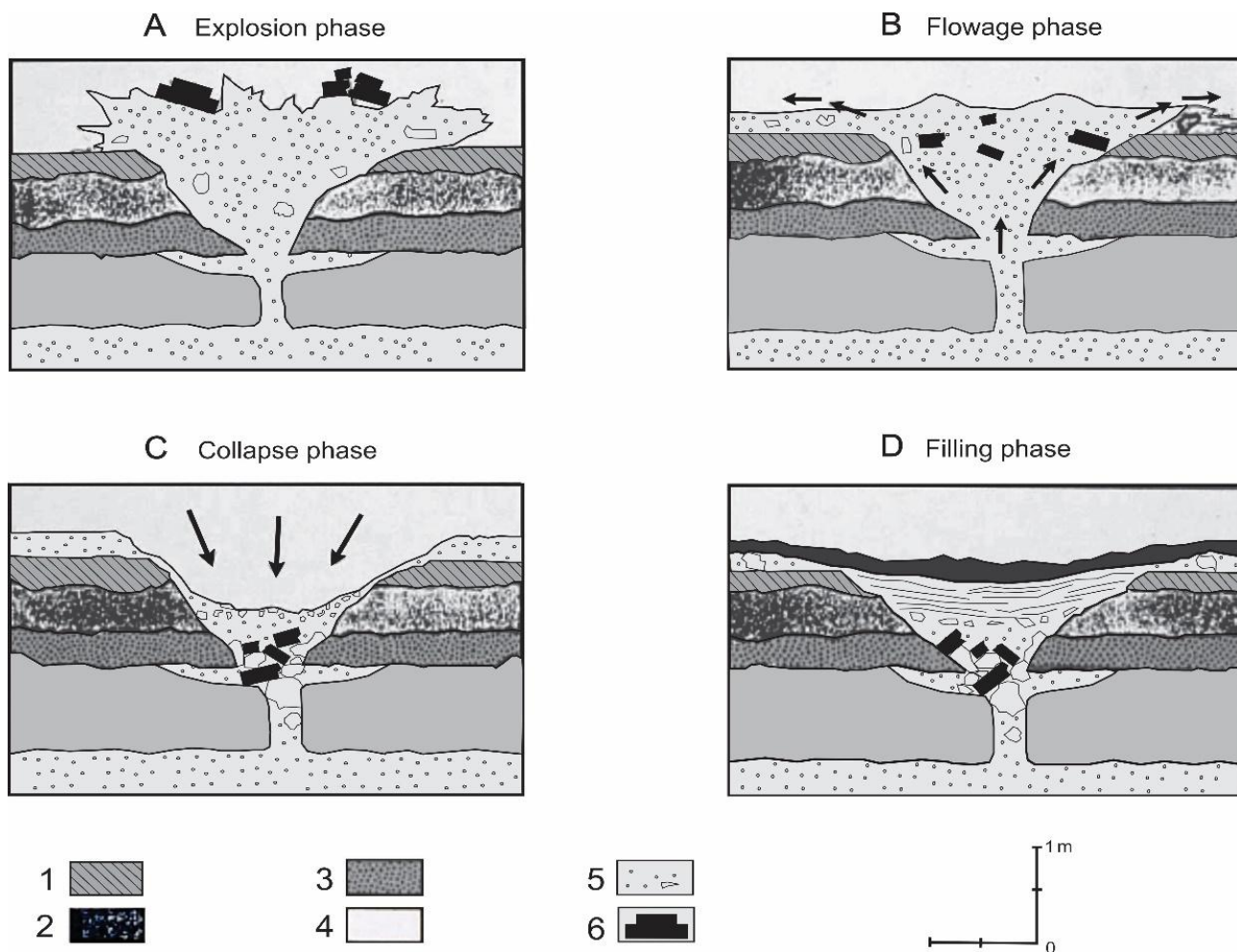


Рис. 1.8. Схематический рисунок образования песчаных кратеров во время землетрясения: А – фаза взрыва, В – фаза излияния, С – фаза обрушения, D – фаза заполнения

3. Горизонтальное перемещение (spreading) грунта. При этом поверхностный слой, двигаясь на погруженном разжиженном слое, отбрасывается назад и вперед при встряхивании и может быть сильно деформирован и поделён на блоки. Блоки могут отдаляться и приближаться к друг другу. Из-за деформации поверхностный слой может скользить вниз по пологим склонам (рис. 1.9).

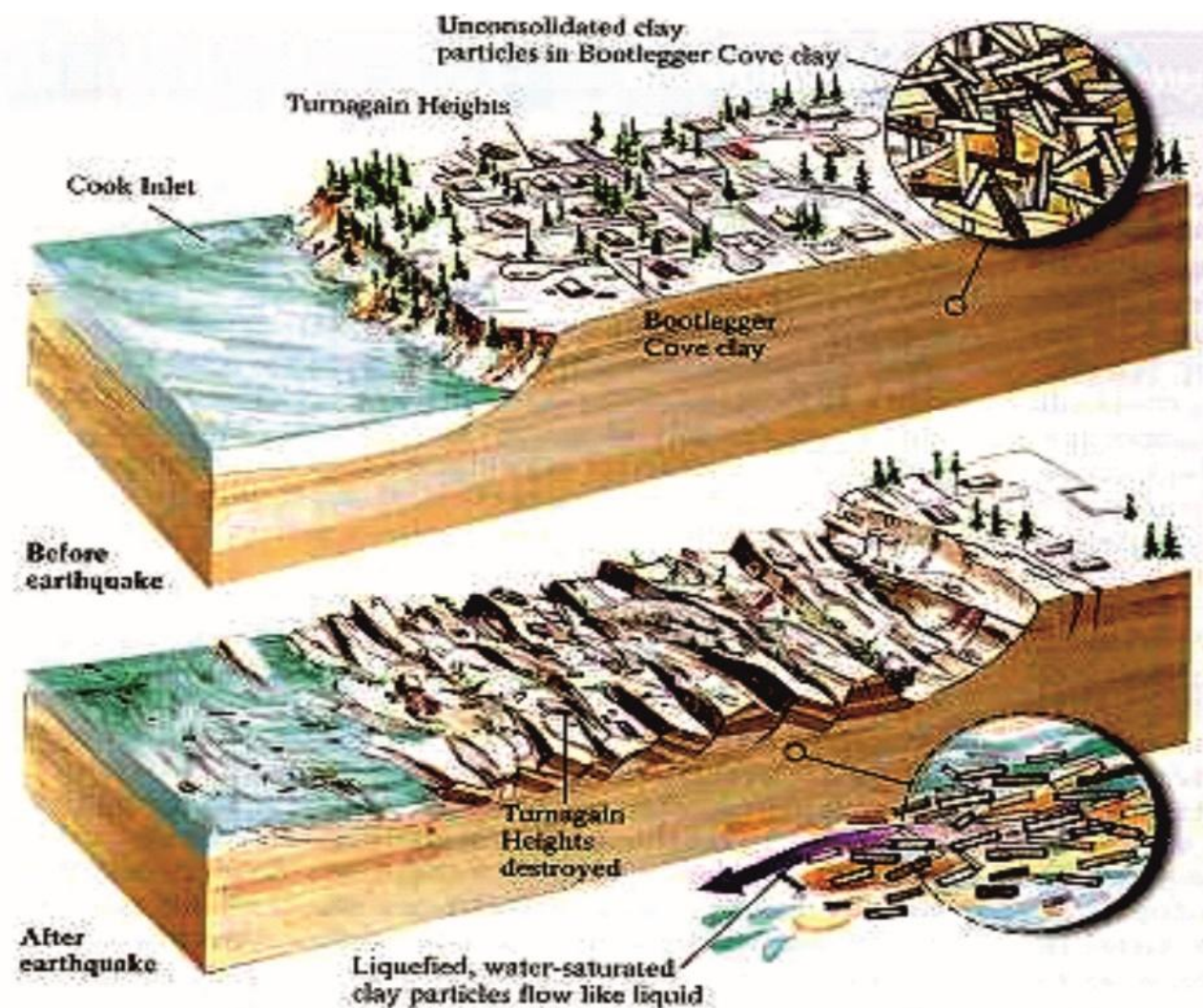


Рис. 1.9. Схематический рисунок до и после землетрясения и горизонтального спрединга грунта при разжижении грунта.

Феномен горизонтального перемещения (spreading) грунта является одним из самых опасных эффектов разжижения грунтов, поскольку он может разрушить даже сейсмостойкие строения.

4. Также во время землетрясений могут образоваться «сейсмиты». Этот термин используется для структур, сформированных в рыхлых песчаных осадках вследствие сейсмических толчков (рис. 1.10).

Данные об исторических землетрясениях со всего мира позволяют утверждать, что феномен разжижения грунта в редких случаях происходит при землетрясении с

магнитудой $M=5$, но нижней границей возникновения данного вторичного эффекта считается магнитуда $M= 5,5-6$ (Ambraseys, 1988).



Рис. 1.10. Сейсмиды бассейна озера Севан (Корженков и др., 2014)

Полевые критерии для определения феномена разжижения грунта:

Местонахождение исследуемых деформаций в сейсмически-активных областях - Армения является территорией с известными сильными современными и историческими землетрясениями. Спитакское землетрясение 1988 года является ярким примером активности разломов на территории Армении. Различные исследования доказали возможность возникновения землетрясений $M > 6.0$, которые могут являться катализаторами возникновения феномена разжижения грунта.

Подходящий состав осадков — слабоконсолидированные, метастабильные пески с низким сцеплением. В связи с такими качествами и избытком порового давления в водонасыщенных условиях, а также состоянием обратной плотности, достаточной, чтобы вызвать гравитационную нестабильность, при землетрясениях осадки могут потерять сцепление и прийти в разжиженное состояние. Осадки,

насыщенные глинистыми частицами, обычно не подвержены разжижению, в связи с их связностью. Плохо сортированные грубозернистые осадки — менее водопроницаемые и более прочные.

Сходство структур, образованных экспериментально, со структурами, образованными сейсмическими сотрясениями. Типы деформаций должны быть хорошо сопоставимы как с деформациями в рыхлых осадках, описанными в геологических публикациях как «разжижение грунта» (Yeats et al., 1997; Youd, 1973), так и с теми, которые были получены экспериментально.

Локальное изобилие деформаций, вызванных внедрением песочного слоя в верхние слои. Большое количество и распространение должно соответствовать ожидаемому эффекту такого сейсмического события, как феномен разжижения грунта.

Явления, связанные с разжижением грунтов при сильных землетрясениях в Армении, важны в двух аспектах. Во-первых, они позволяют определить или более достоверно оценить параметры землетрясений прошлого – интенсивность сотрясений, положение эпицентра и, косвенным образом, магнитуду, и, тем самым, уточнить сейсмический потенциал отдельных активных разломов и сейсмических зон. Во-вторых, разрушения и пагубные для населения последствия разжижения грунтов, вызванные землетрясением и являющиеся его вторичным эффектом, усиливают воздействие собственно сейсмических сотрясений на население и инженерные сооружения и должны учитываться при оценке сейсмического риска.

Liquefaction and its Effects

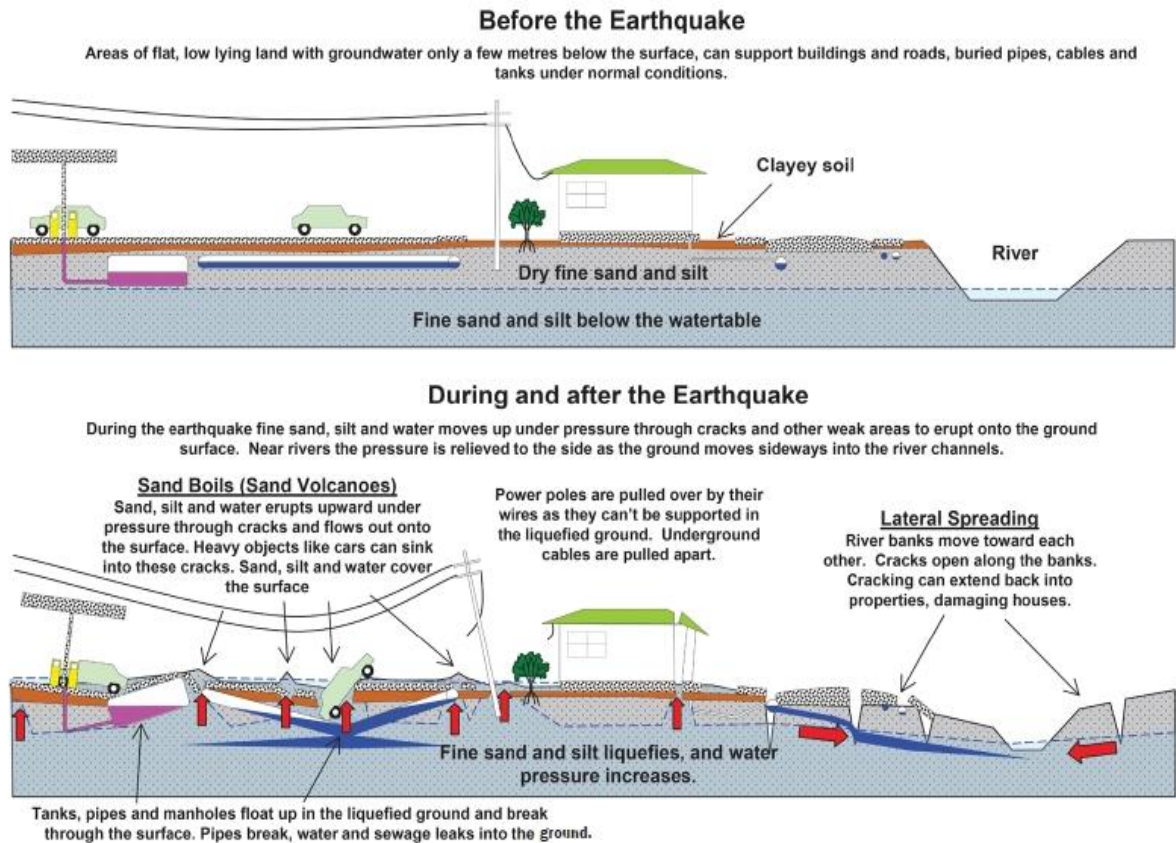


Рис. 1.11. Эффекты при феномене разжижения грунта. Вовремя и после землетрясения.

1.4.2. Исследования, проведенные на территории Республики Армения

На территории Армении феномен разжижения грунта на территории Армении оставался неизученным вплоть до последних десятилетий. Первое свидетельство о данном феномене было найдено в письме майора Воскобойникова генералу Головину от 25 ноября 1840 года, после Араратского землетрясения 1840 года (Степанян, 1964). Майор Воскобойников писал, что им были зафиксированы фонтаны песка в полтора метра высотой из раскрывающихся трещин шириной до 3-4 метров и длиной 45-50 вдоль русла реки Аракс после Араратского землетрясения 1840 года ($M=7.4$). Энергия выброса песка из трещин и образования кратеров разжижения песка (sand blow) была настолько высока, что в селе Кара-хасанлу (ныне Нахичеван) у многих

домов, внутри которых образовались кратеры разжижения песка, были полностью уничтожены крыши. Образовавшиеся вдоль русла Аракса трещины до 45 метров длиной еще извергали воду и песок спустя 2 месяца и, практически, представляли собой зоны горизонтального спрединга. Консорциум NORATOM в рамках проекта по оценке сейсмической опасности для площадки нового энергоблока Армянской АЭС (2010-2011) подтвердил наличие разжижения грунта (Karakhanyan et al., 2011).

Во время полевых исследований 2002 года группой Чарлза Коннора из Университета Южной Флориды были найдены предполагаемые свидетельства разжижения грунта, однако эти данные не были проанализированы и опубликованы.

В 2014 г. группа А. М. Корженкова на участке бассейна озера Севан провела работы с целью выявления, описания и датирования деформационных структур в осадках и оценки их значения как индикаторов палеосейсмичности (Корженков и др., 2014). Были обнаружены и задокументированы сейсмиды (термин использован согласно Seilacher., 1969) в слоях мелководно-озерного, пляжного и флювиального генезиса (рис. 1.9).

А. Авагян и его группа продолжили изучение сейсмидов бассейна озера Севан (Ավագյան, 2017). В указанной статье приводится анализ данных Е. Е. Милановского относительно «диапировых складок» (Милановский, 1953)

Использование новых методик позволяющие пополнить каталог землетрясений, существенно повышают качество оценки сейсмического риска. Феномен разжижения грунта, как маркер палеосейсмичности, является очень интересным и важным объектом для будущих исследований. Большой объем работ, проделанный иностранными коллегами по данному явлению, дает возможность не только выявить и задокументировать новое сейсмическое событие, но и в полевых условиях оценить его предположительную интенсивность. Дополнительные палеосейсмологические исследования позволяют уточнить датировку события.

ГЛАВА 2. ФЕНОМЕН РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА В РАЙОНЕ САРДАРАПАТСКОЙ СТРУКТУРЫ

2.1. Исследуемый участок: Сардарapatская структура

2.1.1. Общие сведения о Сардарapatской структуре

В разное время были выдвинуты множество предположений о происхождении и активности Сардарapatской структуры (Габриелян 1959,1981; Асланян 1958, Караханян и др., 2004). Для оценки сейсмической опасности участка ААЭС были созданы разные сейсмические модели. В первый раз упоминание о Сардарapatской структуре, как о возможном активном разломе, встречается в сеймотектонической модели, разработанной компанией «Геориск» (Караханян и др., 2004). Модель SM-Georisk является развитием модели SM-1995 с использованием новых данных полевых наблюдений, палеосейсмологических исследований, анализа новых исторических и археологических наблюдений и GPS мониторинга.

Сардарapatская структура в модели SM-Georisk получила потенциал $M=6.6$ (Табл 1.1).

В результате геологических и геофизических исследований, проведенных в 2009 году, были выдвинуты три гипотезы происхождения Сардарapatского вала (Karakhanyan et al., 2011):

- Тектоническое происхождение – погребенный древний разлом.
- Неотектоническое происхождение – активный разлом.
- Вулканическое происхождение - трещинное излияние или долинный лавовый поток.

Тектоническое происхождение – погребенный древний разлом.

Основным аргументом в пользу того, что Сардарapatская структура представляет собой крупный разлом, является наблюдение, согласно которому отложения глин на ее северном борту расположены на 8м выше самих базальтов и отложений на южном крыле. Вдоль всего северного борта Сардарapatской структуры

отложения глин, суглинков и покрывающей их речных наносов расположены на 10-20 метров выше, чем на южном борту. Действительно, подобную картину возможно интерпретировать как подъем северного борта вследствие вертикальных смещений по разлому на глубине, или вследствие образования флексуры над разломом.

Однако возможна и другая интерпретация разницы в высоте над уровнем моря отложений глин и речных наносов на северном и южном бортах Сардарapatской структуры. Согласно археологическим данным (Мартirosян, 1974; Тирацян, 1988) и историческим источникам в V-I веках до Р.Х. река Аракс протекала по южному подножию Сардарapatского вала. Во время весенних и осенних паводков река Аракс разливается и демонстрирует сильную эрозию берегов и русла.

Таким образом, разницу в высоте над уровнем моря отложений на южном и северном бортах Сардарapatской структуры возможно объяснить эрозией отложений южного борта рекой Аракс (Seismic, 2011 b).

Кроме того, более высокое расположение осадков на северном борту Сардарapatской структуры может дополнительно объясняться следующим обстоятельством. К северу от Сардарapatского вала расположено русло реки Селав-Мастара. Эта река известна огромным объемом селевых потоков, которые она выносит в Араратскую долину. Поперек ее конуса выноса расположен Сардарapatский вал, создающий барьер на пути транспорта селевого материала, накапливающегося на северном борту вала. Приподнятое положение осадков на северном борту Сардарapatского вала не распространяется на восток за пределы окончания валообразного поднятия базальтов. Если бы поднятие глин на северном крыле было вызвано движением по разлому, то поднятие должно было бы продолжаться далее на восток, за пределы базальтовой части вала, если же его там нет, то наиболее вероятным становится эрозионное происхождение разницы в высоте над уровнем моря отложений по обе стороны от Сардарapatской структуры (Seismic, 2011 b).

Гравиметрические данные, полученные в 2009 году, дают веские основания предполагать отсутствие крупных нарушений сплошности, связанных с Сардарapatским хребтом. Детальные магнитометрические карты не дают

свидетельств в пользу присутствия неглубокого разлома под Сардарapatским хребтом. Данные МТ и ТЕМ зондирования также не подтверждают наличие крупной системы разломов под Сардарapatским валом.

На гравиметрической карте масштаба 1:200,000 и 1:50,000 также не имеется аномалий, указывающих на разлом в районе Сардарapatской структуры.

Таким образом, за исключением морфоструктурной выраженности в виде линейного вала, нет никаких признаков, которые возможно было бы уверенно интерпретировать как свидетельство тектонической природы Сардарapatской структуры или наличия под ней погребенного разлома (Seismic, 2011 b).

Тектоническое происхождение – активный разлом.

Основным аргументом в пользу того, что Сардарapatская структура может быть активным разломом, является интерпретация миграции русел реки Аракс и наличие отложений реки Аракс на поверхности самого вала.

На космических снимках хорошо заметны многочисленные меандры старых русел реки Аракс (рис. 2.2). Река Аракс в древности протекала у подножия холма Давтаблур, на котором располагалась столица Армянского царства – Армавир (Cugille Toumanoff, 1963, Тирацян Г.А. 1978). По данным армянского летописца Мовсеса Хоренаци в 200 – 220 годах до Р.Х. река Аракс удалилась от города, и вследствие отсутствия воды для города и царского двора столица была перенесена в другое место (Seismic, 2011, Караханян и др., 2018).



Рис. 2.2 Миграция реки Аракс с V-I веков BC по настоящее время отмечено стрелкой.

В работе А. Караханяна (Караханян и др., 2004) миграция реки Аракс к югу на 12 км и регулярные изгибы ее меандр интерпретировались как свидетельство тектонической активности Сардарпатской структуры. Другим свидетельством тектонической активности считалось наличие отложений реки Аракс на вершинной части Сардарпатского вала на высоте 20-30 м над окружающей аллювиальной равниной, что позволяло предположить, что отложения были подняты в свое нынешнее положение в результате активности разлома и вертикальных смещений по нему.

Исследования 2009 года позволяют предположить другую, альтернативную тектонической, модель миграций русел Аракса и нахождения речных отложений на вершине вала. Перед входом в Араратскую долину Аракс на протяжении 60 км течет по крупному каньону в районе города Кагызман (Турция). Глубина каньона достигает 700-900м, а ширина нескольких километров. Лавовый поток с вулкана Арагац перекрыл место, где каньон соединялся раньше с Араратской долиной, оставив лишь узкий и глубокий проток, по которому Аракс вырывается на просторную и плоскую Араратскую долину. Абсолютная высота русла узкого протока Аракса у места его выхода в Араратскую долину составляет 942 м, а каньона у города Кагызман – 1300м. Подобная морфология приводит к тому, что, вырываясь из узкой протоки на

широкую плоскую аллювиальную долину, река Аракс начинают блуждать, образуя многочисленные русла, старицы и меандры. Таким образом, миграция русел Аракса к югу может быть связана исключительно с морфологией Араратской долины, а не с тектонической активностью Сардарapatской структуры (Seismic, 2011 b).

Нахождение отложений Аракса на вершине Сардарapatского вала может объясняться возможностью катастрофических наводнений при прорыве запруд в Кагызманском каньоне. Лавовый поток с вершины Арагаца, запрудив вход в Араратскую долину, должен был вызвать накопление огромных объемов воды в Кагызманском каньоне. Прорыв лавовой запруды вызвал бы сильнейшее наводнение в Араратской долине и вынес бы в нее огромное количество речного песка и гальки, которые могли покрыть и вершину Сардарapatского вала или даже полностью перекрыть вал. Последующая эрозия могла удалить речные отложения, обнажив подножие Сардарapatского вала и оставив часть речных отложений на его вершине.

Исследования восточного фланга Сардарapatского вала создавали впечатление, что древний ирригационный канал поднят на высоту 25 м от уровня древнего русла реки Аракс (Караханян и др. 2004). Это обстоятельство было интерпретировано как смещение по Сардарapatскому разлому, а анализы органики позволили оценить скорость вертикального смещения 0.74 мм/год.

Анализ старых данных и новые исследования 2009 года не дают свидетельств в пользу того, что Сардарapatская структура может быть активным разломом (Seismic, 2011 b).

Вулканическое происхождение - трещинное излияние или долинный лавовый поток.

Одна из возможных моделей Сардарapatского вала предполагает, что он имеет вулканическое происхождение. Вал состоит из лавовых потоков. Лавовые потоки на вале представлены базальтовыми трахиандезитами с сильно кристаллической текстурой, что указывает на высокий уровень вязкости и на маловероятность того, что они вытекли на большое расстояние из жерла своего источника. Эти особенности, плюс тот факт, что хребет расположен в непосредственной близости к

другим вулканам (н-р, конус Гряко, конус Аракс и др.) поддерживают идею о вулканическом происхождении хребта. Другие же особенности хребта необычны для объекта вулканического происхождения. Хребет узкий, имеет выраженную существенную рельефность, а кристаллические лавы выходят на поверхность почти вдоль всей его протяженности. И тем не менее вдоль хребта нет свидетельств жерл кратеров, куполов, что могло бы обосновать происхождение трещинного вида (Seismic, 2011 b).

С другой стороны, на 1-1.5 км к северу от Сардарapatской структуры тянется линейный ряд из пяти шлаковых конусов. Этот линейный ряд согласуется с примерно В–З ориентацией выстроенных в ряд жерл на шлаковых конусах Гряко и Аракс. На этой территории другие шлаковые конусы не обнажаются. Однако на расстоянии 1.2 км к юго-западу имеется еще один линейно вытянутый выход базальтовых трахиандезитов - точно таких, какими сложен Сардарapatский вал. Этот выход длиной в 7 км при средней ширине 500-800м очень похож на Сардарapatскую структуру и расположен по отношению к последней с небольшим южным уклоном. Выход базальтовых трахиандезитов, также, как и в Сардарапате, представлен валообразным поднятием, но с меньшей вертикальной амплитудой – 7-15м.

Вторая возможность заключается в том, что хребет сформирован русловым лавовым потоком. Согласно такому сценарию лавовый поток двигался по руслу реки, прорезавшему аллювий. Лава заполнила канал, и река изменила течение и создала другое русло поблизости. Со временем осадочные отложения, окружающие лавовый поток, полностью эродировали, создав топографию, обратную исходной и оставив высоко стоять лавовый хребет. Однако, это предположение все равно нуждается в наличии жерла, которое выявлено не было. Кроме того, неясно, почему хребет, а, следовательно, и русло, должны были быть прямыми, в то время как современная река Аракс демонстрирует нормальные меандры.

Таким образом, у всех трех моделей происхождения Сардарapatской структуры имеются слабые стороны, которые не позволяют однозначно решить вопрос ее генезиса. Оценивая модели тектонического происхождения Сардарapatского вала, необходимо отметить, что все геофизические данные не поддерживают эту модель.

Наличие двух линейно-вытянутых выходов базальтовых трахиандезитов, одного вдоль Сардарapatского вала и еще одного юго-западнее него, и линейные ряды вулканов вдоль них позволяют предположить, что их местонахождение и распределение структурно взаимосвязаны. Оба выхода базальтовых трахиандезитов образуют два сегмента валообразных линейных поднятий с параллельно расположенными вулканами с небольшим левым уклоном. Возможно, что это единая система, образовавшаяся над трещинами вследствие вулcano-тектонического взаимодействия. Возраст базальтовых трахиандезитов на Сардарapatском хребте определен в 0.92-0.99Ma по K-Ar датировкам (Чернышев и др. 2002). Следовательно, вулcano-тектоническая структура будет иметь близкий к этому возраст активности.

Чтобы определить, какое из трех вышеуказанных предположений следует принять при создании сейсмoтектонической модели, в 2010 году были проведены дополнительные исследования. Изотопный анализ возраста базальтов, слагающих Сардарapatскую структуру, методом K-Ar и Ar-Ar показал, что излияния лав происходили между 0.9 и 1.32 Ma (Чернышев и др., 2002, Karakhanyan et al., 2011, Chuck Connor et al., 2011, Laura Connor et al., 2012). На основе данных буровых скважин были построены геологические профили, пять из которых пересекают Сардарapatскую структуру. Были дополнительно собраны данные геофизических и геологических исследований, выполненных в прошлые годы. Все данные исследований 2009-2010 годов и прошлых лет введены в базу данных ГИС. Кроме того, с помощью программы ArcGlobe и ArcScene была построена 3D ГИС модель Аратской депрессии (рис 2.1).

Созданная база данных ГИС позволила провести перекрестный анализ и интерпретацию и еще раз оценить сделанные ранее предположения о происхождении и активности Сардарapatской структуры (Karakhanyan et al., 2011, Караханян и др.,

2018).

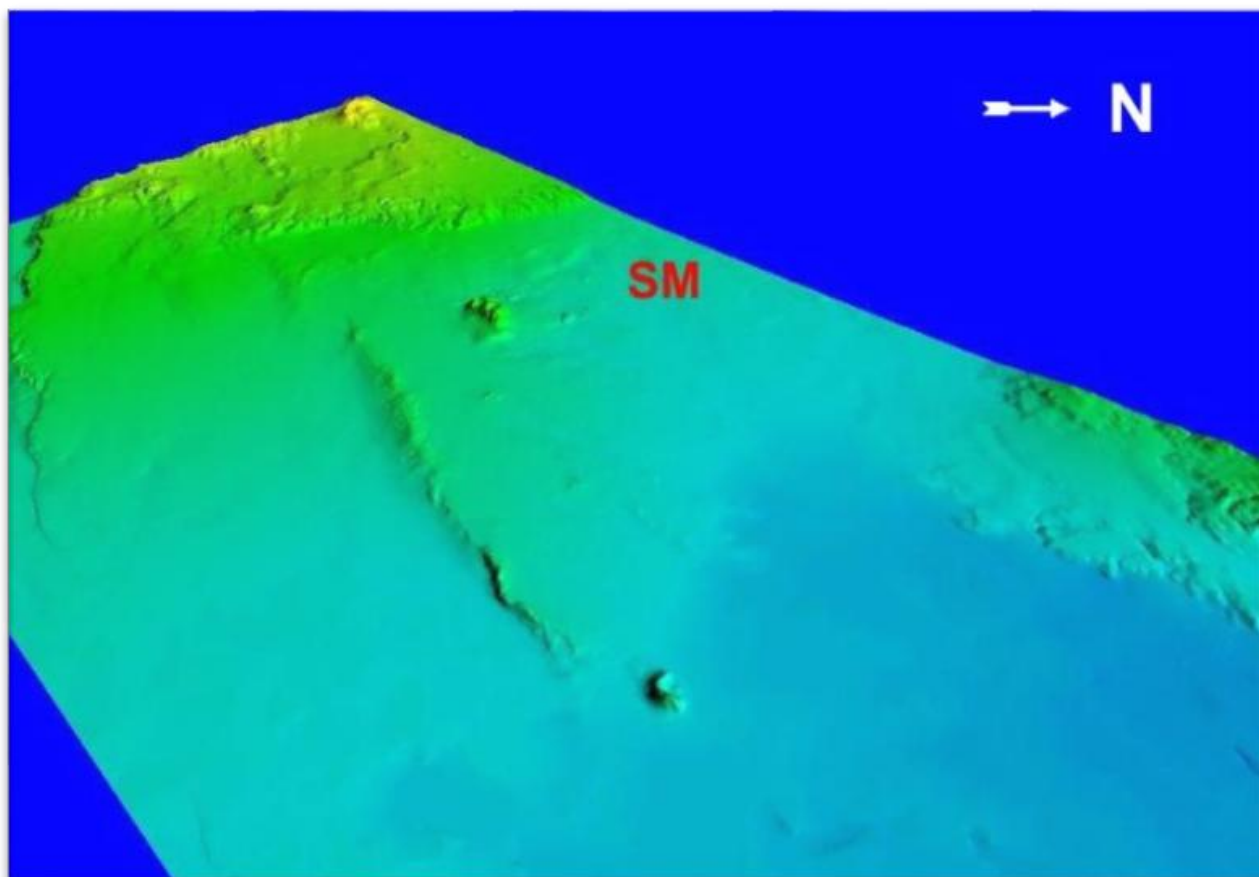


Рис. 2.1. 3D модель Сардарapatской структуры в программе ArcScene

В результате анализа данных 2009-2010 годов был сделан вывод, что у всех трех предполагаемых моделей происхождения Сардарapatской структуры имеются слабые стороны, которые не позволяют однозначно решить вопрос ее генезиса. Оценивая модели происхождения Сардарapatского вала, необходимо отметить, что по геофизическим данным предпочтения нельзя отдать ни одной из моделей.

Исходя из вышеизложенного, сделано предложение учесть Сардарapatскую вулcano-тектоническую структуру при разработке сейсмотектонической модели Армении и рассмотреть ее как линейную сейсмогенную зону, однако присвоить Сардарapatской структуре низкий ранг достоверности. Оценить длину этой вулcano-тектонической структуры довольно трудно, поскольку часть вулканических аппаратов и выходов базальтов могла быть скрыта под аллювием Араратской долины или под другими лавами. Поэтому, исходя из принципа консерватизма, длина

Сардарпатской структуры была принята равной 46 км и в соответствии зависимостей, приводимых в работах (Youngs and Coppersmith, 1985) и (Wells and Coppersmith, 1994), максимальная возможная магнитуда для Сардарпатской структуры оценена в 7.0 (Караханян и др., 2018).

2.1.2. Геофизические данные (2009-2011гг.) Сардарпатской структуры

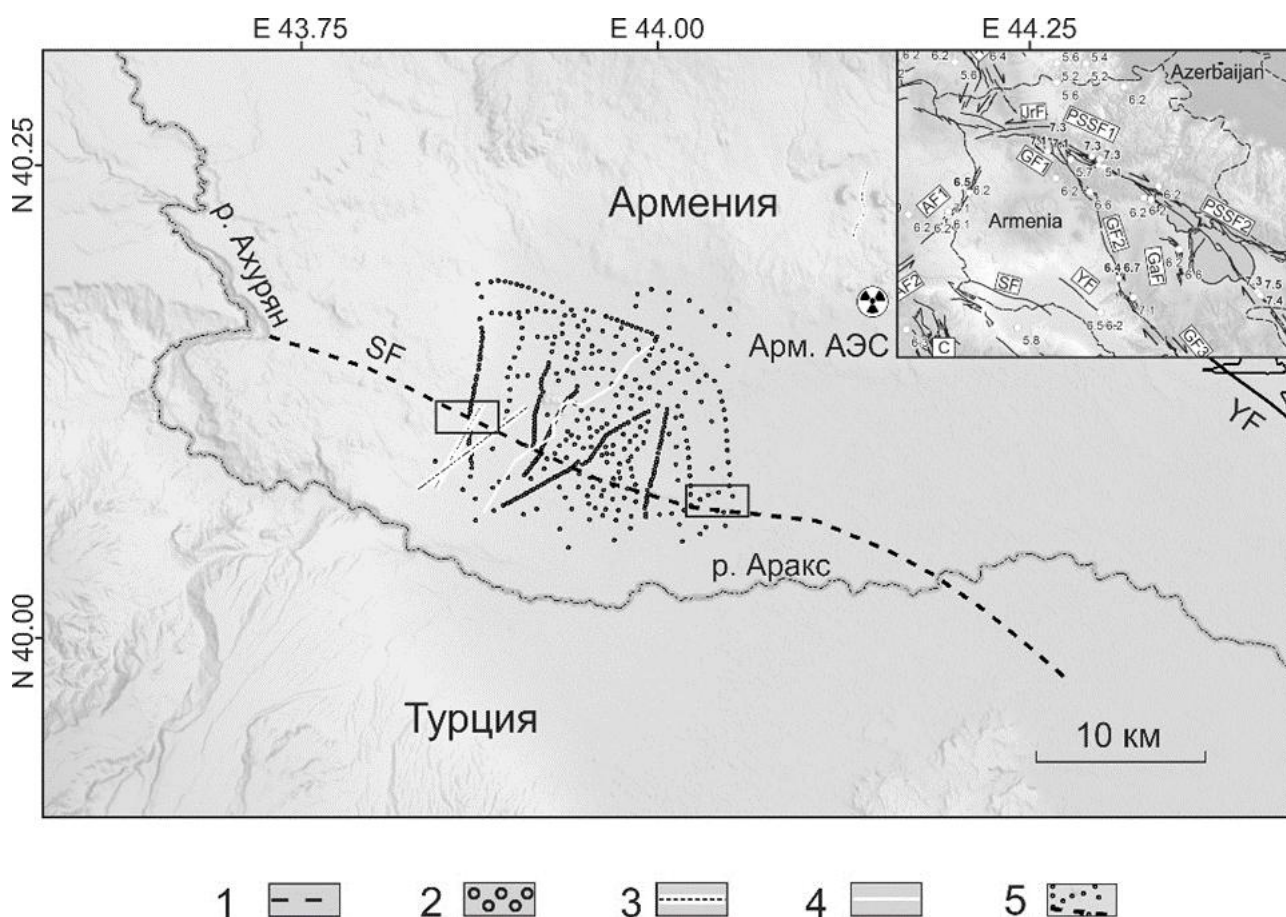


Рис. 2.3. Геофизические исследования, проведенные на Сардарпатской структуре (SF) в 2009-2010 годах. 1 - Сардарпатская структура (SF), 2 - точки детальной гравиметрической съемки, 3 – линии профилей ОГТ съемки высокого разрешения, 4 - профили магнитотеллурической съемки, 5 - участки магнитометрической съемки.

Летом 2009 года группой проф. Чарлза Коннора (Университет Флорида, США) и сотрудниками компании «Геориск» (Армения) были проведены геофизические

исследования Сардарпатской структуры. На территории площадью 206 км² была проведена площадная детальная гравиметрическая съемка со сгущением точек измерений по 5 маршрутам вкрест простиранию Сардарпатской структуры (рис. 2.3).

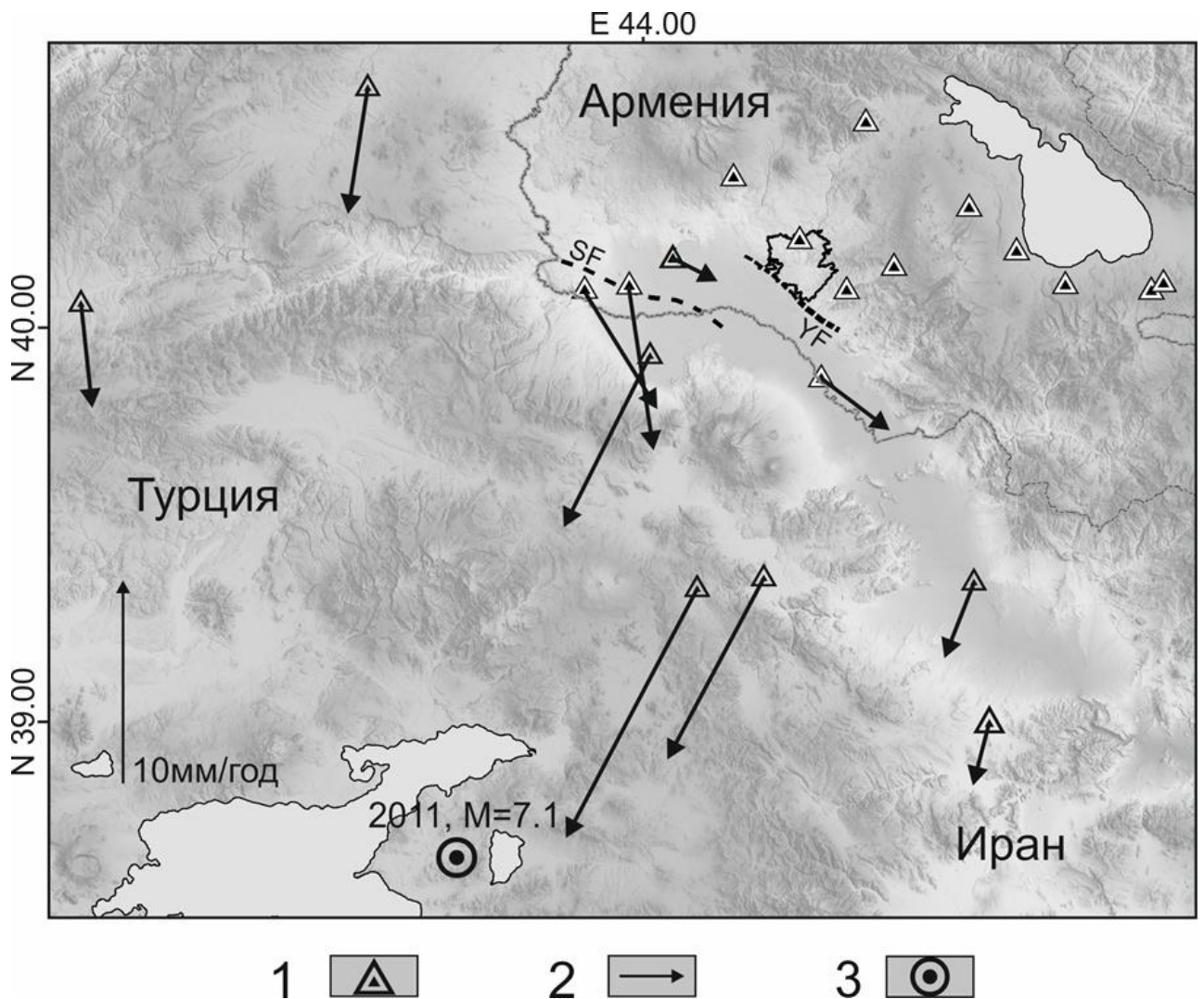


Рис. 2.4. Результаты GPS наблюдений в ноябре-декабре 2011 года. 1 - пункты GPS наблюдений, 2 - направления и скорости смещений по GPS данным, 3 - эпицентр Ванского землетрясения 2011 года (Elliott et al., 2013; Fielding et al., 2013).

Вкрест простиранию Сардарпатской структуры был пройден профиль магнитотеллурической (МТ) съемки длиной 15 км и проведено измерение нескольких профилей ТЕМ (transient electromagnetic) зондирования со сгущением в районе вулкана Гряко (рис. 2.3). На обоих флангах Сардарпатской структуры была проведена магнитометрическая съемка с использованием магнитометра G-858 Mag

Mapper Geometrics (Karakhanyan et al., 2011). В 1998 году Армяно - Американская нефтеразведочная компания провела несколько профилей сейсмических исследований методом ОГТ высокого разрешения в Араратской долине. Два профиля пересекают Сардарapatскую структуру (рис. 2.3).

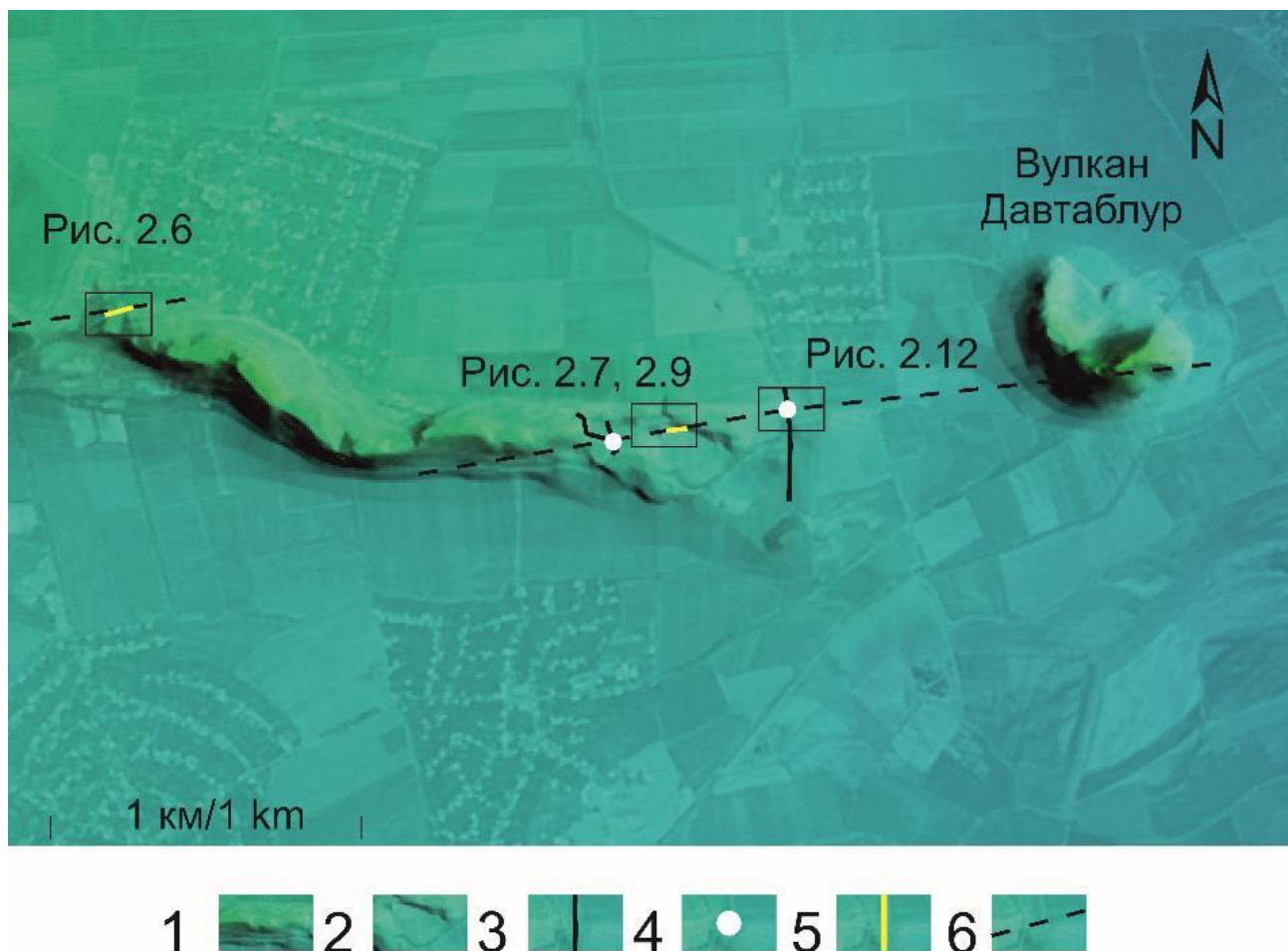


Рис. 2.5. Цифровая модель рельефа западного фланга Сардарapatской структуры с разрешением 5 м по вертикали. 1 - базальты, слагающие Сардарapatскую структуру, 2 - речные и озерные молодые отложения, перекрывающие базальты, или заполняющие депрессии в базальтах, 3 - профили георадарной съемки, 4 - аномалии, выявленные георадарной съемкой, 5 - поверхностные разрывы от сильного землетрясения, 6 - вероятная трасса активного разлома. В квадраты заключены зоны, в которых были задокументированы дайки разжижения грунта.

Новые данные о возможной тектонической активности Сардарapatской структуры получены в конце 2011 года, после катастрофического землетрясения в Ване в ноябре 2011 года ($M=7.1$) (Elliott et al., 2013; Fielding et al., 2013; Liu, Zheng et al., 2015). По просьбе наших коллег из университета Монпелье II (Франция) компания “Геориск” провела сессионные наблюдения на 4 GPS пунктах в Араратской долине. Наблюдения проводились в ноябре-декабре 2011 года одновременно на территориях Турции, Ирана и Армении, в каждой стране силами национальных команд. Анализ результатов наблюдений приведен на рис. 2.4 и свидетельствует о явной со-сейсмической (coseismic) подвижке вдоль северного и восточного фланга Сардарapatской структуры. Одновременно с со-сейсмическими подвижками в южной части Араратской долины сейсмическая сеть Института геологических наук НАН РА зафиксировала повышенную сейсмическую активность в виде роя землетрясений с магнитудой 2.0 - 3.7.

2.2. Феномен разжижения грунта на восточном и западном флангах Сардарapatской структуры

В 2009 году А. Караханян недалеко от Аргиштихинили ($40^{\circ} 937'N$ $43^{\circ} 59.397'E$) задокументировал вертикальный контакт между аллювием отложений реки палео-Аракс и озерными отложениями (рис. 2.5, 2.6). Вертикальная геометрия контакта не оставляет сомнений в том, что он является поверхностным разрывом от сильного землетрясения. Поверхностный разрыв сверху перекрыт небольшим слоем склоновых отложений. Важным обстоятельством является наличие керамики урартского возраста (VIII - VII века до РХ) в озерных отложениях, разорванных и смещенных поверхностным разрывом. Это обстоятельство позволяет установить, что период VIII-VII века до РХ является пред-датой сильного землетрясения на Сардарapatской структуре (Караханян и др., 2018).

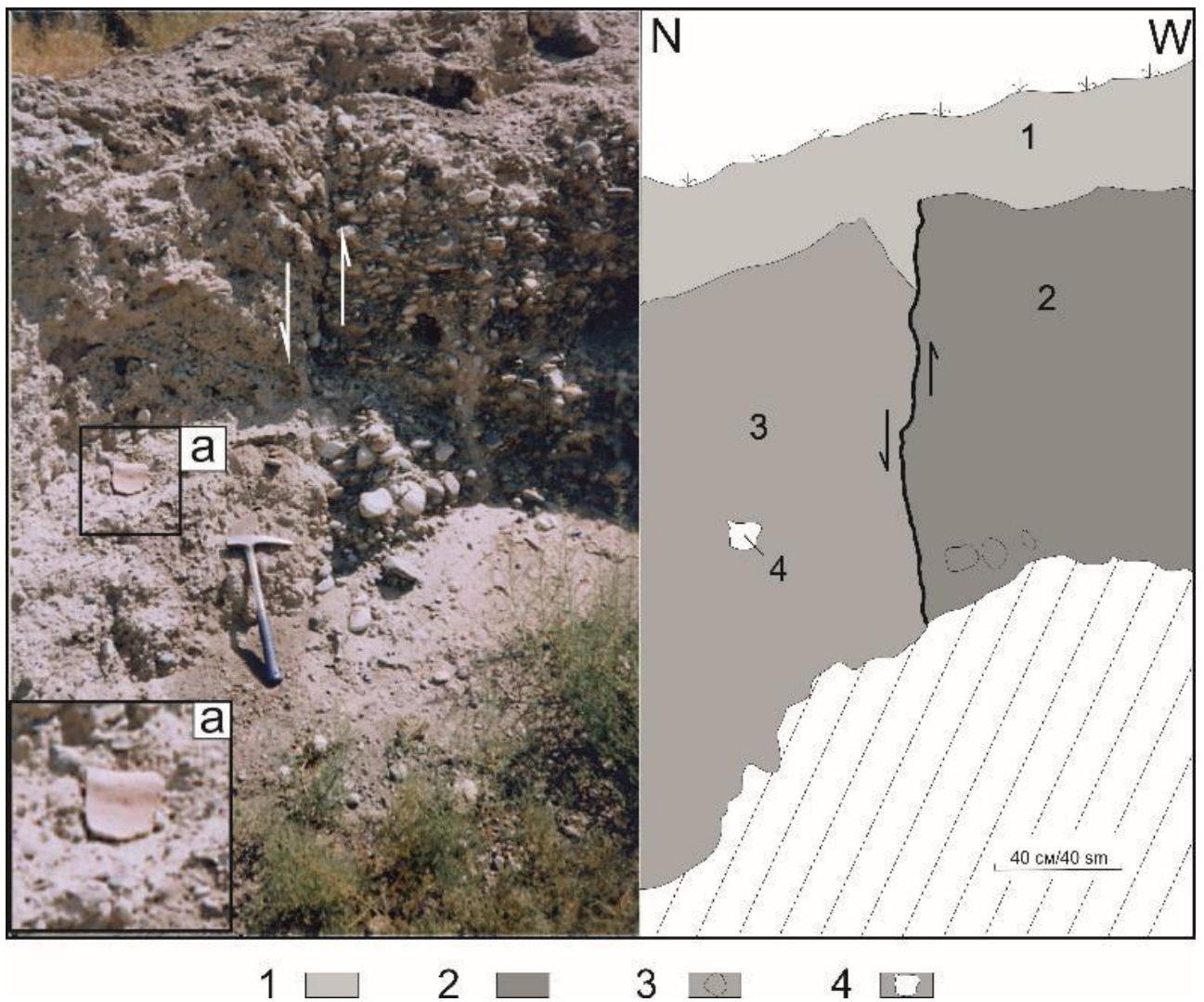


Рис. 2.6. Поверхностный разрыв от сильного землетрясения. 1 - современный склоновый коллювий, 2 - аллювиальные отложения реки Аракс, 3 - озерные отложения, 4 - обломок керамического сосуда урартского возраста.

На схематическом рисунке 2017 года (рис. 2.6) отчетливо выделяется смещение, видимая вертикальная амплитуда по которому составляет 1-1.2 м, что позволяет рассчитать ориентировочную магнитуду землетрясения по зависимости Wells and Coppersmith(1994) приблизительно в $M=6.5$. (Караханян и др., 2018)

В 2017 году автором, совместно с Караханяном А., на западном и восточном флангах Сардарapatской структуры обнаружены крупные дайки речного песка, внедренные в залегающие сверху озерные отложения (рис. 2.5, 2.7, 2.8). Подобное явление может возникнуть при сильном землетрясении вследствие разжижения

водонасыщенных песчаных отложений и их внедрения в вышележащие отложения (liquefaction of soil) (McCarlin 1996, Караханян и др., 2018).



Рис. 2.7. Дайки речного песка и гальки, внедренные в озерные отложения на западном фланге Сардарапатской структуры.

Чтобы проверить, могут ли дайки песка быть следствием разжижения грунта при сильном землетрясении, был проведен анализ их гранулометрического состава. Данные гранулометрического теста были использованы для построения графика на потенциальное разжижение грунта по методу Цучида (Tsuchida, 1971) (рис. 2.9). Цучида А., опытным путем доказал, что феномен разжижения грунта может возникнуть в грунтах с преобладанием определенных фракций. В грунтах с фракциями в диапазоне 0.01-1 мм возникновение разжижения грунта возможно, а в диапазоне 0.05-0.5 мм условия возникновения являются наиболее благоприятными.

Результат проведенного анализа показал высокую вероятность возникновения разжижения в грунте, из которого была взята проба.



Рис. 2.8. Дайки речного песка и гальки, внедренные в озерные отложения на восточном фланге Сардарapatской структуры.

Полученные значения однозначно свидетельствуют в пользу того, что на западном и восточном флангах Сардарapatской структуры развиты явления разжижения грунта, вызванного сильным землетрясением (Караханян и др., 2018). Вторичные эффекты от землетрясения возникают в случае, если магнитуда землетрясения превышает 5.5 (Michetti et al., 2004).

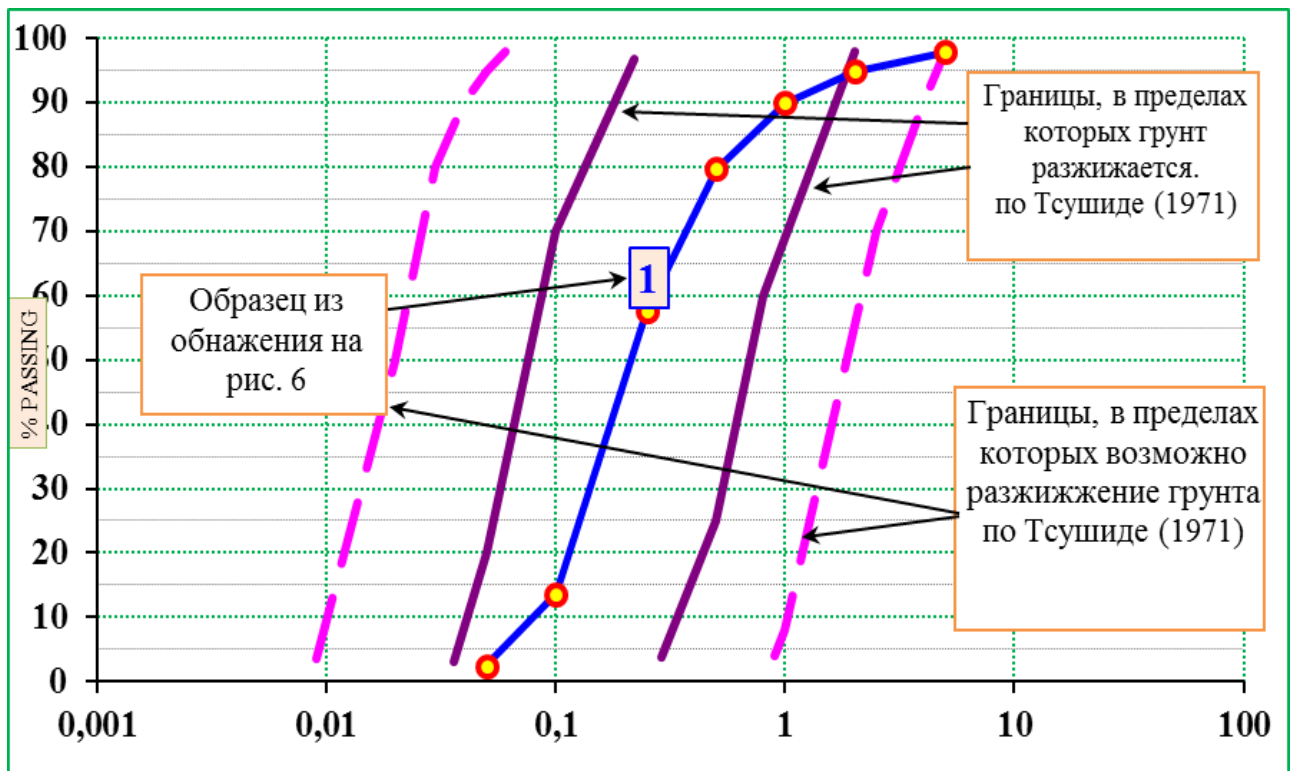


Рис. 2.9. Анализ возможности разжижения грунта из обнажения, показанного на рис. 2.7 (обозначен на графике цифрой 1), (Tsuchida, 1971).

Еще один поверхностный разрыв (взброс) был обнаружен на западном фланге Сардарapatской структуры, рядом с песчаными дайками, связанными с явлениями разжижения грунта (рис. 2.10, 2.11). Озерные отложения смещены по взбросу примерно на 1 м.

Поперек западного фланга Сардарapatской структуры в местах развития поверхностных разрывов и разжижения грунта были проведены три профиля георадарной съемки с использованием георадара SIR 3000. Георадарная съемка зафиксировала отчетливые аномалии в озерных отложениях, характерные для близповерхностных разрывных нарушений (рис. 2.5, 2.12).



Рис 2.10. Поверхностный разрыв

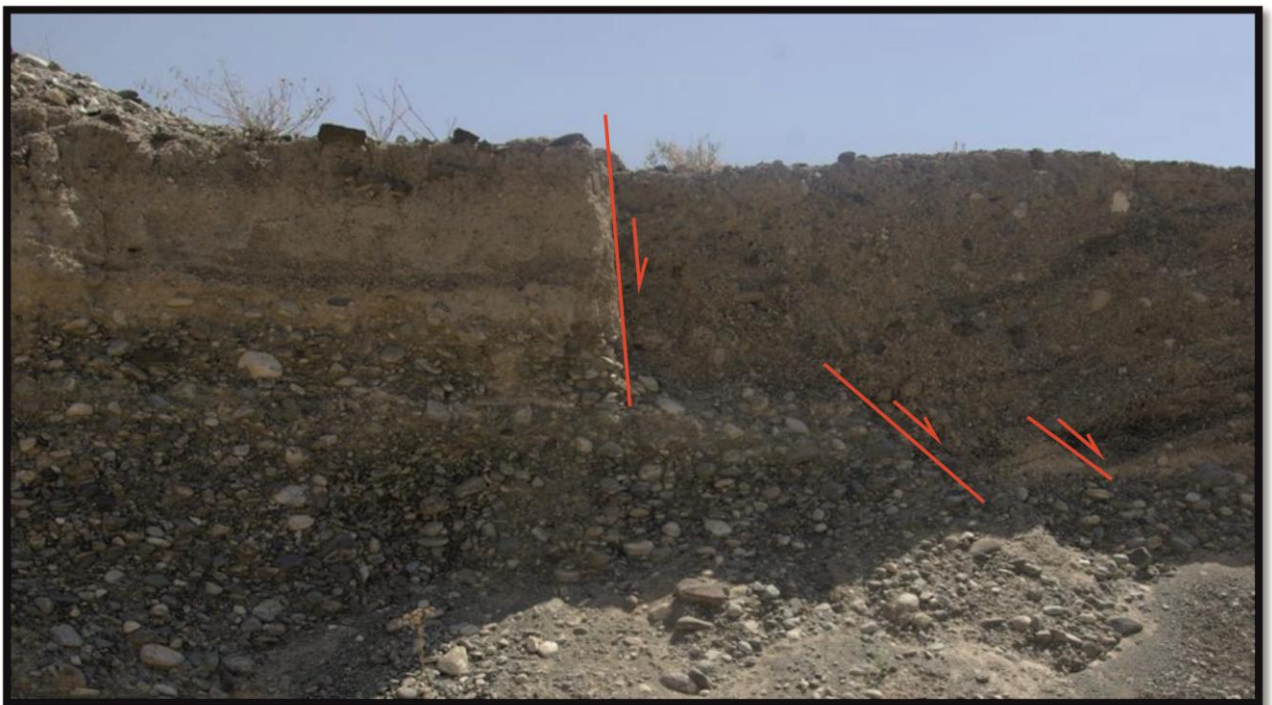


Рис 2.11. Смещение слоев. Продолжение задокументированного разрыва показано на рисунке 10.

Макросейсмические исследования, проведенные С. Баласаняном в 2017 году, показали, что храмовый и дворцовый комплекс Урартского периода на вершине

вулкана Давтаблур, относящийся к VIII - VII векам до РХ, несет на себе следы разрушения от сильного землетрясения. Многочисленные блоки из хорошо обработанного черного базальта с вырезанными в них пазами для скрепления каменными скобами разбросаны по северному и восточному склонам вулкана. Часть этих блоков была утилизирована при реставрации стен во времена Армянского царства III - II века до РХ (Караханян и др., 2018). Полученные С. Баласаняном данные позволили определить верхнюю и нижнюю границу даты события, связанного с феноменом разжижения грунта.

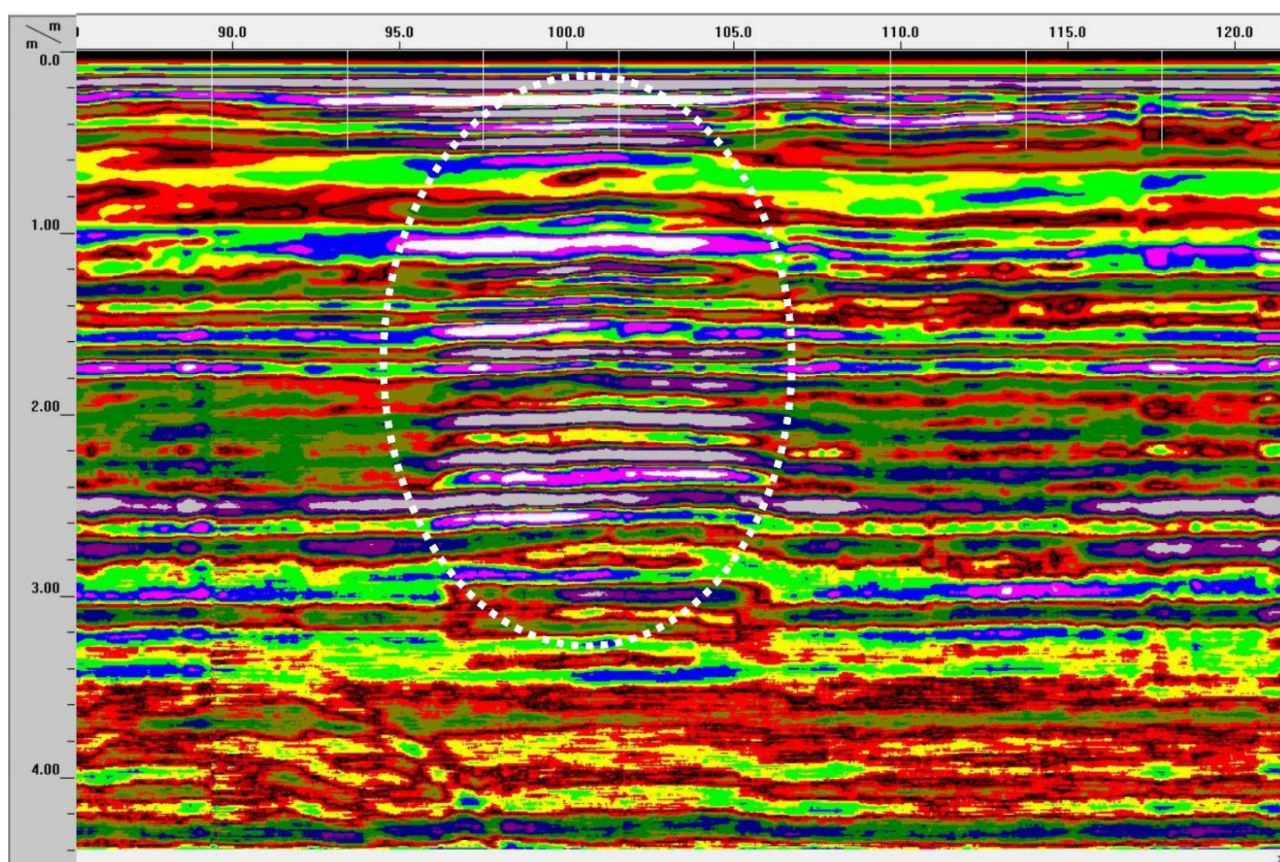


Рис. 2.12. Аномалия, полученная при съемке георадаром SIR 3000. Профили и точки аномалий показаны на рис. 2.5.

По результатам исследований 2017 года была создана GIS база данных и составлена карта (рис 2.5). Путем соединения задокументированных сдвигов, аномалий, полученных георадаром SIR 3000, и макросейсмических исследований проведена предполагаемая линия разлома на участке Сардарпатский структуры (рис 2.5, выделено штрихом).

2.3. Выводы:

Данные, полученные при изучении Сардарпатской структуры, свидетельствуют о том, что она является активным разломом со взбросовым механизмом подвижки и сейсмогенной зоной с потенциалом $M= 6.6-7.0$ и со следами поверхностного разрыва и разжижения грунта от сильного землетрясения, произошедшего в период между VIII веком и II веком до РХ.

На основе изложенного формулируется защищаемое положение диссертации:

Сардарпатская структура является активным разломом со взбросовым механизмом подвижки и со следами поверхностного разрыва и разжижения грунта от сильного землетрясения, произошедшего после VII века до н.э.

ГЛАВА 3. ФЕНОМЕН РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА В РАЙОНЕ БАССЕЙНА ОЗЕРА СЕВАН

3.1. Общие сеймотектонические сведения о бассейне озера Севан

На расстоянии 10-12 км от ЮВ побережья Большого Севана на сегменте PSSF-3 палеосейсмологические и археосейсмологические данные свидетельствуют о трех сильных землетрясениях с $M=7.0-7.5$, сопровождавшихся поверхностными разрывами (Philip et al, 2001, Avagyan, 2001, Karakhanyan et al. 2016). На СВ побережье Малого Севана вдоль сегментов PSSF 2 и PSSF 3 локализованы эпицентры трех исторических землетрясений – 995 года с $M=6.2$; 1187 с $M= 6.2$ и 1853 года с $M=6.0$. Пять землетрясений с магнитудами от 4.0 до 5.4 произошли на сегментах PSSF 2 и PSSF 3 в непосредственной близости от берегов Малого и Большого Севана за период с 1933 по 1951 года. В береговых отложениях Севана имеются хорошо выраженные сейсмиты (Корженков и др. 2014).

Приведенные данные свидетельствует о том, что разломы на дне озера Севан не только активны, но и могут являться источниками сильных землетрясений. Наличие разломов, которые способны вызвать поверхностный разрыв, на дне Малого и Большого Севана необходимо учитывать при построении сеймотектонических моделей и оценке сейсмической опасности. В случае возникновения сильного землетрясения, сопровождаемого поверхностным разрывом на дне озера, нельзя исключить и вероятность возникновения цунами. Последние исследования указывают на возможность таких явлений на других крупных озерах, имеющих тектоническое происхождение (Brown, 2000; Ichinose et al, 2000). Учитывая, что глубина Малого Севана, на дне которого имеются хорошо выраженные структуры активных разломов, составляет 60 – 80 м, а глубина Большого Севана всего 16 -12 м, землетрясение с поверхностным разрывом на дне Малого Севана может вызвать очень высокую волну цунами в пределах Большого Севана.

Ниже приведена суммарная информация об активной тектонике и сейсмичности бассейна озера Севан (рис. 3.1).

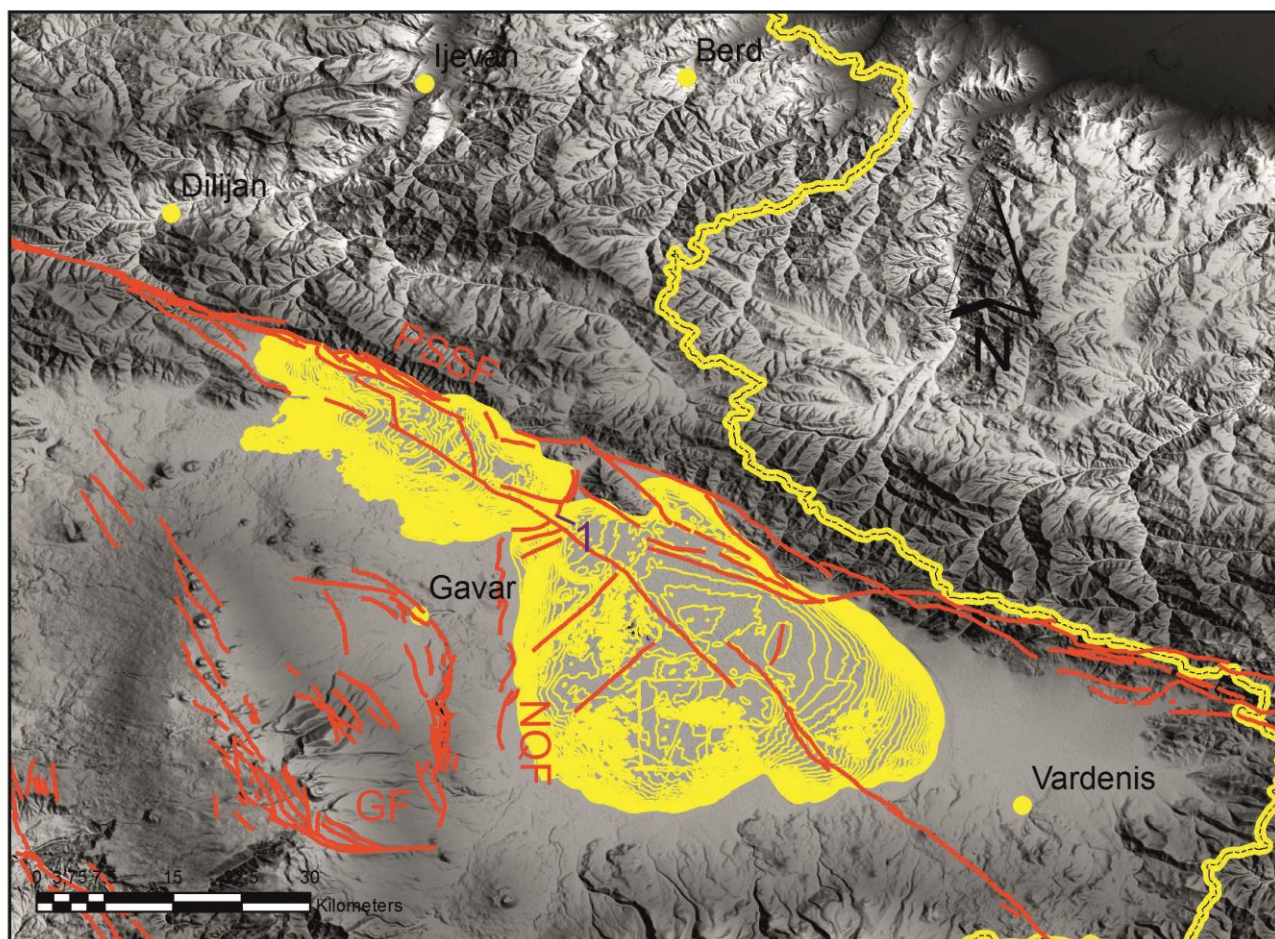


Рис. 3.1. Батиметрическая карта дна озера Севан масштаба 1:50,000 (Karakhanyan et al. 2011).
1 – Норатуская перемычка

В районе бассейна озера Севан находится Гаварагетский разлом и два сегмента Памбак-Севан-Сюникского разлома. С этими разломами были связаны многочисленные исторические и доисторические землетрясения (рис. 1.1). Также на линии разделения Малого Севана и Большого Севана находится Норатуский Вал (Норатуская перемычка) (Милановский, 1968).

3.1.1. Гаварагетский разлом (GF)

На западном берегу озера, к востоку от Гегамского хребта, в направлении север-юг вытянута Гаварагетская впадина (односторонний грабен), заполненная четвертичными отложениями. В центральной части впадины, вдоль ее оси, из-под современного аллювия выступает асимметричная гряда, сложенная верхнеплиоценовыми лавами (Милановский, 1968). Позднейшие исследования показали, что Гаварагетская впадина - это зона из трех ветвей сбросовых разломов,

каждая из которых имеет длину около 50 км (рис. 3.1) (Ավագյան, 2013, Karakhanyan et al. 2016.).

У западной ветви разломов опущено восточное крыло. Вертикальные амплитуды смещений по сбросам здесь достигают 40-50 м, а горизонтальные не фиксируются. Центральная ветвь сбросов наиболее хорошо выражена (рис. 3.1). Вертикальные смещения по центральной ветви разломов сместили и подняли вверх ряд русел рек, стекающих с восточных склонов Гегамского хребта и впадавших ранее в озеро Севан (Милановский, 1968). Образовавшийся разломный уступ (эскарп) привел к изменению их течения, и в настоящее время все реки с восточного склона Гегамского хребта поворачивают на север и в виде единой реки Гаварагет впадают в озеро Севан севернее города Гавар. Вертикальные амплитуды смещений по сбросам на участке "мертвых долин" варьируют от 70 до 130 м, а горизонтальные смещения по правому сдвигу достигают 260 м. В северной части центральной ветви, у города Гавар, вертикальные амплитуды смещений достигают 170-180 м, амплитуды горизонтальных смещений трудно измерить из-за активной сельскохозяйственной деятельности, но, судя по одному из измерений, они составляют около 250 м (Ավագյան, 2017). В северной части центральной ветви сбросов, после смещения разломом рек, у подножия эскарпа образовались многочисленные озера, которые впоследствии высохли. Исследовательской группой Караханяна в одном из таких озер был вырыт шурф, показавший, что мощность озерных отложений составляет 2 м. Радиоуглеродное датирование образца озерных отложений, взятого с глубины 2 м, дало возраст 30 000 лет ВР. Это говорит о молодом возрасте Гаварагетских разломов и свидетельствует о том, что максимальная скорость вертикального смещения может составить около 6 мм/год (Ավագյան, 2017).

Вдоль береговой линии озера проходит третья ветвь сбросов с опущенным западным крылом и видимой амплитудой около 10-15 м. Однако точно оценить вертикальную амплитуду на этой ветви затруднительно, так как подножие эскарпа является береговой линией озера и перекрыто его отложениями. Часть сбросовых эскарпов заметна и на дне озера Севан (рис. 3.1). К северу все четыре ветви сбросов расходятся веером, и суммарная ширина зоны растяжения составляет 20 км, а к югу

все три ветви сходятся наподобие структуры “конского хвоста” и ширина зоны здесь составляет 3 км (Ավագյան, 2017).

С разломами связаны два исторических землетрясения 1226 ($M=6.2$) и 1322 ($M=6.6$) годов. Среди событий есть несколько землетрясений с магнитудой 3.5 и одно событие 1905 года с магнитудой 4.7. Оценка максимальной возможной магнитуды по зависимости Wells & Coppersmith (1994) для Гаваргетских разломов составляет 7.1 (Karakhanyan et al. 2016).

3.1.2 Сегменты PSSF-2 и PSSF-3.

Памбак-Севан-Сюникский правосдвиговой разлом (наиболее активный в Армении, впервые выделен в 1968 г. Милановским), являющийся наиболее активным в Армении, разветвляется у северного побережья озера Севан на два сегмента. Один из сегментов PSSF 2 протягивается по северо-восточному берегу озера, смещаясь к югу от надвигов офиолитовой сутуры или иногда обновляя их. Второй сегмент PSSF-3 протягивается через дно озера, появляясь вновь на его юго-восточном берегу (Karakhanyan. et al. 2011) (рис. 3.1). Западный берег озера сформирован зоной с простиранием С-Ю системы сбросовых Гаваргетских разломов, образовавших грабеновые и горстовые структуры.

На дне Малого Севана выделяется отчетливая структура “pull-apart basin” образованная между сегментами PSSF-2 и PSSF-3. Длина структуры в разных частях составляет от 11 до 15 км, а ширина колеблется между 5 и 7 км. У сегмента PSSF-3 поднято северное крыло на 3-4 м, и он ограничивает южный край структуры “pull-apart basin”. Северный край структуры, образованный сегментом PSSF 2, имеет более сложное строение. Сегмент PSSF-2 проходит по южному подножию Арегунийского хребта. Отроги хребта образуют береговую линию озера (рис.3.1) (Karakhanyan et al., 2016). Большинство отрогов заканчиваются крупными треугольными фасетами, а многие речные долины обрываются в воды озера, не имея конусов выноса. Подводный склон в этом месте имеет очень крутой наклон и резко опускается ко дну озера, погружаясь на расстоянии 500 м на 50-60 м. Таким образом, весь северный берег Малого Севана образован сегментом PSSF-2. Плоскость сегмента PSSF-2 в ряде

случаев обнажается у береговой линии озера, демонстрируя хорошо сохранившиеся поверхности с наклоном 60° - 70° на юг, в сторону озера. На плоскостях имеются отчетливые штриховки, указывающие на сброс и правый сдвиг (Karakhanyan et al., 2011). В центральной части береговой линии Малого Севана сегмент PSSF-2 образует еще одну структуру “pull-apart basin”. Несколько ветвей сегмента PSSF-2 ответвляются и протягиваются под углом к основной плоскости, образуя треугольный “pull-apart basin”. Длина этой структуры 10 км, а ширина 2 км. На западном фланге “pull-apart basin” находится округлая депрессия с максимальной для Севана глубиной 80 м; погружение склона в этом месте составляет 80 м на расстоянии 740 м.

На расстоянии 10-12 км от ЮВ побережья Большого Севана на сегменте PSSF-3 палеосейсмологические и археосейсмологические данные свидетельствуют о трех сильных землетрясениях с $M=7.0-7.5$, сопровождавшихся поверхностными разрывами (Philip et al, 2001, Avagyan, 2001, Karakhanyan et al. 2016) На СВ побережье Малого Севана вдоль сегментов PSSF 2 и PSSF 3 локализованы эпицентры трех исторических землетрясений – 995 года с $M=6.2$, 1187 года с $M= 6.2$ и 1853 года с $M=6.0$. Пять землетрясений с магнитудами от 4.0 до 5.4 произошли на сегментах PSSF-2 и PSSF-3 в непосредственной близости от берегов Малого и Большого Севана за период с 1933 по 1951 года. В береговых отложениях Севана имеются хорошо выраженные сейсмиды (Корженков и др. 2014). Изучение сейсмидов в озерных осадках озера Севан должно быть продолжено, особенно по определению их возраста — времени сформировавших их сильных землетрясений и их повторяемости. Эти работы совместно с исследованиями по соотнесению эпицентров древних катастроф с определенными разломными зонами или их сегментами сделают более достоверной оценку сейсмической опасности региона.

На дне озера зафиксирована многочисленная слабая инструментальная сейсмичность (Karakhanyan et al., 2011).

3.1.3 Норатус – Канагехский разлом.

Норатус – Канагехский разлом был впервые выделен Милановским (1952, 1968). Впоследствии данный разлом изучался различными геологами (Avagyan, 2001,

Karakhanyan et al., 2016) и, в 2017 году, после повторного анализа данных и проведения многочисленных как наземных, так и подводных полевых работ группой А. Авагяна, был сделан вывод о том, что Норатус – Канагехский разлом имеет сбросовую кинематику, а его активность связана с вулканическими процессами (Ավագյան, 2017).

3.1.4. Норатуская перемычка

С юго-востока впадина Малого Севана отделена от впадины Большого Севана асимметричной Норатуской перемычкой (Надеждинской перемычкой, согласно Милановскому), выраженной в рельефе подводной грядой между мысами Артаниш и Норатус. Ее северо-западное крыло значительно круче и выше юго-восточного. Тектоническая природа перемычки не вызывает сомнений, но одни исследователи трактуют ее как растущую поперечную антиклиналь (Варданянц, 1948), другие - как омоложенный сброс (Пафенгольц, 1948). Феномен возникновения Норатуской перемычки является одним из открытых вопросов активной тектоники бассейна озера Севан. Варданянц Л. А. (1948), Пафенгольц К. Н. (1948), Мкртчян С. С. (1971), Милановский Е. Е. (1968) считали тектонической структурой морфологическую перемычку между Артанишским и Норатуским полуостровом. Согласно Милановскому Е. Е., она представляет в структуре неоген-четвертичного чехла асимметричную поперечную антиклиналь, обусловленную односторонним горстом в донеогеновом субстрате. Интенсивный рост Норатуского поперечного поднятия происходил в плейстоцене, в период осушения площади Большого Севана, в связи с чем растущее поднятие было пропилено на глубину 20 м антецедентной долиной реки, стекавшей в Малый Севан (Милановский, 1968). Сейчас Норатуская перемычка пересечена каньоном с приблизительной глубиной 8-10 метров. Пафенгольц К. Н., Милановский Е. Е., Асланян А. Т. считали каньон следствием эрозии реки, втекающей в Малый Севан из Большого (рис. 3.2).

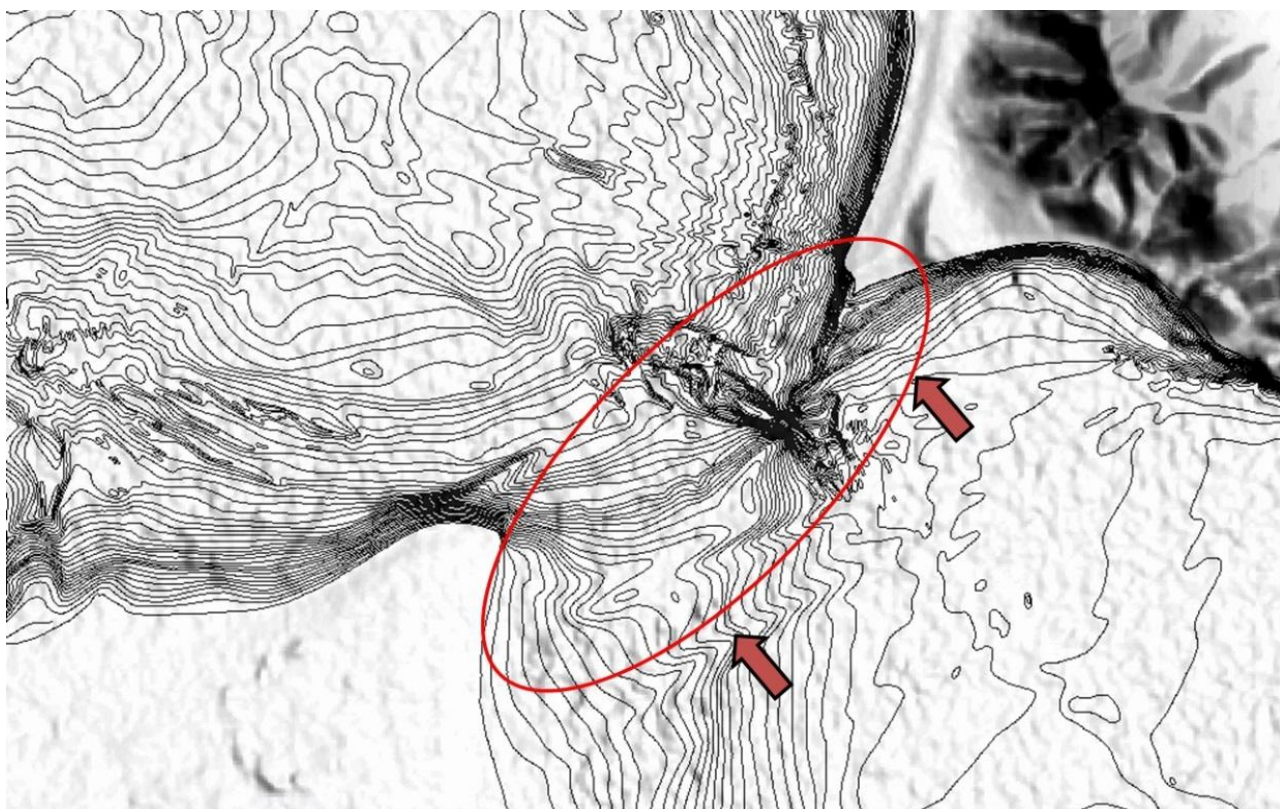


Рис. 3.2. Норатуская перемычка с ярко выраженным каньоном между Малыми Большим Севаном (батиметрическая карта с разрешением 1м по вертикали).

Э. Харазян (2005) и С. Пирузян (1969) считали причиной образования Норатуской перемычки Азат – Севанский разлом, который был выделен путем соединения эпицентров Араратского землетрясения (1840), Двинских землетрясений (IX век), Гарнийского землетрясения (1679) и землетрясений 1905 года возле города Гавар (Пирузян, 1969). В результате недавних исследований было уточнено расположение большинства эпицентров этих землетрясений. Араратское землетрясение 1840 года имело эпицентр на Гайлату-Северо-Тевризском разломе ЗСЗ простирания, а Двинские землетрясения IX века связаны с Ереванским разломом (Karakhanyan et al., 2016). Гарнийское землетрясение 1679 года произошло на Гарнийском разломе ССЗ простирания (Karakhanyan et al., 2016). К тому же концепция выделения разломов путем соединения эпицентров устарела. Выделение Азат – Севанского разлома на основе отмеченных выше последних данных не отвечает современным сейсмотектоническим представлениям. Несмотря на это, в работах некоторых сейсмологов до сих пор встречается Арарат – Севанский или Азат

– Севанский разлом с рассуждениями о связи эпицентров слабых землетрясений с ним (рис 3.3).

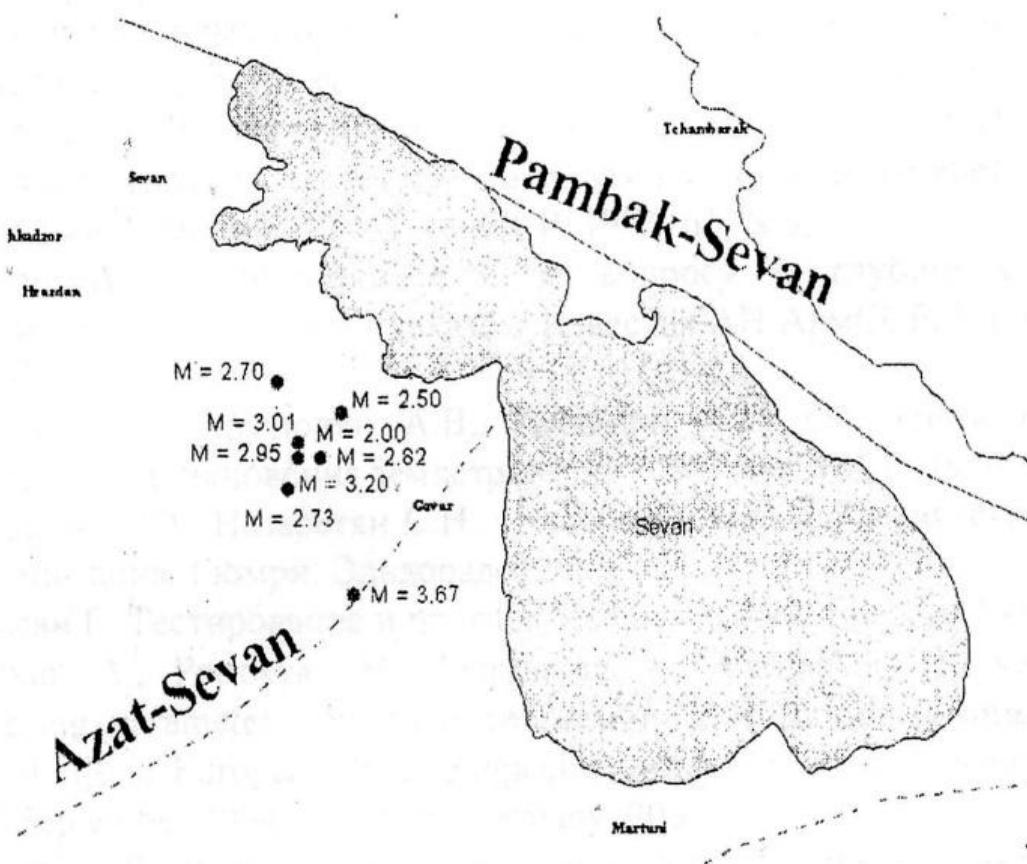


Рис. 3.3. Азат – Севанский разлом и эпицентры слабых землетрясений инструментального периода.

Заметим, однако, что, согласно работе «Оценка сейсмической опасности для площадки строительства нового энергоблока Армянской АЭС (Рабочий Пакет 5. Вероятностная оценка сейсмической опасности, авторы: А. Аракелян, С. Маргарян, Р. Дургарян) (Karakhanuyan et al., 2011), точность определения эпицентров землетрясений в каталогах НССЗ и ИГИС, использованных при выделении указанных разломов, составляет ~10 км, а гипоцентров ~7 км.

Наиболее точная фиксация местоположения вероятной тектонической структуры Норатуской перемычки показана на геологической карте Пафенгольца

M=1: 200,000 (рис. 3.4).

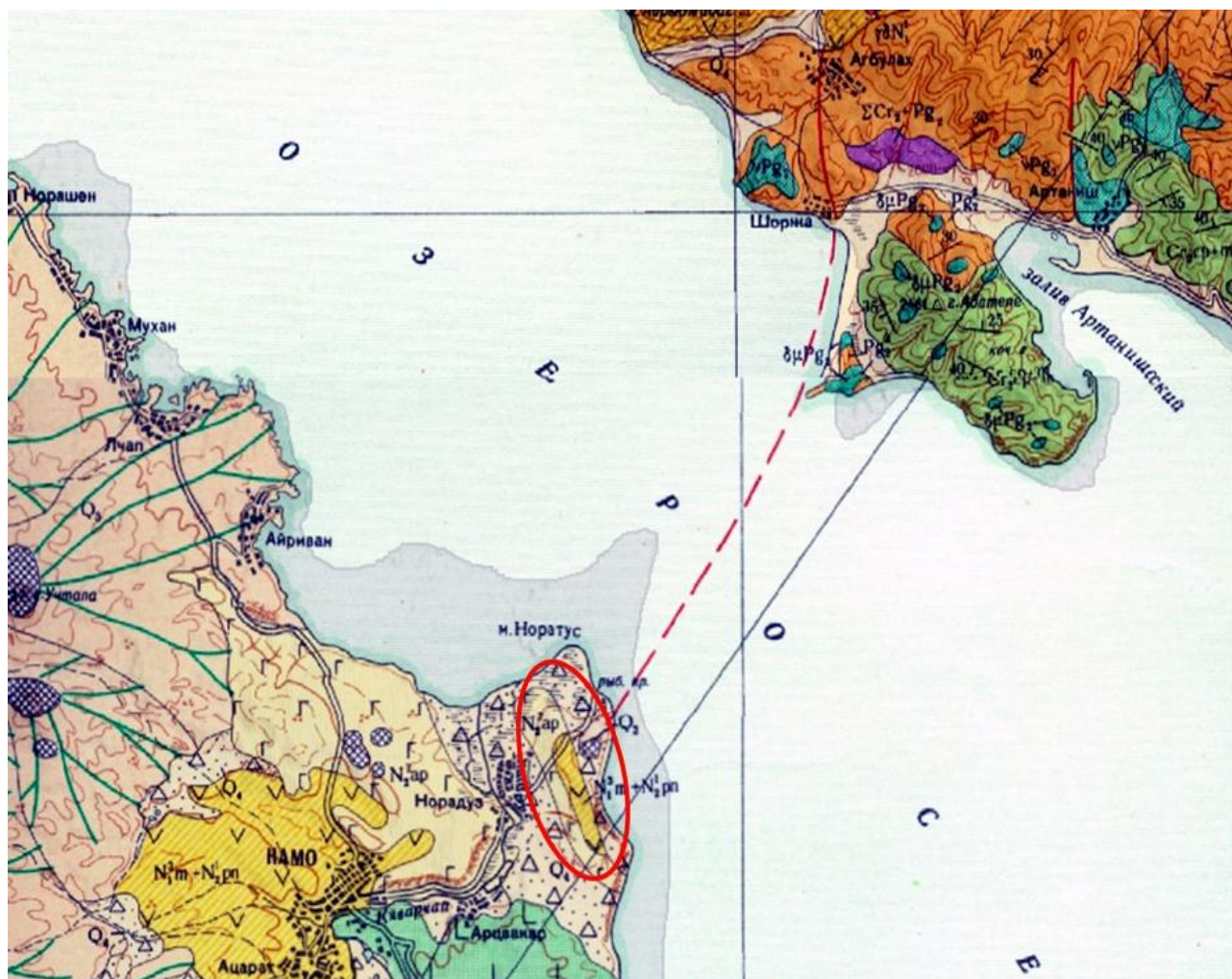


Рис. 3.4. Пафенгольц (1949) - “Геологическая карта Кавказа”.

Пунктиром выделена предполагаемая линия Азат-Севанского разлома. Красным овалом отмечена Гаварагетская впадина.

3.2. Магнитометрические исследования 2002 года

В 2002 году группа в составе А. Караханяна, А. Багдасаряна (ИГН), Ч. Коннора и Л. Коннор (УЮФ) исследовала район к СВ от села Норатус для выделения возможных признаков Норатусского разлома.

Место для проведения работ было выбрано не только на основе карты Пафенгольца, но также потому, что морфометрические данные перемычки на дне Севана наиболее четко фиксировали ее к СВ от мыса Норатус.

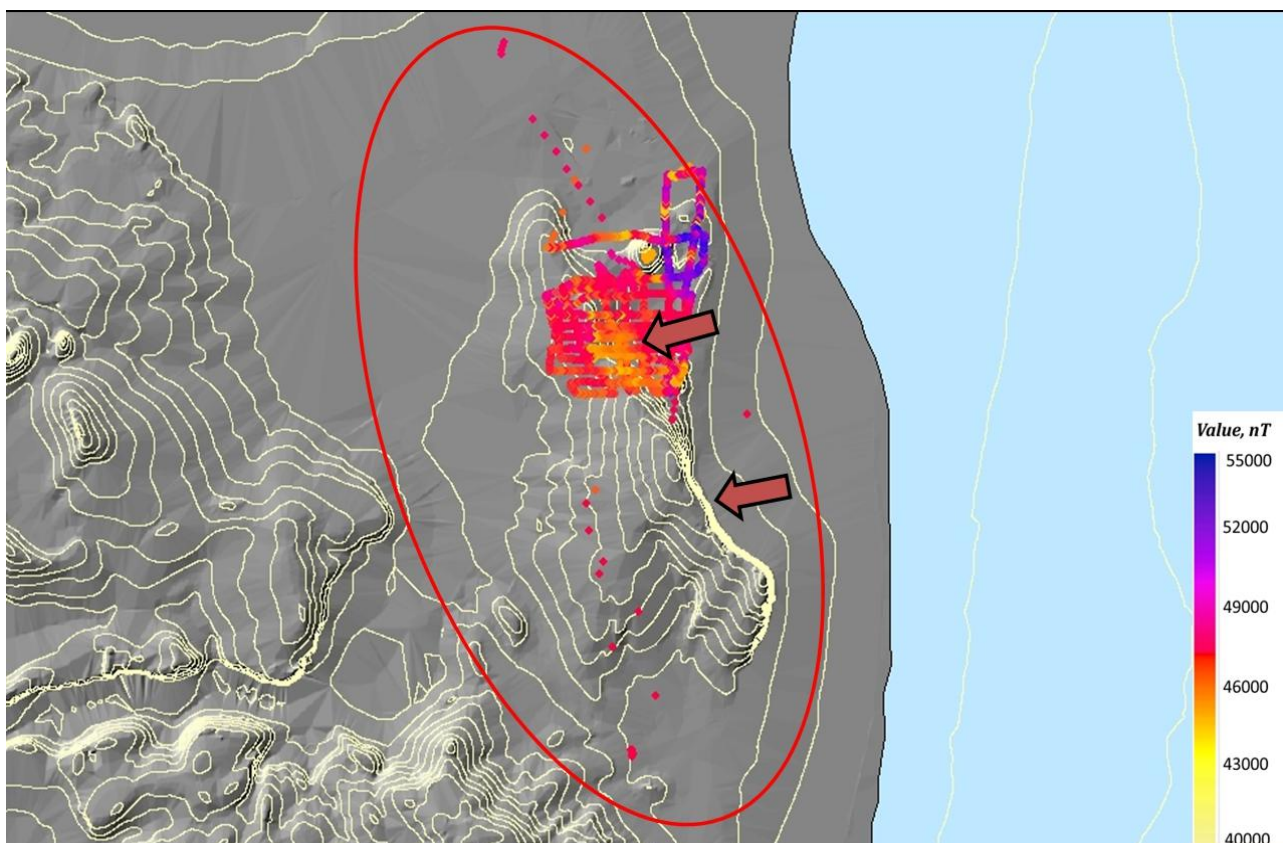


Рис. 3.5 а. Профили магнитометрической съемки 2002 года. (Единица измерения - нТ)

На рисунках проиллюстрированы полученные результаты, показывающие отчетливые аномалии низкого значения магнитного поля (~ 44000 нТ), которые выявляют разлом ССЗ простираения вдоль восточного борта Сарикаинской гряды. Сами по себе аномалии могут и не являться свидетельством наличия разлома, но данный магнитометр имеет систему DGPS (Дифференциальной Глобальной Системой Навигации), которая корректирует полученные измерения относительно высоты. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что аномалии вызваны не резкими изменениями высоты вследствие присутствия Сарикаинской гряды, а фиксируют разлом.

С использованием магнитометра G-858 MagMapper Geometrics на указанном участке была проведена магнитометрическая съемка по профилям. Профили съемки были расположены вкрест всем возможным трассам разлома и составляли сетку с расстоянием между профилями в 100 м и со сгущением в районе аномалий до 50 м. Шаг измерений равнялся 2 м между точками. В возможной мере было использовано такое расположение профилей, которое могли бы наилучшим образом подтвердить

или опровергнуть наличие Азат – Севанского разлома. В том числе был исследован длинный профиль с направлением на ССЗ. Результаты съемки в 2002 году не были обработаны и проанализованы.

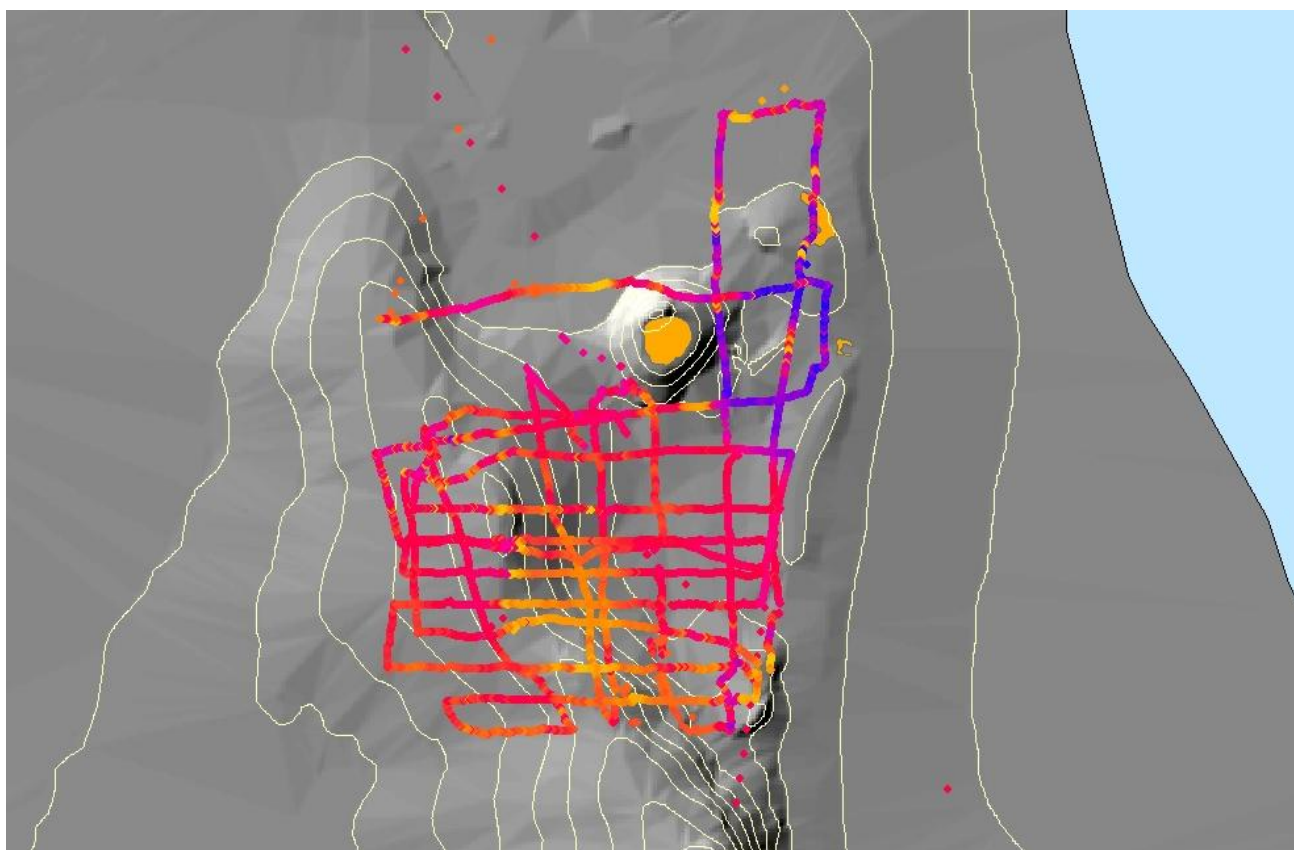


Рис. 3.5 б. Профили магнитометрической съемки 2002 года (детальная карта)

В 2015 году автором с участием Сурена Аракеляна и Аркадия Караханяна были обработаны данные магнитометрической съемки 2002 года и введены в ГИС базу данных для их последующего анализа. (Макарян и др., 2017).

На рисунках 3.5 а, б проиллюстрированы полученные результаты, показывающие отчетливые аномалии низкого значения магнитного поля (~ 44000 нТ), которые выявляют разлом ССЗ простираения вдоль восточного борта Сарикаинской гряды. Сами по себе аномалии могут и не являться свидетельством наличия разлома, но данный магнитометр имеет систему DGPS (Дифференциальной Глобальной Системой Навигации), которая корректирует полученные измерения относительно высоты. Поэтому, можно с уверенностью сказать, что аномалии вызваны не резкими изменениями высоты вследствие присутствия Сарикаинской гряды, а фиксируют разлом.

Азимут простирания выявленного разлома - СЗ 320-330°, что совпадает с азимутом простирания Норатус – Канагехского разлома. Пройденными профилями никаких свидетельств других разломов профилями не было обнаружено. К ЮВ, на расстоянии 1500 м от участка магнитометрических исследований, расположены описанные Милановским разломы (1952).



Рис. 3.6. Геологическая карта Е. Е. Милановского 1952 года.

Е. Милановским в 1952 году, с использованием карты К. Н. Паффенгольца, была составлена геологическая карта Севанской впадины $M=1:200,000$, где отчетливо видны разломы, выявленные магнитометрической съемкой 2002 года, однако нет никаких следов разлома на месте Норатуской перемычки (рис. 3.6).

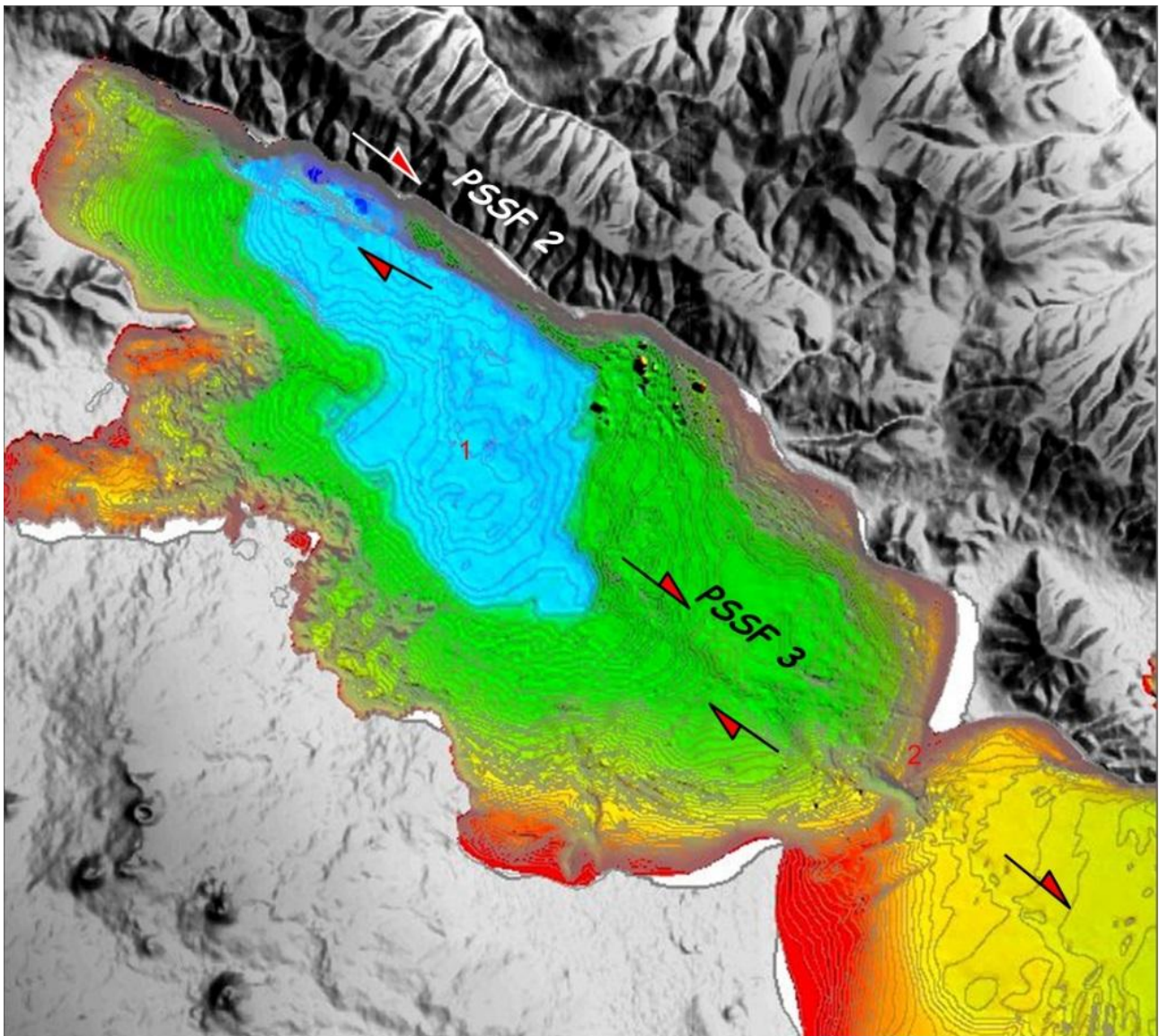


Рис. 3.7. DEM Севанской впадины и сегменты разлома PSSF.

1 – Севанская впадина “pull – apart” 2 – Каньон на Норатусской перемычке.

Новая версия причины образования Норатусской перемычки была выдвинута исследовательской группой А. Караханяна в 2016 году (Karakhanyan et al., 2016), которая предположила, что Норатуская перемычка могла образоваться вследствие растяжения при образовании Севанской структуры бассейна “pull–apart” (рис. 3.7), а каньон в центре Норатусской перемычки точно совпадает с линией сегмента PSSF-3. Было высказано предположение, что он образован вследствие вертикальных смещений на этом сегменте Памбак – Севан – Сюникского разлома. Впоследствии этот каньон стал руслом реки, втекающей из Большого Севана в Малый Севан.

3.3. Феномен разжижения грунта в бассейне озера Севан

3.3.1. Феномен разжижения грунта в районе села Норатус

В 2002 году А.Караханян, А. Багдасарян, Ч. Коннор и Л.Коннор провели палеосейсмологические исследования в районе Норатусского мыса. На окраине села Норатус были найдены структуры, которые впоследствии Х. Макаряном и А. Караханяном были идентифицированы как следы разжижения грунта (liquefaction) (рис. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12). Дайки песка, внедренного в верхние слои, соответствуют всем полевым критериям феномена разжижения грунта (Макарян. 2017).

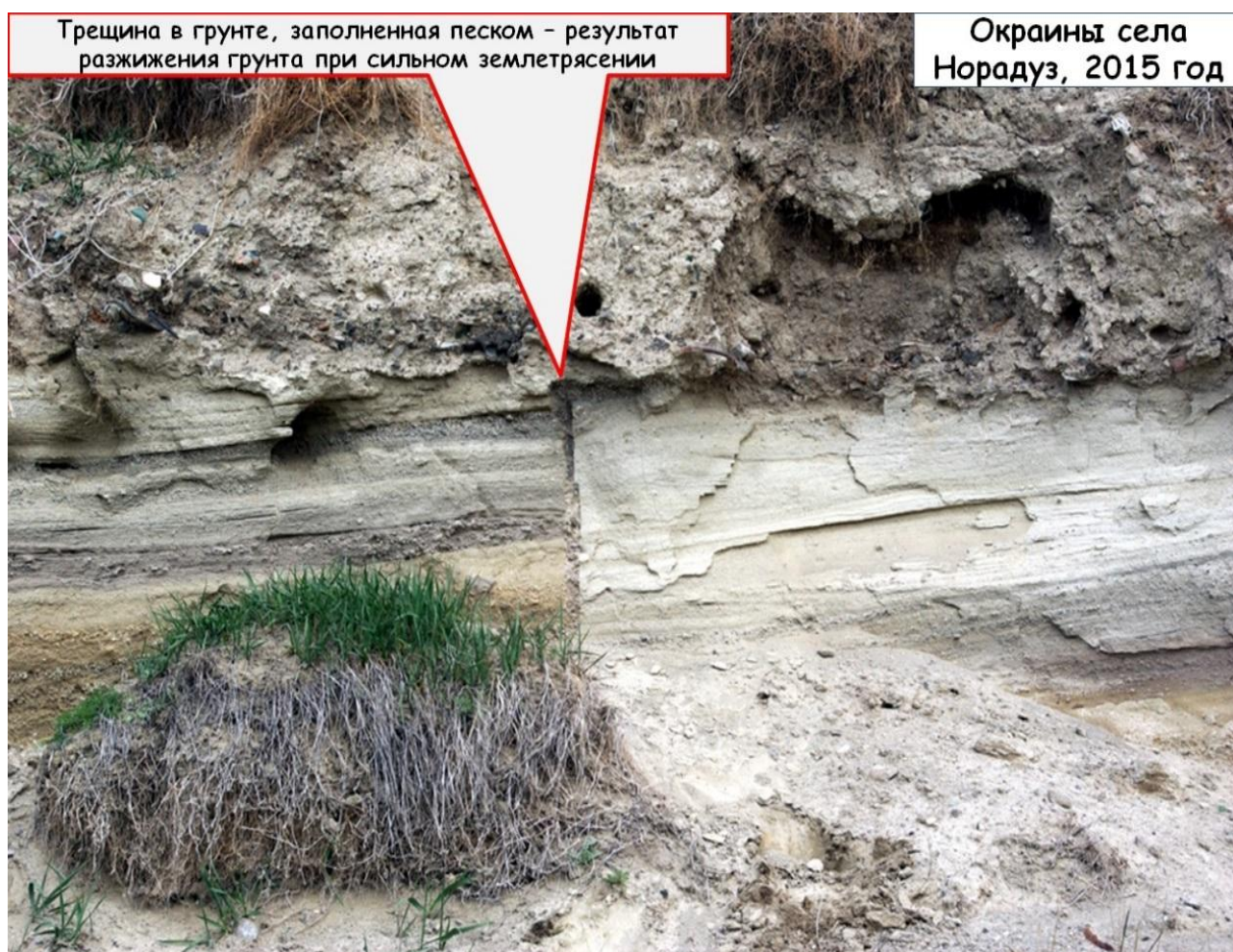


Рис. 3.8. Окраины села Норатус, 2015 год.

Рассмотренные обнажения были задокументированы в 2002 и в 2015-2017 годах. Далее приведены фотографии разных лет со схематическими рисунками и пояснениями об обнаруженных структурах.

Обнажение 1. (рис. 3.8, 3.9). На фотографии 2015 года ясно идентифицируется трещина в грунте, а также смещение по разлому от землетрясения.

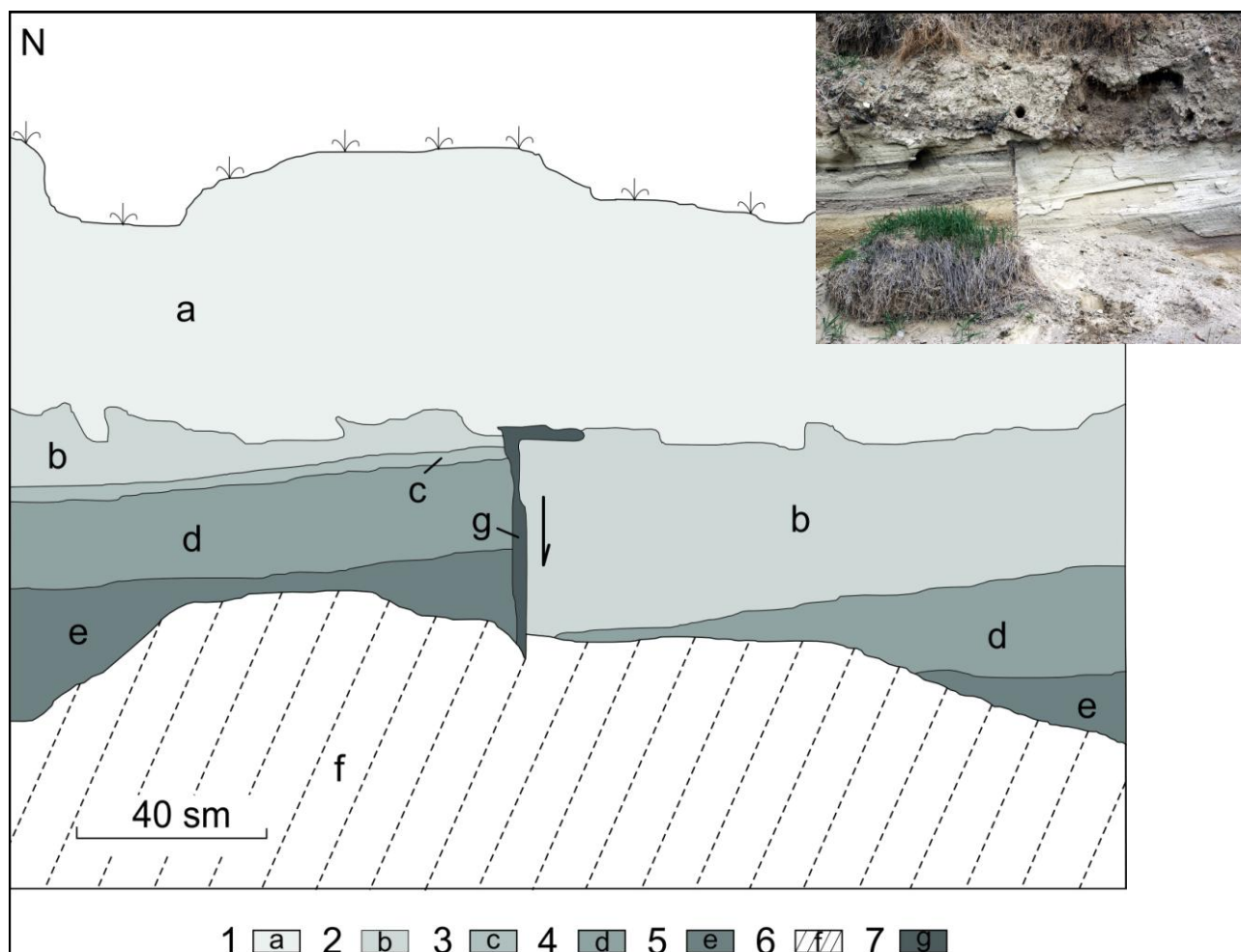


Рис. 3.9. Разжижение грунта на окраине села Норатус. 1. а - слой современной почвы; 2. b - слоистые вулканические отложения; 3. с - окатанная мелкая галька; 4. d - глинистые отложения Севана с тонкими прослоями тефры; 5. е - вулканические отложения с включением обломков различных пород из отложений Севана; 6. f - обвал современной почвы. 7. q - заполнитель трещины разжижения грунта из мелкозернистого песка и неокатанных обломков пород.

Амплитуда смещения слоев в данном обнажении более 1 метра. Полевые критерии идентификации феномена разжижения грунта полностью соответствуют задокументированному обнажению. Это позволяет утверждать, что в данном районе сильное сейсмическое событие вызвало феномен разжижения грунта и смещение слоев за счет горизонтального перемещения грунта под влиянием силы тяжести.

Обнажение 2. Рис. 3.10 (а, б).

Представлена фотография 2015 года. Дайка песка внедрилась в верхние слои, частично их деформировав.

Присутствие обломков вмещающих пород в дайке внедренного песка - явный признак разжижения грунта.

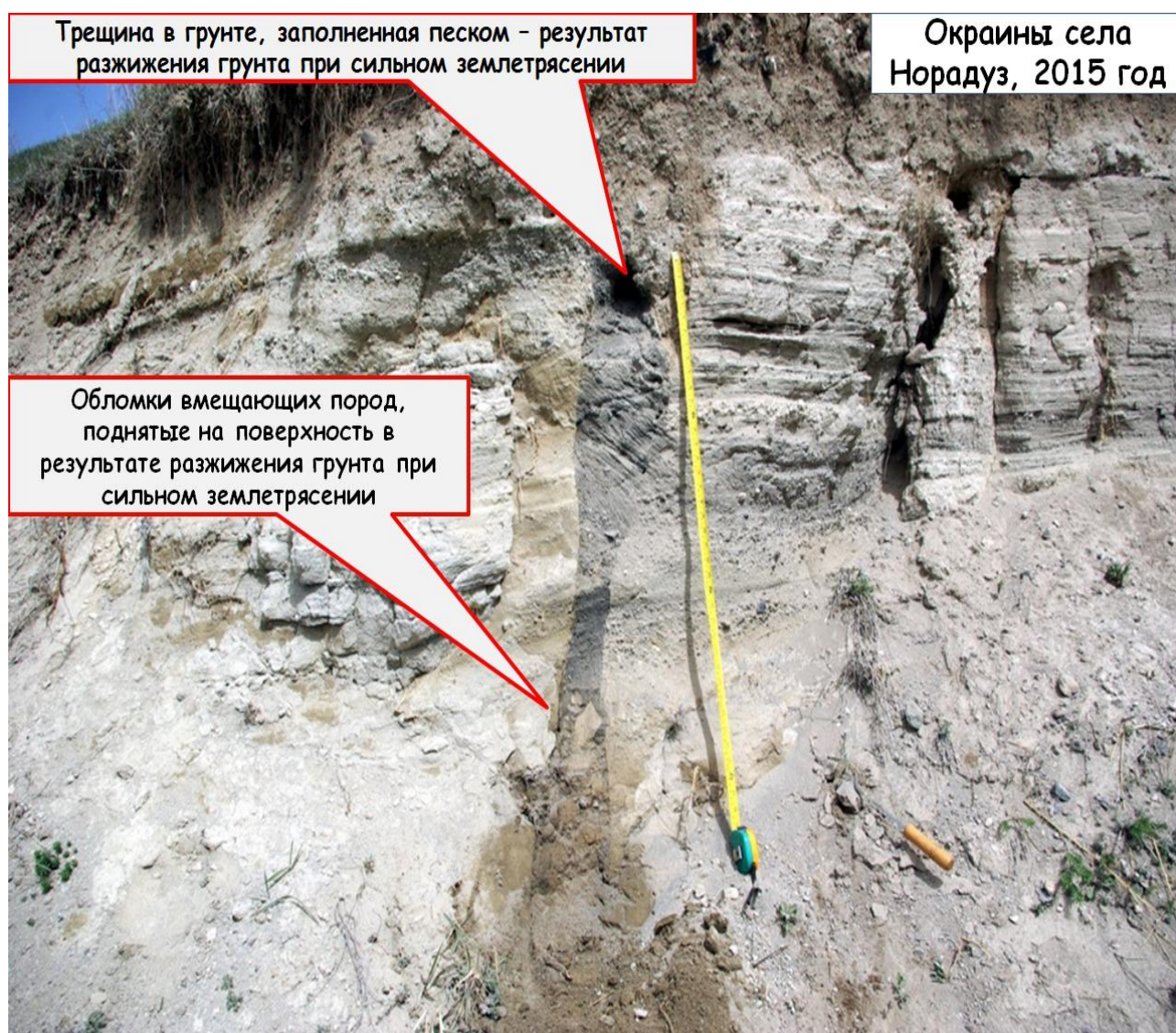


Рис. 3.10 а. Окраины села Норагус, 2015 год.

Из обнажения 2 были взяты пробы для гранулометрического анализа и для изотопного анализа C14 (рис. 3.10 б). Гранулометрический анализ был проведен в лаборатории Геологического факультета ЕГУ. Анализ фракций по методу Цусиды показал высокую вероятность возникновения эффекта разжижения грунта.

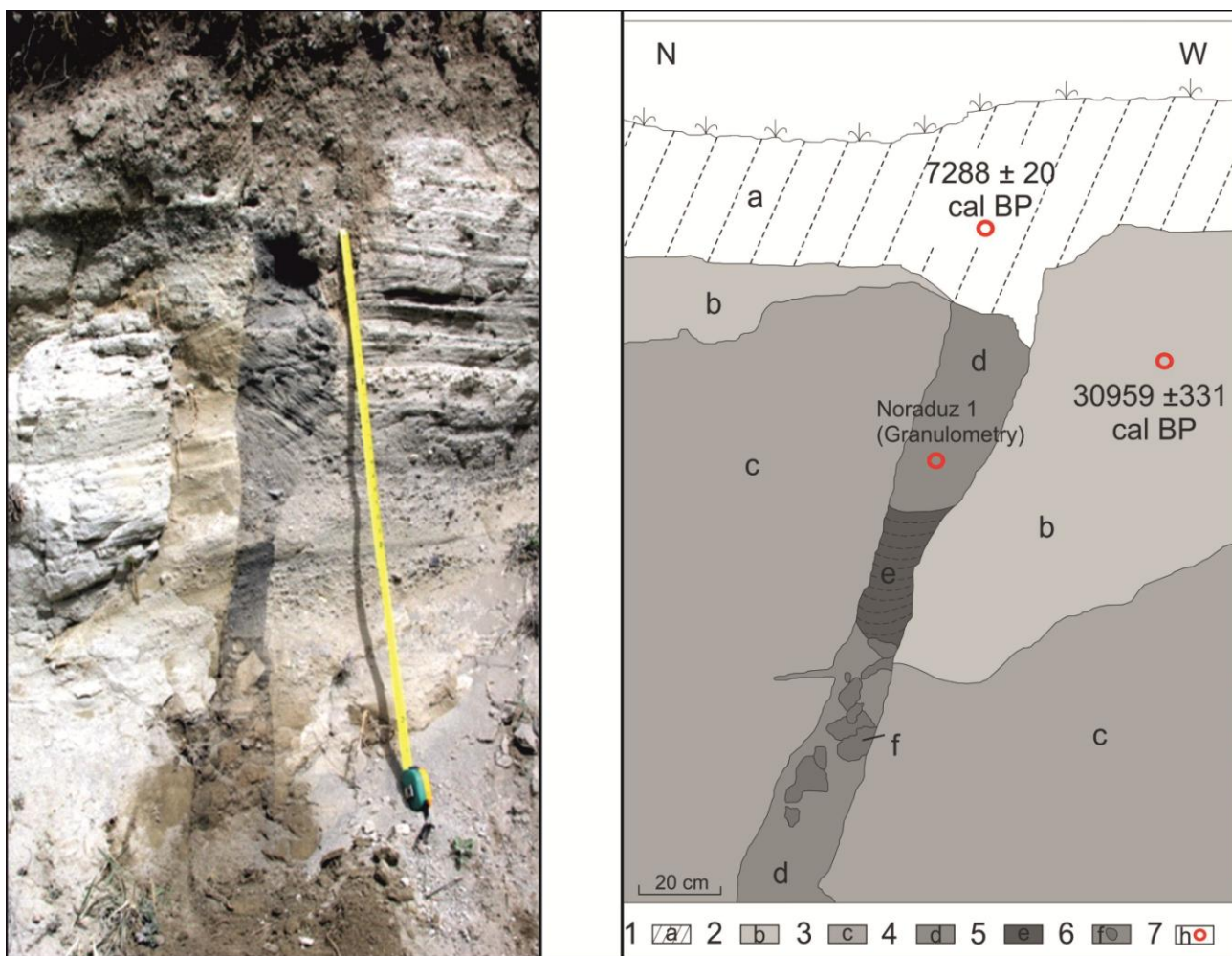


Рис. 3.10 б (схематический). Разжижение грунта на окраине села Нурадус. 1. а - слой современной почвы; 2. b - слои вулканической тефры, перемешанные с озерными отложениями Севана прибрежной фации; 3. c - слои вулканической тефры; 4. d - крупнозернистая темная вулканическая тефра; 5. e - черная слоистая мелкозернистая вулканическая тефра; 6. f - обломки песчанника; 7. - места взятия образцов для анализов С14 и гранулометрии.

Изотопный анализ С14 был проведен в лаборатории университета Глазго, а затем был откалиброван мной при помощи Оксфордского калькулятора для С14 (OxCal 4.3). Взятые образцы помогли установить пред,-дату и пост-дату события, повлекшего за собой феномен разжижения грунта. Землетрясение произошло в промежутке от 30959 ±331 cal BP до 7288 ± 20 cal BP (Приложение 1).

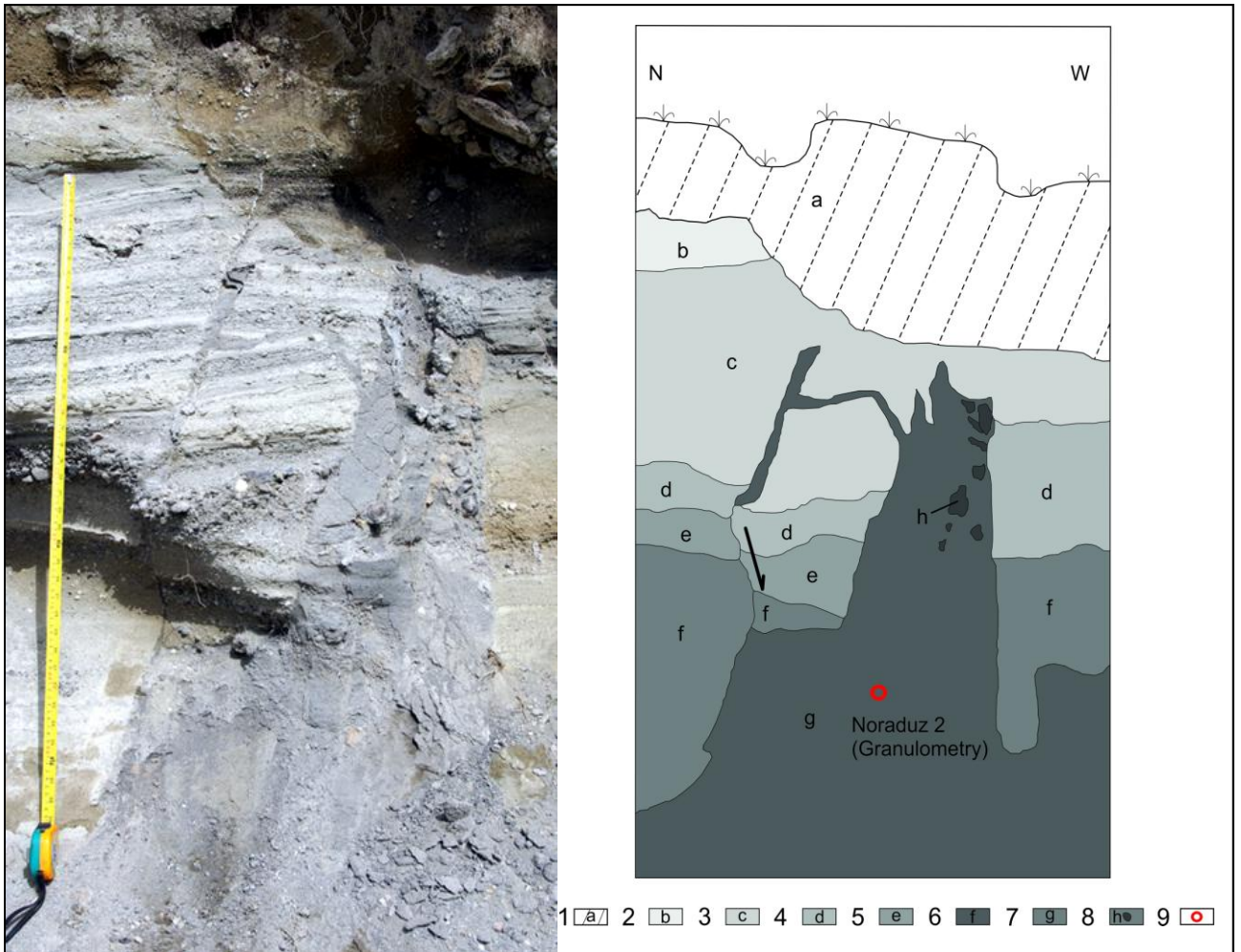


Рис. 3.11. Обнажение 3. Разжижение грунта на окраине села Нурадус. 1. а - слой современной почвы; б - слои вулканической тефры, перемешанные с озерными отложениями Севана прибрежной фации; 3. с - слоистая вулканическая тефра светло серого цвета с чередованием мелкозернистых и крупнозернистых слоев; 4. d - вулканические отложения с включением обломков различных пород из отложений Севана; 5. е - вулканическая тефра, перемешанная с отложениями Севана; 6. f-глинистые отложения Севана с тонкими прослоями тефры; 7. g - тонкозернистая тефра; 8. h - обломки слоя f; 9 место взятие второго гранулометрического образца.

Ещё одна трещина в грунте, заполненная песком – результат разжижения грунта при сильном землетрясении (рис. 3.11). Гранулометрический анализ, взятый для интерпретации по методу Цусиды, также показал высокую вероятность

возникновения разжижения грунта. Анализ был произведен в лаборатории ЕГУ при помощи С. Айрояна (рис. 3.12).

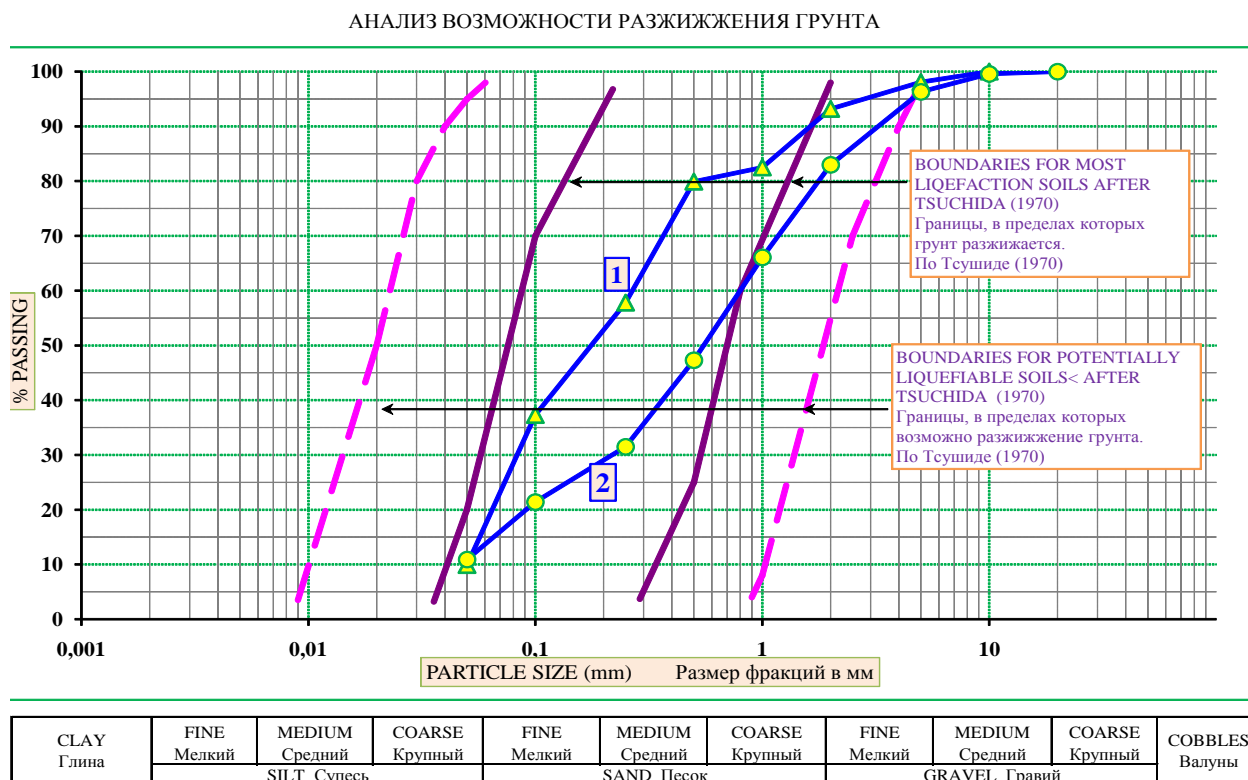


Рис. 3.12. Анализ возможности разжижения грунта. Оба образца грунта показали высокую вероятность разжижения.

Подобного размера трещины от разжижения грунта возникают во время горизонтального спрединга грунта во время сильных землетрясений. Согласно международной шкале интенсивности INQUA (Michetti et al., 2004) “Часто имеет место разжижение и подъем воды; эффекты “кипения песка” диаметром до 3 м; явные эффекты фонтанирующей воды в стоячих водах; частый боковой спрединг и просадки (опускание на более чем около 30 см), с образованием трещин параллельно зонам береговых линий (берегам рек, озер, каналов, морским побережьям”. Возникают при интенсивности IX-X).

3.3.2 Следы феномена разжижения грунта в бассейне озера Севан.

В 2017 году были обнаружены свидетельства разжижения грунта в северной части бассейна озера Севан, недалеко от линии второго сегмента Памбак – Севан – Сюникского разлома (рис. 3.13).



Рис 3.13. Предполагаемая дайка (силла) разжиженного грунта

Дайка (силла) внедренного песка в верхние слои. Размер внедренного слоя приблизительно 3 метра, что соответствует землетрясению интенсивностью VIII-IX.

3.4. Выводы

На окраине села Норадус фиксируются многочисленные следы разжижения грунта (ликвифекшн) от землетрясения с интенсивностью около IX-X баллов по шкале MSK 64. Взятые образцы и их результаты свидетельствуют о том, что зафиксированное землетрясение произошло в промежутке времени от 30959 ± 331 cal BP до 7288 ± 20 cal BP.

На основе изложенного формулируется защищаемое положение диссертации:

Многочисленные следы разжижения грунта на окраине села Норатус связаны с землетрясением, произошедшим более 6000 лет назад с интенсивностью около IX-X баллов по шкале MSK 64.

ГЛАВА 4. ФЕНОМЕН РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА В РАЙОНЕ ГОРОДА СИСИАН

4.1 Сисианский участок исследований: общие сведения

Исследованный около города Сисиан участок находится на Сюникском нагорье, которое образует юго-восточную окраину вулканической зоны Республики Армения. Нагорье имеет протяженность около 95 км с СЗ на ЮВ и ширину 35 км. На нагорье насчитывается более 150 вулканических конусов, достигающих относительной высоты 400-500 м. Самые молодые голоценовые лавовые потоки наблюдаются на СЗ нагорья, на Каркарском плато. В этом районе наблюдается упорядоченность проявлений вулканизма относительно активных разломов (Karakhanian et al, 1997, 2011). В районе Каркарского плато общее направление разломов меняется примерно на 30° по часовой стрелке. Это изменение направления отражается на кинематике разломов, когда сбросовая компонента начинает возрастать.

Сюникское нагорье изучено многими авторами (Mkrtchian et al. 1969; Trifonov, 1983; Karakhanian et al. 1997, 2004, Трифонов и др., 2004, 2008). Объектом их изучения, в частности, было и Каркарское плато площадью около 40 км². Его абсолютная высота составляет 2650 – 3206 метров. В основном плато сложено четвертичными вулканическими породами.

4.1.1 Сегмент PSSF-3

Сегмент PSSF-3 Памбак-Севан-Сюникского разлома скрывается под водами у западного побережья Малого Севана и выходит на сушу через 65 км у юго-восточного берега Большого Севана. Информация об особенностях геометрии сегмента PSSF 3 на дне Севана имеет важное значение как для понимания его параметров, так и для оценки сейсмической опасности (Karakhanian et al, 2011). В конце 80-х годов XX века Ленинградским картографическим институтом была составлена батиметрическая карта дна озера Севан с разрешением 1 м. Эта карта была

оцифрована и на ее основе была построена DEM модель дна озера, которая дала возможность выявить многие детали геометрии PSSF 3 на дне озера.

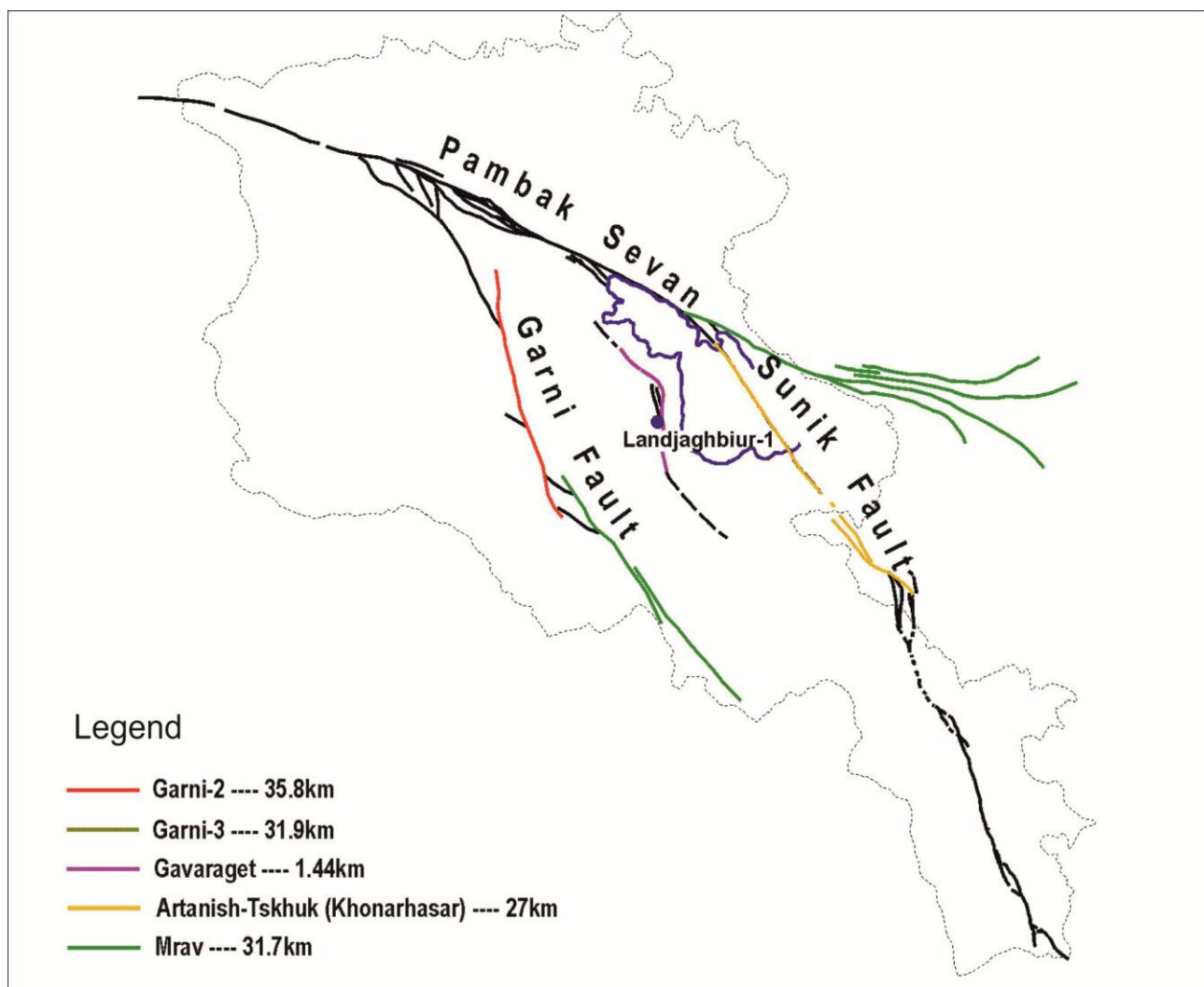


Рис. 4.1. Памбак – Севан – Сюникский разлом.

На дне Малого Севана выделяется отчетливая структура “pull-apart basin” образованная между сегментами PSSF-2 и PSSF-3 (рис. 1.3, 4.1).

Южное продолжение PSSF к югу от озера Севан (рис. 4.1) представлено сегментом PSSF-3. Разлом, пересекая вулкан Хонарасар тянется к вулкану Порак и южнее образует структуру pull-apart. Разрывное нарушение распространяется по поверхности, сложенной четвертичными вулканическими образованиями и голоценовыми лавовыми потоками от извергнутыми вулканом Порак (Karakhanian et al., 2004b; Philip et al. 2001; Трифонов и др. 2004, 2008) (рис. 4.2).

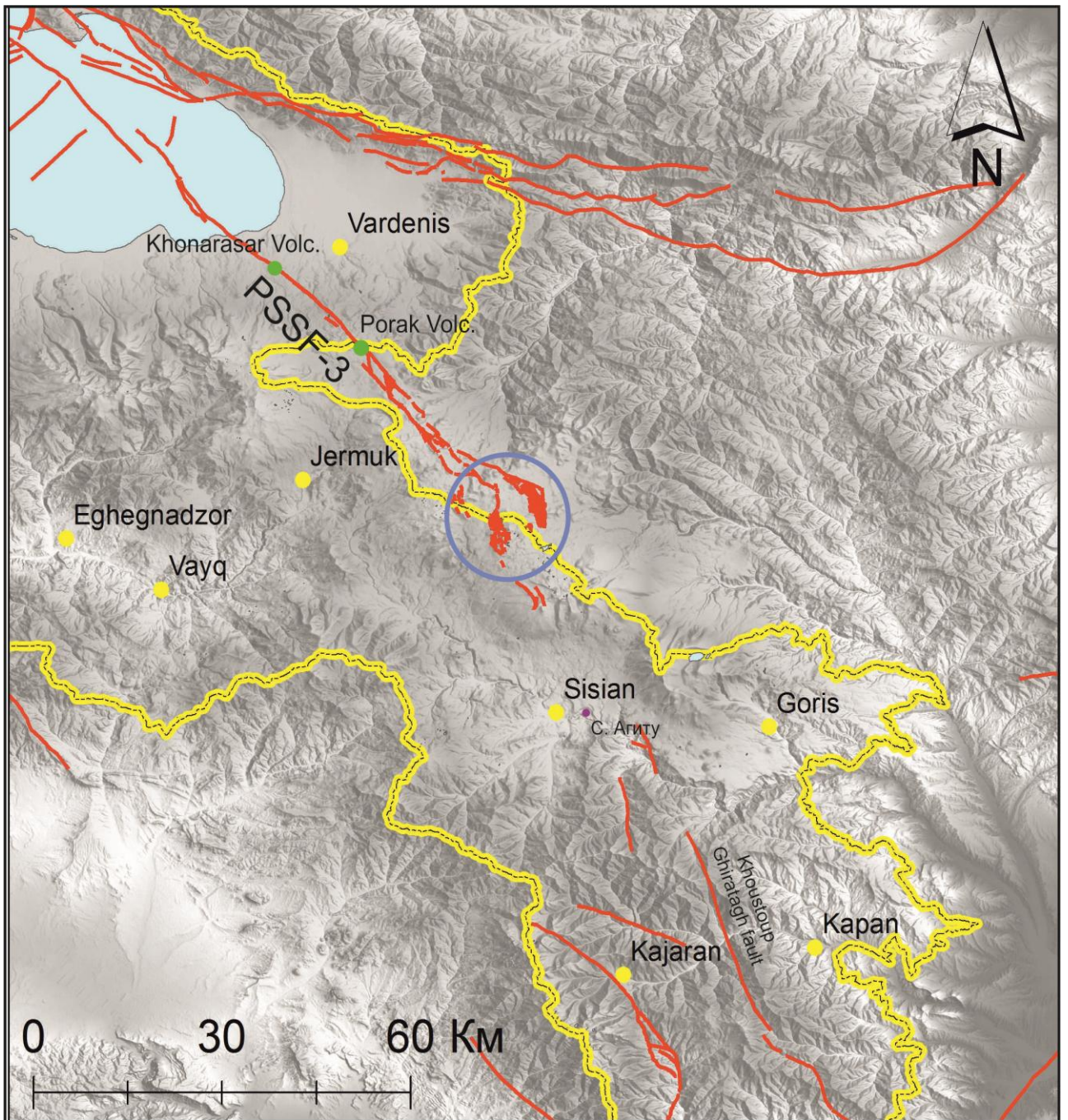


Рис. 4.2. Памбак – Севан – Сюникский разлом. Сегмент 3. 1 – Вулканы, 2 – Города, 3 – Село Агиту, 4 – Активные разломы, 5 – Границы РА. Кругом отмечены зона структуры pull-apart.

Можно предполагать, что тектоническая активность разлома являлась катализатором для извержений вулкана Порак.

Вулкан Порак с высотой 3046 м находится примерно в 15 км к юго-востоку от вулкана Хонарасар. Его относительная высота - около 335 м. В основном вулкан сложен пирокластическими материалами.

К югу от вулкана Порак наблюдаются два параллельных сегмента разлома, которые имеют сдвиговую кинематику со сбросовой компонентой. Высота эскарпов варьирует в среднем от 2 до 3 м, а южнее доходит до десятка метров. На данном участке PSSF разлом формирует структуру pull-apart (рис. 4.2).

Западный и восточный борта впадины pull-apart ограничены системами разломов, состоящими из 8-10 сближенных ветвей разлома. Системы сближенных разломов формируют очень хорошо выраженные в рельефе эскарпы со смещениями по вертикали от 3-5 до 20-50 метров и по горизонтали от 270 до 1000 м. Плоскости этих разломов геликоидально закручены и падают внутрь впадины pull-apart. Проведенные в 2009 году структурно-геологические и геохимические исследования, магнитотеллурическая съемка, анализ данных детальных гравитационных и МТ съемок, проведенных ранее, позволили предложить геологическую модель Сюникской структуры pull-apart (Karakhanayan et al., 2011).

Разломы, ограничивающие по бортам структуру pull-apart, образуют на глубине негативную “цветочную” структуру, в центре которой расположены каналы извержений плейстоценовых и голоценовых вулканов и их лавовые поля (Իգիթյան, 2017; Баласанян 2017; Seismic, 2011). Подобное структурное расположение способствовало возникновению интенсивных локальных растяжений и проявлений плейстоценового и голоценового вулканизма. Интересно, что наряду с интенсивным голоцен-историческим вулканизмом, структура Сюникского pull-apart характеризуется следами поверхностных разрывов от сильных землетрясений.

И на западном, и на восточном ограничениях впадины pull-apart палеосейсмологическими и археосейсмологическими исследованиями, проведенными совместно со специалистами из Франции (Университет Монпелье-2) и России (Геологический институт РАН), зафиксированы разрывы от землетрясений с $M=7.2-7.4$. Поверхностные разрывы, возникшие при этих землетрясениях, сместили стены археологических сооружений, относящихся к периоду среднего и позднего

бронзового века, расположенных как на западном ограничении структуры “pull-apart”. На южном окончании структуры pull-apart палеосейсмологические исследования и датировки методом C14 и OSL зафиксировали землетрясения возрастом 3700, 7800 и 8500 лет ВР. Сильные землетрясения с $M=7.0-7.4$, сопровождаемые поверхностными разрывами длиной в десятки километров, зафиксированы вдоль разломов к северу от участка Каркар, на расстоянии 14 км и 35 км (Karakhanyan et al, 2011, Karakhanyan et al, 2016).

4.1.2 Хуступ – Гиратахский разлом

Хуступ – Гиратахский разлом был прослежен от села Татев на северо – западе до реки Аракс на юго-востоке на протяжении более 80 км. В северо-западном направлении разлом уходит под молодые лавы (Габриелян и др., 1959, Асланян 1958) (рис. 4.2).

В геологическом отношении Хуступ – Гиратахский разлом является границей двух различно построенных геотектонических зон – Сомхето-Кафанской на северо-востоке и Центрально-Армянской на юго-западе. Слагающие зону сочленения породы сложены в крутые, сильно сжатые складки, интенсивно перемяты. Вдоль разлома расположены многочисленные термально-минеральные источники, а также локализуются эпицентры землетрясений. В речных долинах севернее села Шишкерт, у селений Гиратах и Сваранц наблюдаются оползни (Габриелян и др., 1981).

Разлом имеет взбросовый характер с опущенным западным и приподнятым восточным крыльями. Амплитуда смещения более 1 км (Габриелян и др., 1981).

4.2. Феномен разжижения грунта недалеко от села Агиту.

4.2.1. Обнажение 1.

В 2002 году группой Ч. Коннора из университета Южной Флориды недалеко от села Агиту были обнаружены обнажения, на которых отчетливо была видна дайка песка, внедренная в верхние слои. Полученные данные не были проанализированы и

опубликованы. В 2017 году данные обнажения были проанализированы автором совместно с А. Караханяном. Информация и фотографии 2002 года были интерпретированы как свидетельство феномена разжижения грунта. Был сделан панорамный снимок найденного обнажения (рис. 4.4 а) и его схематический рисунок (рис. 4.4 б). На схематическом рисунке 2002 года, после последующей интерпретации отчетливо видна дайка песка, внедренного в верхние слои. Дайка была частично деформирована вследствие горизонтального перемещения грунта.

На фотографии 2002 года также был зафиксирован слой галечных отложений, предположительно разорванный внедренным под поровым давлением песком. Над слоем внедренного песка имеются курганы, а также стена, предположительно одного возраста с задокументированными захоронениями (рис 4.5).



Рис. 4.4. Выше снимок 2002 г.(а), снизу приведён его схематический рисунок (б). 1 – Слой современной почвы. 2 – Суглинок, 3 – Речные отложения в виде гальки, 4 – Дайка (силла) внедренного песка, 5 – Обвалившийся почвенный слой, 6 – Курганы, 7- Направление смещения, 8 – Направление внедрения песка, 9 – Канал внедрения песка.

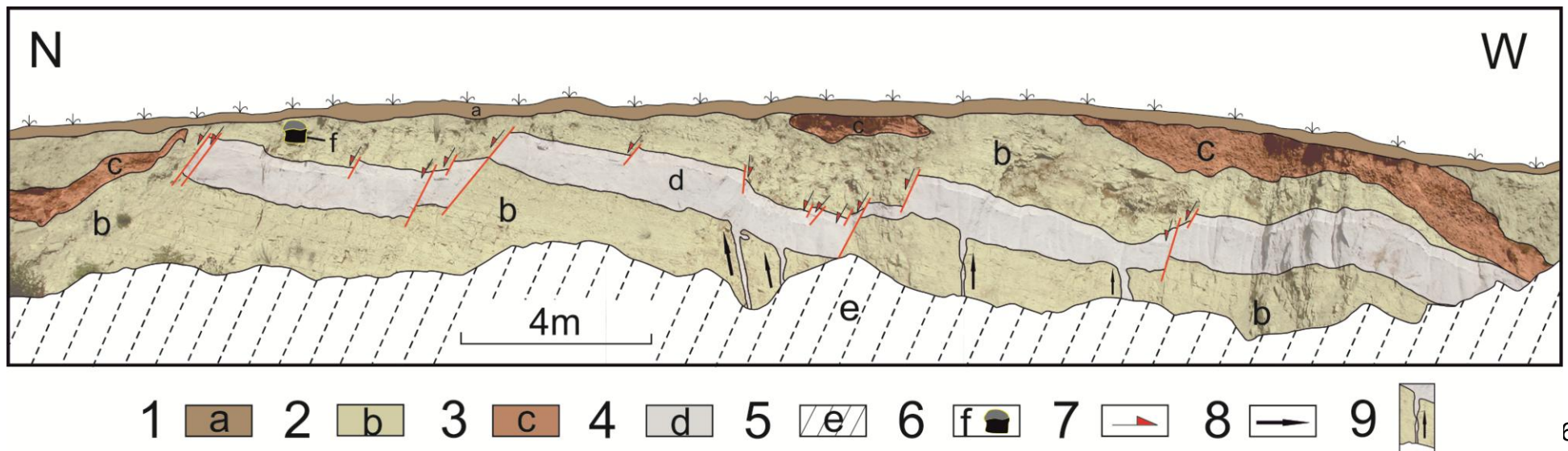




Рис. 4.5. Стена над обнажением 1. Вблизи города Сисиан

Восстановить картину события, зафиксированного в 2002 году, по имеющимся данным не представлялось возможным. Поэтому, в 2017 году автором, в составе группы А. Караханяна, были проведены полевые работы на этом обнажении. Оно было задокументировано как обнажение 1. Было решено повторно проанализировать данные, полученные 2002 году, и был составлен следующий план работ:

1. Повторно задокументировать обнажение, найденное в 2002 году;
2. Попробовать датировать выделенное сейсмическое событие при помощи археосейсмических исследований (датировка возраста кургана для определения пост-даты события);
3. Поиск новых данных для более точного понимания геологического и геофизического контекста Обнажения 1.

Осенью 2017 года обнажение 1 было вновь задокументировано, были сделаны снимки и схематические зарисовки, которые впоследствии были обработаны в программах CorelDraw, Photoshop (рис. 4.7).

Были взяты образцы для гранулометрического анализа. Анализ был проведен в лаборатории ЕГУ при помощи С. Айрояна. Анализ фракций и его интерпретация по методу Цусиды (1971) показали высокую вероятность возникновения феномена разжижения грунта.

Полевые работы 2017 года и составленный схематический рисунок показали, что феномен разжижения грунта недалеко от города Сисиан имеет видимую ширину внедрения 24 метра, а высоту более 5 метров. Подобного размера дайки от разжижения грунта возникают во время горизонтального перемещения грунта во время сильных землетрясений. Согласно международной шкале интенсивности INQUA (Michetti et al., 2004) считается, что если *“разжижение меняет аспект обширных низинных зон, обуславливая вертикальное проседание на глубину, возможно превышающую несколько метров, образование множества больших песчаных вулканов и нескольких структур латерального спрединга”*, то подобного масштаба эффект разжижения грунта возникает при интенсивности X-XI. Международная шкала INQUA, как шкала интенсивности землетрясений, идентична шкале MSK-64.

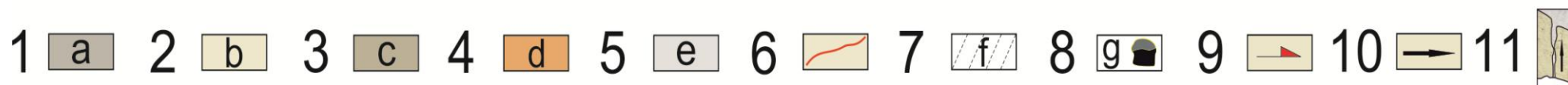
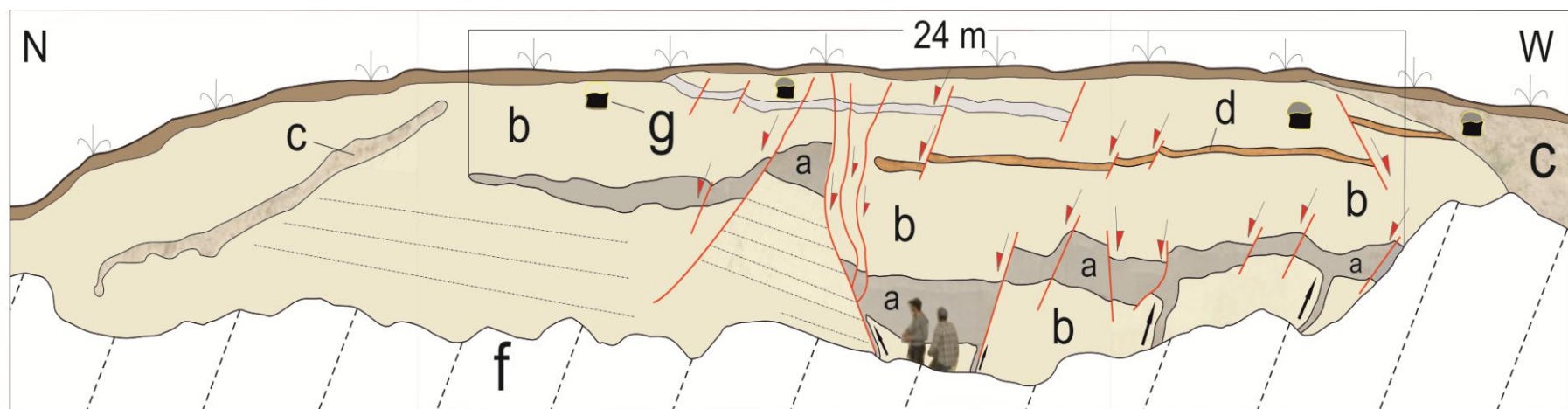


Рис. 4.7. 1 – Дайка (силла) внедренного песка. 2 – Суглинок, 3 – Речные отложения в виде гальки, 4 – Смещенный слой, 5 – Смещенный слой вулканической тефры, 6 – Плоскость смещения, 7 – Обвалившийся почвенный слой, 8 – Курганы, 9 – Направление смещения, 10 – Направление внедрения песка, 11 – Канал внедрения песка

Были задокументированы также слои, расположенные выше дайки внедренного песка, которые, в свою очередь, имеют следы смещения (рис 4.7). Речные отложения в виде гальки на обнажении 1 расположены под углом к поверхности. В результате интерпретации данного обнажения мы пришли к выводу, что сейсмические волны произошедшего землетрясения стали триггером для возникновения феномена разжижения грунта. Поровое давление в водонасыщенном песочном слое было настолько высоким, что спровоцировало взрыв. Эффект от потери несущей силы деформировал верхние слои. Деформация проявилась в виде горизонтального смещения и изменения азимута простираия. В пользу данной гипотезы свидетельствует залегание слоя речной гальки на северном фланге обнажения (рис 4.6).



Рис. 4.6. Северный фланг обнажения 1

Внедрение песка под поровым давлением раскололо блок на северном фланге обнажения 1 на несколько частей. Галечные отложения заполнили трещины в данном блоке.

Обнаруженные в 2002 и 2017 году курганы и стена над обнажением 1 могут помочь дополнительно в определении пост-даты землетрясения. В будущем планируется изучить и проанализировать археологические данные по данной территории и пополнить имеющуюся информацию.

4.2.2 Обнажение 2.

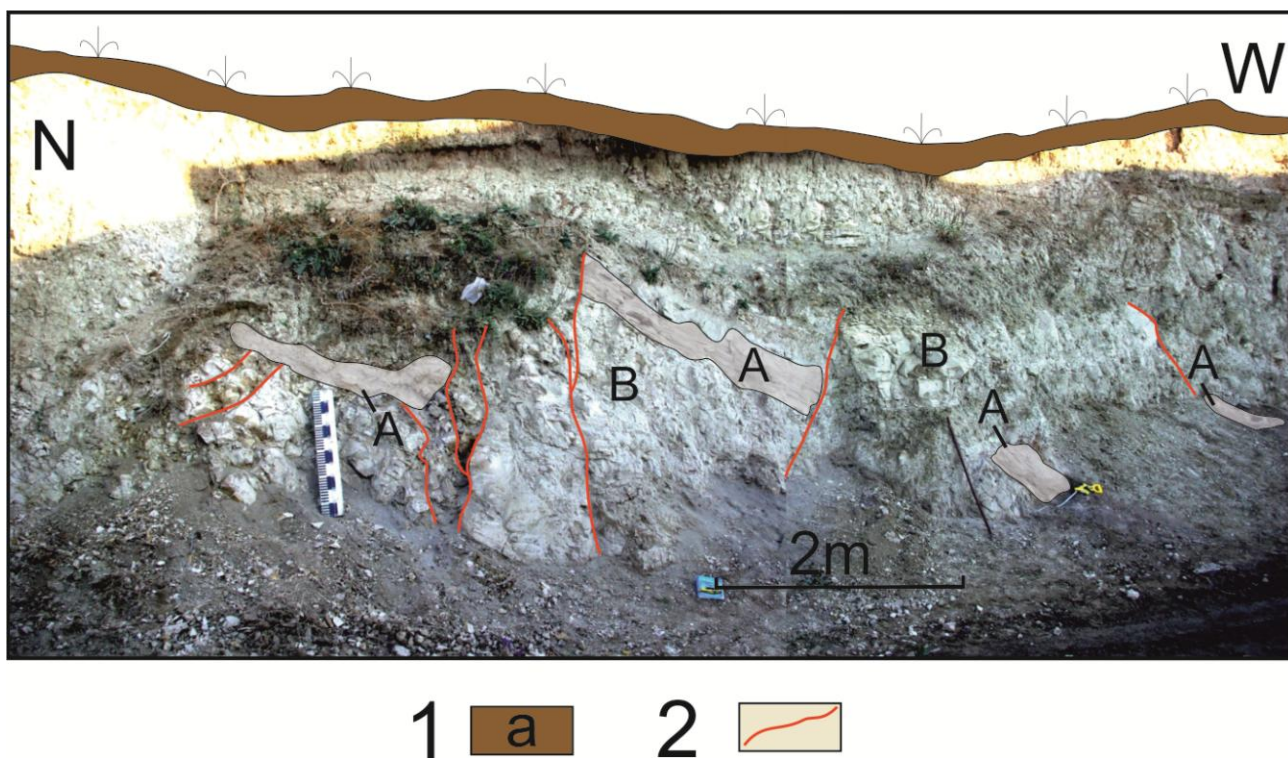


Рис. 4.8. Отчетливо видна деформированная дайка (силла) внедренного песка. 1 – Слой современной почвы. 2 – Трещины, возникшие при внедрении песка. А – Слой внедренного песка. В – деформированный слой.

В 2017 году нами было задокументировано ещё несколько свидетельств разжижения грунта в районе города Сисиан (рис. 4.8, 4.9).

На обнажении, условно названном вторым, ярко выделяется дайка разжижения грунта, разорвавшая слои вплоть до поверхности (рис 4.9). Об этом говорят возникшие трещины, а также изменение азимута простирания деформированных

слоев. Для изотопного анализа C14 нами был взят образец из палеопочвы над внедренным слоем песка. Образец был отправлен в американскую лабораторию Beta Analytic Inc. и в 2017 году была получена дата 1485 - 1650 cal AD для выбранного слоя (приложение 2). Это пост-дата землетрясения, вызвавшего разжижение грунта на обнажениях 1 и 2.

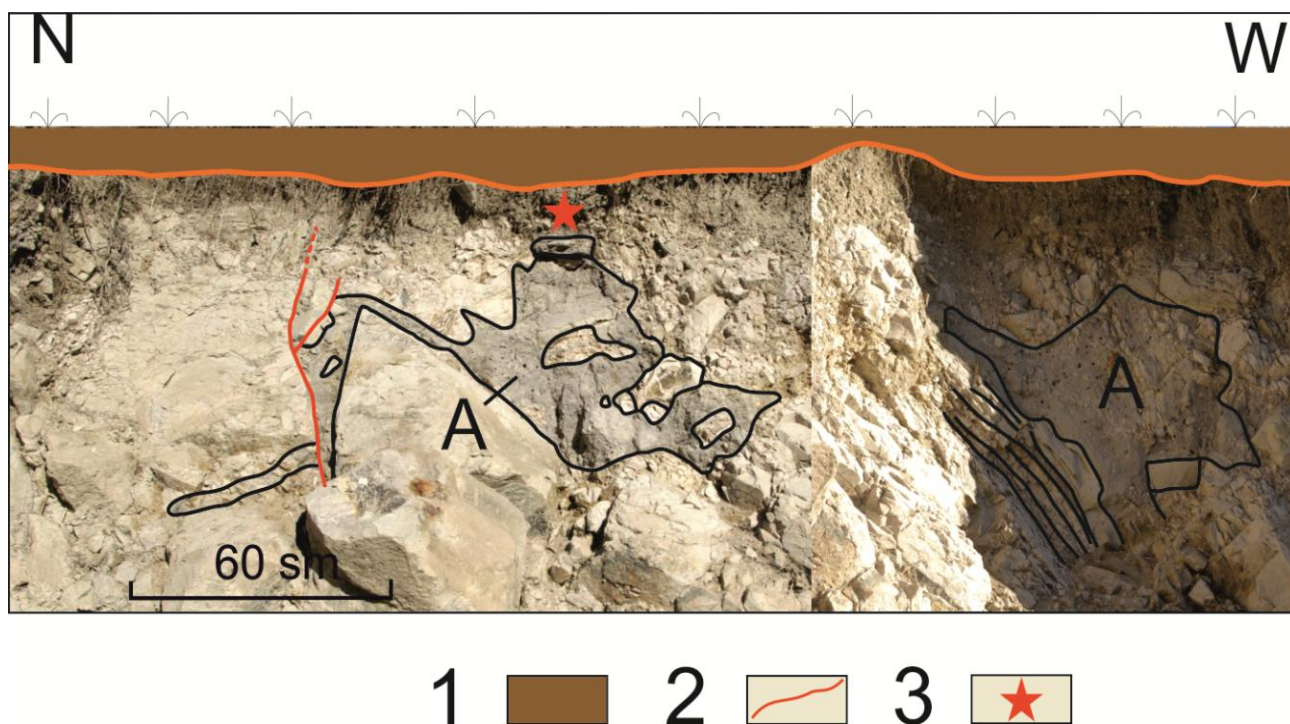


Рис. 4.9. Дайка разжижения грунта, разорвавшая слои вплоть до поверхности. 1 – Слой современной почвы. 2 – трещины, возникшие при внедрении песка. 3 – Проба из палеопочвы, взятая для C14.

4.2.3. Крепость Уйц.

Восточнее города Сисиан, недалеко от села Уйц, расположена Крепость Уйц. Крепость находится на холме, доминируя над ущельем реки Воротан и была активной со времен средней бронзы вплоть до средневековья. Находясь напротив Сюникской крепости, Уйц являлся важным стратегическим объектом для контроля региона, а также ключевых торговых трактов (Zardaryan et al., 2017).

В 2017 году автором, совместно с А. Караханяном и Баласаняном С., были проведены полевые работы на территории крепости Уйц. На исследуемом участке

была обнаружена обвалившаяся стена – следствие воздействия землетрясения. Данный вывод был сделан на основе макросейсмических исследований.



Рис. 4.10. Проба, взятая из слоя палеопочвы из-под обрушенного участка стены.

Образец слоя палеопочвы под обрушенным сегментом стены был взят для проведения изотопного анализа C14 (рис. 4.10). Осенью 2017 года данный образец был отправлен в американскую лабораторию Beta Analytic Inc. Полученный результат дает пре-дату землетрясения - 878 - 1013 cal AD. Все результаты изотопного анализа были откалиброваны оксфордским калькулятором (OxCal 4.3) методом IntCal 13.

4.2.4. Обнажение 3.

Во время полевых работ 2017 года было выделено также обнажение, условно обозначенное номером 3. Обнажение 3 находится между городом Сисиан и селом Агиту (Агуди).



Рис. 4.11. Угловое несогласие слоев

Первое, что бросается в глаза на обнажении 3 - это угловое несогласие слоев (рис. 4.11, 4.13). Слои вулканических осадков и озерных отложений, представленных в виде гальки, под воздействием землетрясения сместились, изменив угол падения с

горизонтального на почти вертикальный. Согласно А. Хайну (1995) такого типа угловые несогласия свидетельствуют о наличии разлома.

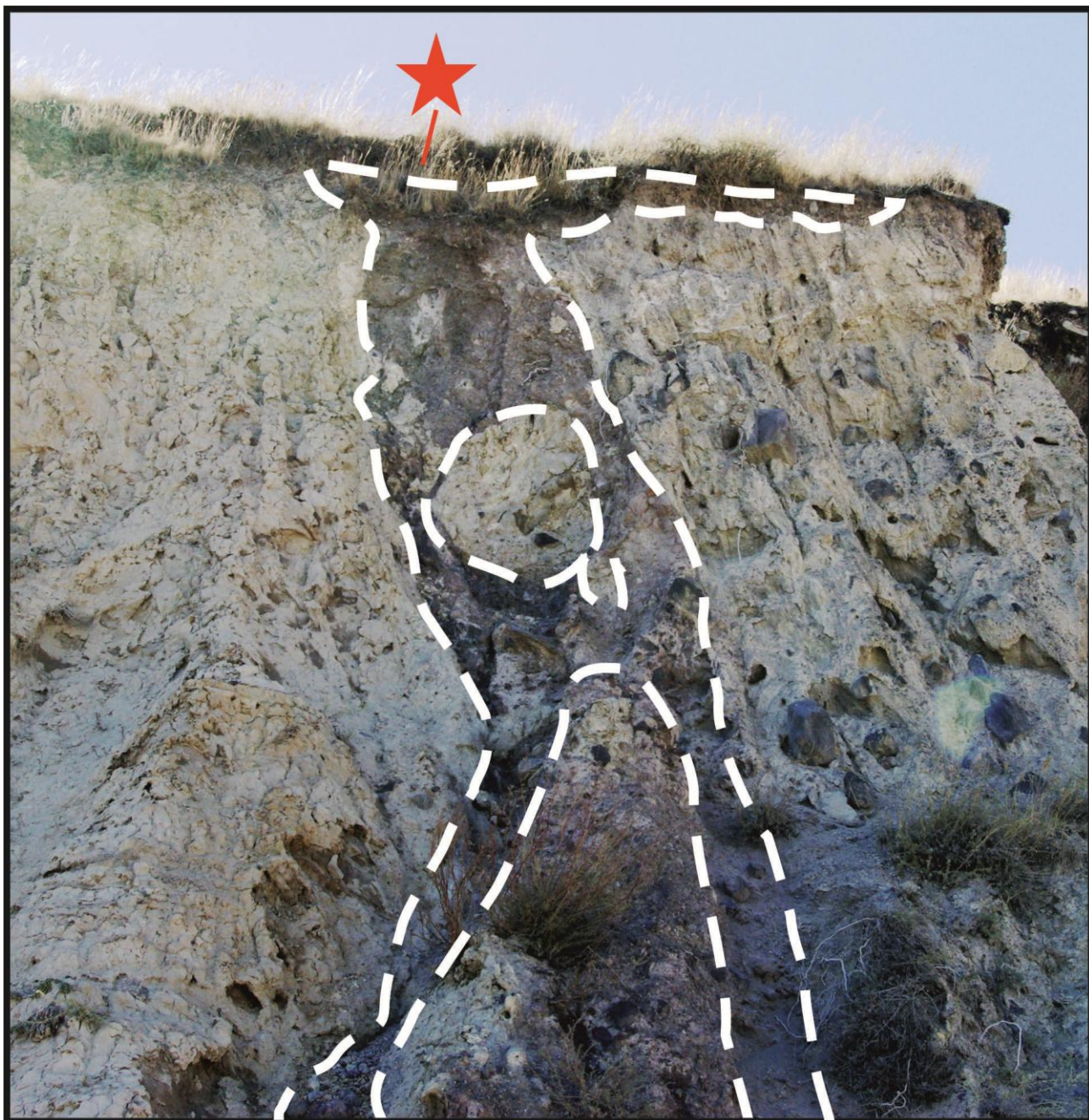


Рис. 4.12. Дайка разжижения грунта (выделена белым пунктиром) с обломками вмещающих пород. Место отбора пробы, взятой из палеопочвы для анализа С14, отмечено красной звездой.

В 10 метрах западнее была задокументирована дайка разжижения грунта (рис. 4.12, 4.13). Внедренный слой песка образовал на поверхности «песчаный кратер», о чем свидетельствуют обломки вмещающих пород внутри дайки разжижения грунта.

Из слоя палео-почвы над кратером была взята проба для С14. В 2017 году лаборатория Beta Analytic Inc. предоставила результаты изотопного анализа - 1726 - 1814 cal AD. Данный результат практически идентичен полученному на обнажении 1 и подтверждает пост – дату события, вызвавшего многочисленные эффекты разжижения грунта и обусловившего угловое несогласие слоев.

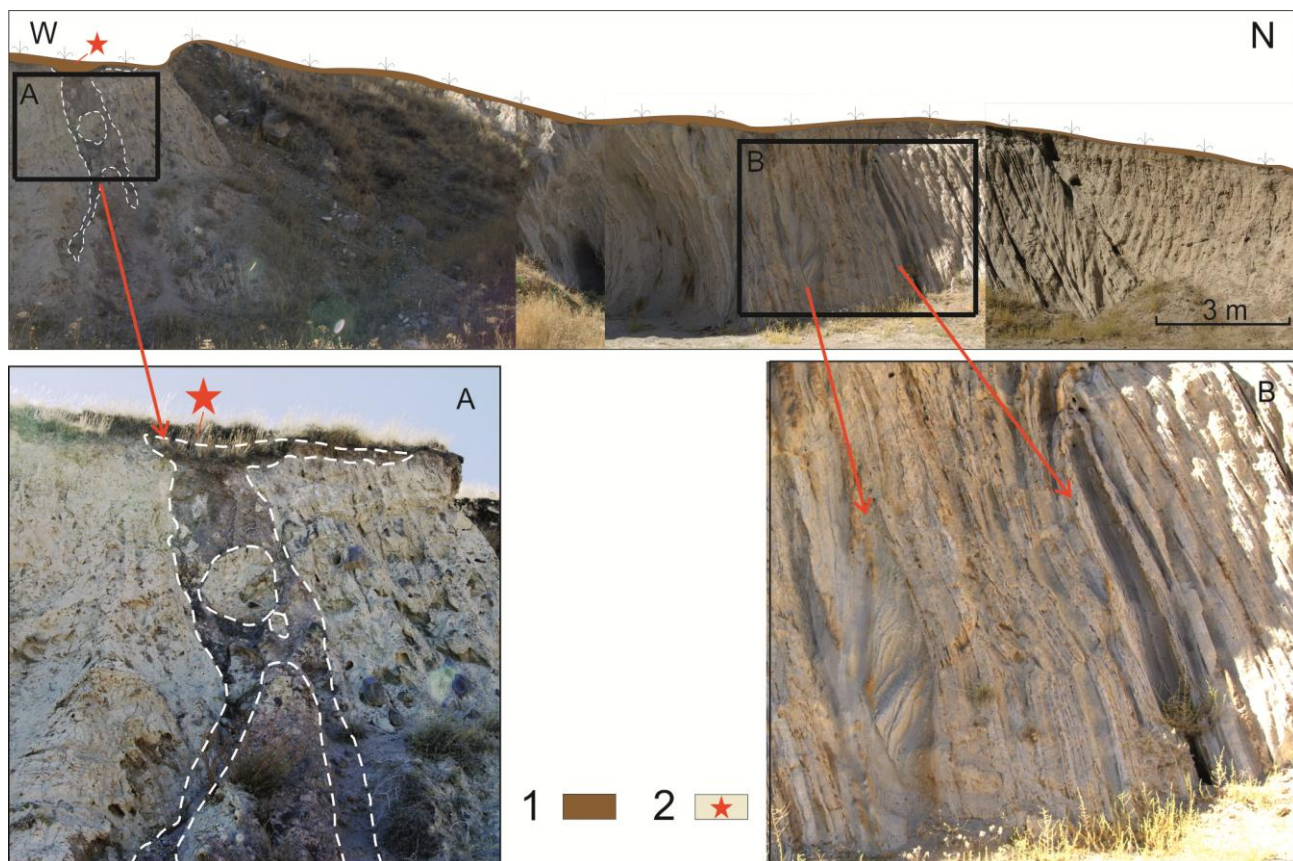


Рис. 4.13. Обнажение 3. Слева дайка разжижения грунта (выделена белым пунктиром) с обломками вмещающих пород. Место отбора пробы, взятой из палеопочвы для анализа С14, отмечено красной звездой. Справа угловое несогласие слоев.

Третий сегмент Памбак – Севан – Сюникского разлома по данным многочисленных исследований образовывал структуру pull-apart на Сюникском плато. Разлом образовывал в данной части структуру «конский хвост» и дальше не прослеживался. Структура, задокументированная автором в 2017 году позволяет предположить, что разлом PSSF продолжается в Хуступ – Гиратахским разломом.

Землетрясение, задокументированное автором, относится к периоду от 878 - 1013 cal AD до 1485 - 1650 cal AD. По данным Гидобони и др (1996), на основе анализа рукописи Матенадарана под номером 9247, было выделено землетрясение 1406 года. Предполагалось, что данное землетрясение было небольшой интенсивности и являлось локальным. Однако повторный анализ рукописей выявил, что землетрясение имело влияние на довольно большую территорию (Монастыри Татев, Воротнаванк и т. д.). Данному землетрясению была присвоена магнитуда 7.0, и эпицентр помещен в район города Сисиан (Seismic, 2011). По моему предположению, данных изотопного анализа C14 достаточно для утверждения, что задокументированный на обнажениях феномен разжижения грунта является вторичным эффектом землетрясения 1406 года.

4.3. Выводы:

Феномен разжижения грунта, задокументированный на обнажениях возле города Сисиан, является явным свидетельством сильного землетрясения с интенсивностью X-XI (INQUA, MSK-64).

Обнаруженное недалеко от города Сисиан угловое несоответствие слоев свидетельствует о наличии скрытого разлома, являющегося источником сильного землетрясения. Причиной феномена разжижения грунта могло послужить землетрясение на данном разломе.

Изотопный анализ органики палеопочвы (C14) относит данное событие к периоду от 878 - 1013 cal AD до 1485 - 1650 cal AD. Согласно каталогу исторических землетрясений (Seismic, 2011) в данном регионе фиксируется землетрясение 1406 года магнитудой 7.0. Автор склонен приписывать задокументированные свидетельства феномена разжижения грунта землетрясению 1406 года. Дальнейшие макросейсмические исследования могут привести к уточнению эпицентра землетрясения 1406 года и фиксации его на выявленном разломе.

Считаю, что указанных данных достаточно для утверждения о предполагаемом продолжении Памбак-Севан-Сюникского разлома Хуступ-Гиратахским разломом.

На основе изложенного формулируются защищаемое положение диссертации:

Феномен разжижения грунта, задокументированный в четвертичных обнажениях возле г. Сисиан, является свидетельством сильного землетрясения с интенсивностью X-XI (INQUA, MSK-64), произошедшим между 878 - 1013 cal AD и 1485 - 1650 cal AD. Этот феномен, как и обнаруженное угловое несогласие в позднечетвертичных слоях стали результатом подвижки по разлому при сильном землетрясении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5.1. Феномен разжижения грунтов и сейсмотектоника.

Сардарapatская структура, принимая во внимание открытый вопрос её возникновения и отсутствие задокументированных сильных землетрясений, многими учеными рассматривалась, как погребенный древний разлом. При оценке сейсмической опасности для ААЭС Сардарapatской структуре был присвоен низкий ранг достоверности. Новые данные, полученные при помощи геолого-геофизических и лабораторных работ доказали активность Сардарapatского разлома и позволили провести вероятную трассу данного разлома (рис 2.5, 5.1).

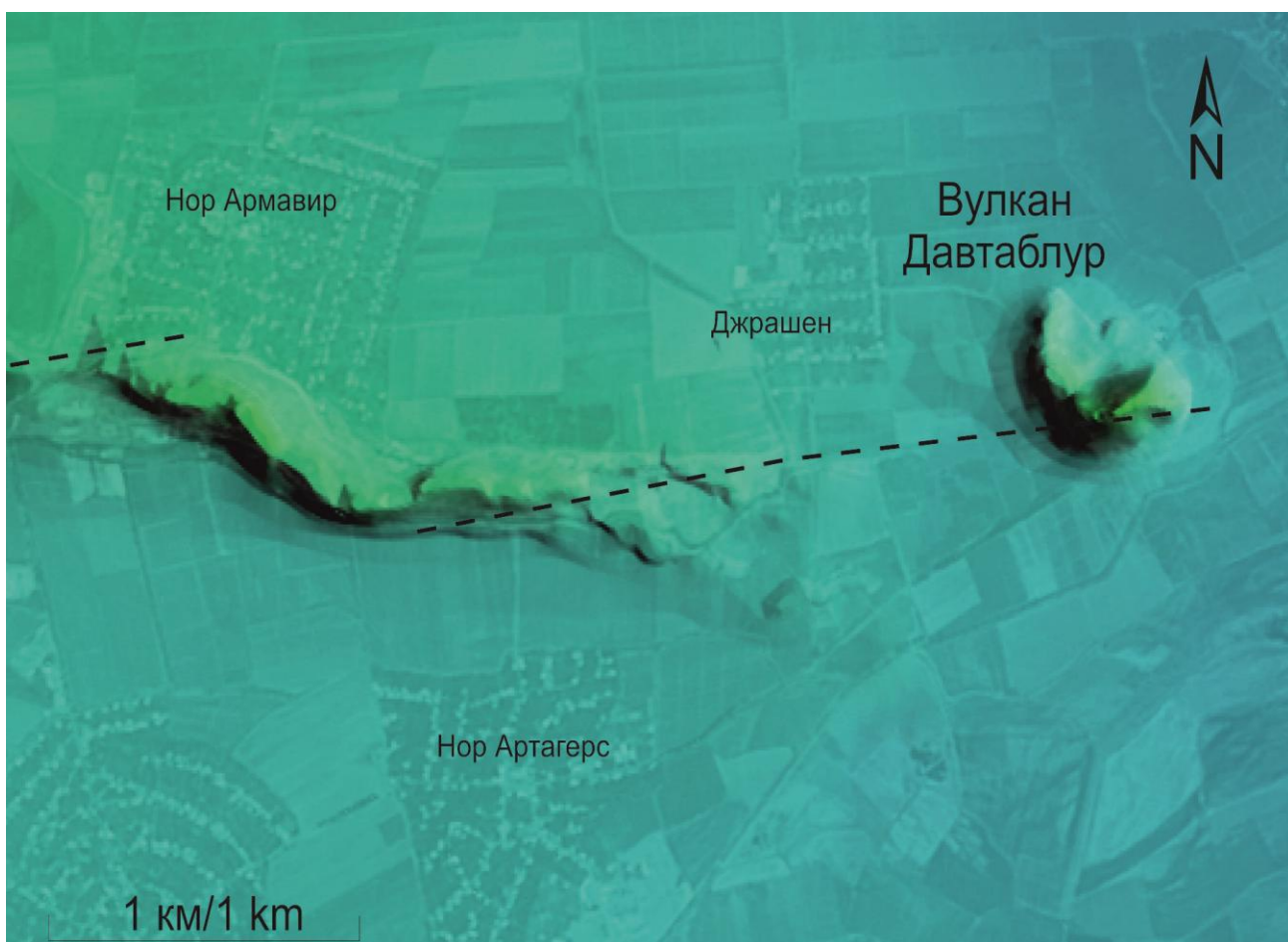


Рис. 5.1. Вероятная трасса Сардарapatского разлома (пунктир).

Сравнивая размеры внедрения задокументированных свидетельств феномена разжижения грунта, можно сделать вывод о потенциале Сардарapatского разлома.

Дальнейшие исследования в данном регионе геолого-геофизическими методами поможет уточнить трассу разлома.

Выявленные на окраине села Норатус свидетельства феномена разжижения грунта говорят о наличии сильного землетрясения. Сейсмическая угроза для бассейна озера Севан является крайне важным вопросом. Прделанная работа улучшила понимание механизмов активных разломов бассейна. Автор считает необходимым продолжение исследований береговой линии озера Севан с целью обнаружения новых деформаций, вызванных разжижением груна, а так же из детального изучения.



Рис. 5.2. Активные разломы (красные линии согласно ST-Georisk).
Задокументированные дайки феномена разжижения грунта.

Феномен разжижения грунта вблизи города Сисиан Сюникского автономного округа является свидетельством сильного землетрясения. Детальные полевые исследования и изотопный анализ C14 позволили дать приблизительную оценку интенсивности землетрясения и его датировку. Однако, в течении полевых работ, были зафиксированны ещё несколько обнажений, которые требуют дополнительного изучения. Пример одного из таких обнажений показан на рисунке 5.3.

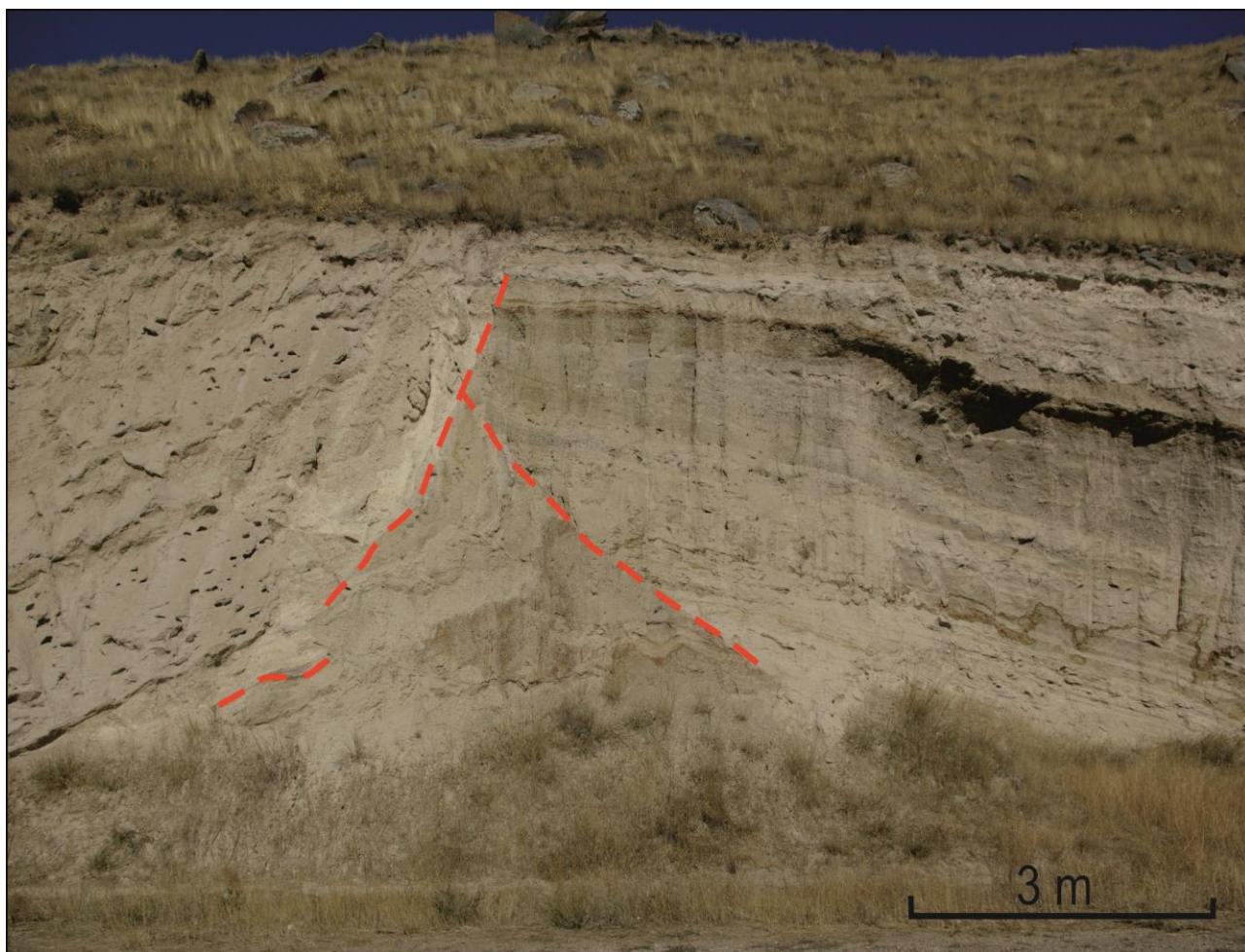


Рис. 5.3. Угловое несогласие слоев, предположительно вызванное феноменом разжижения грунта.

На данном обнажении фиксируются горизонтально залегающие слои (справа), которые не прослеживаются на левой части обнажения. Автор предлагает гипотезу образования данного обнажения: под поровым давлением слой водонасыщенного песка создает эффект взрыва и деформирует верхние слои. Дальнейшее изучение найденных обнажений уточнит причину их образования.

Сопоставив результаты изотопных анализов, взятых из обнажений недалеко от города Сисиан, с имеющимся историческим каталогом, автор пришел к выводу, что феномен разжижения грунта возникло как вторичный эффект землетрясения 1406 года ($M=7.0$). однако данную информацию необходимо удостоверить при помощи дальнейших исследований данного региона.

Суммируя результаты выполненных автором исследований проявлений сейсмического разжижения грунта на территории Армении, можно утверждать, что, во-первых, они позволили определить или более достоверно оценить мощность, и датировку некоторых сейсмических событий и уточнить сейсмический потенциал отдельных активных разломов и сейсмических зон. Во-вторых, работа автора наглядно показала, что изучение сейсмического разжижения грунта как источника дополнительных воздействий землетрясений на человека и среду его обитания, нуждается в дополнительных исследованиях, которые должны охватывать не только сеймотектонику, но и углублённое изучение четвертичных отложений и гидрогеологии.

5.2. Выводы и рекомендации:

- Оценка сейсмической опасности остается актуальной для территории Армении по сей день. Новые методики, позволяющие пополнить каталог землетрясений, существенно повысят качество оценки сейсмического риска. Феномен разжижения грунта, как маркер палеосейсмичности, является очень интересным и важным объектом для будущих исследований.
- Данные, полученные при изучении Сардарapatской структуры, однозначно свидетельствуют о том, что она является активным разломом со взбросовым механизмом подвижки и сейсмогенной зоной с потенциалом $M= 6.6-7.0$ и со следами поверхностного разрыва и разжижения грунта от сильного землетрясения, произошедшего в период между VIII веком и II веком до РХ. (Участок Сардарapatской структуры)

- На окраине села Норадус фиксируются многочисленные следы разжижения грунта от землетрясения с интенсивностью около IX-X по шкале MSK 64 (Бассейн озера Севан).
- Результаты взятых проб для изотопного анализа свидетельствуют о том, что зафиксированное на окраинах села Норатус землетрясение произошло в промежутке от 30959 ± 331 cal BP до 7288 ± 20 cal BP (Бассейн озера Севан).
- Феномен разжижения грунта, задокументированный на обнажениях возле города Сисиан, является явным свидетельством сильного землетрясения с интенсивностью X-XI (INQUA, MSK-64) (PSSF-3).
- Обнаруженное недалеко от города Сисиан угловое несогласие слоев свидетельствует о наличии скрытого разлома, являющегося источником сильного землетрясения. Причиной образования феномена разжижения грунта может выступить землетрясение на данном разломе (PSSF-3).
- Изотопный анализ органики палеопочвы (C^{14}) относит задокументированное в Сюнике событие к периоду от 878 - 1013 cal AD до 1485 - 1650 cal AD. Согласно каталогу исторических землетрясений в данном регионе фиксируется землетрясение 1406 года магнитудой 7.0. Автор склонен приписывать задокументированные свидетельства феномена разжижения грунта землетрясению 1406 года. Дальнейшие макросейсмические исследования могут привести к уточнению эпицентра землетрясения 1406 года и фиксации его на выявленном разломе (PSSF-3).
- Прделанная работа и полученные данные позволяют предположить продолжение Памбак-Севан-Сюникского разлома Хуступ-Гиратахским разломом. Дальнейшие исследования в данном регионе могут подтвердить или опровергнуть данную теорию (PSSF-3).

На основе изложенного формулируется защищаемое положение диссертации:

Выявленные автором в Армении явления разжижения грунта при сильных исторических и доисторических землетрясениях позволили уточнить параметры этих землетрясений и сейсмический потенциал активных разломов, с которыми такие землетрясения связаны.

Список использованной литературы

1. Асланян А.Т. Региональная геология Армении. Айпетрат, Ереван, 1958г, 430с.
2. Баласаян С.В. Результаты исследований особенностей активной тектоники восточной ветви Сюникской структуры pull-apart. Изв. НАН РА, Науки о Земле, 2017, т.70, № 2, с.50-58.
3. Варданянц Л.А. О происхождении озера Севан. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1948, стр. 39-60.
4. Габриелян А.А. Основные вопросы тектоники Армянской ССР. АН Арм.ССР, Е., 1959г., 184с.
5. Габриелян А.А., Саркисян О.А., Симонян Г.П. Сейсмоструктура Армянской ССР. ЕГУ, Ереван, 1981, 284с.
6. Караханян А., Баласаян С., Макарян Х., Геворкян М. «Сардарапатская структура (Армения): новые данные о сейсмической активности». Устойчивое развитие горных территорий. Россия, Республика Северная Осетия-Алания, 2017, стр 332-342.
7. Караханян, А. К., Минасян, Дж. О., Варданян, А. А., 1994. О некоторых особенностях ферромагнитного состава вулканогенных пород Армении. ՀՀ ԳԱԱ Տեղեկագիր. Գիտություններ Երկրի մասին, 47 (3), стр. 66-69. ISSN 0515-961X
8. Корженков А.М., Аванесян М.А., Вирджино А., Караханян А.С. 2014. Сейсмогенные конволюции в четвертичных отложениях озера Севан (Армения). Геология и геофизика, т. 55, № 1, стр. 56—65.
9. Макарян, Х. В. Норатусская перемычка: гипотезы образования и их реанализ (Армения). ՀՀ ԳԱԱ Տեղեկագիր. Գիտություններ Երկրի մասին, 2017, 2. pp. 66-74.
10. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
11. Милановский Е. Е. Новейшие данные о строении неогеновых и четверичных отложений бассейна озера Севан., Москва 1952, 115–145 стр.
12. Мартиросян, А.А., 1974. «Аргиштихинили». Археологические памятники Армении, 8; Урартские памятники, вып. 1, Ереван: Изд-во АН Армении, 176 стр.
13. Мкртчян С. С. Геологическая карта Армянской ССР масштаба 1:600 000. 1971.

14. Мкртчян С. С., Карамян К. А., Аревшатын Т. А. "Каджаранское медно-молибденовое месторождение", 1969, Институт геологических наук НАН РА, стр. 336.
15. Пафенгольц К.Н. Геология Армении. Гос. изд. Геол. литер. Министерства Геологии СССР, Москва, 1948, 895 с.
16. Пирузян С.А., Опыт детального сейсмического районирования территории Большого Ереванского района. Изд. Айастан, Ереван, 1969, 90 стр.
17. Сатиян М. А., Степанян Ж. О., Мхитарян Р. А., Мкртчян Г. М., Бубикян С.А., Курингарян Э. Н., Чубарян Г. А., Саядян Ю. В., Амарян В. М., Харазян Э. Х., Карапетян К. И., Мурадян П. Л., Минасян Р. С., Баласанян В. С., Караханян А. С., Чилингарян Г. В. Геология Севана, Изд. НАН РА, Ереван, Армения 1994, 183стр.
18. Саядян Ю. В. Новейшая геологическая история Армении, Изд. «Гитутюн» НАН РА, Ереван 2009.
19. Тирацян Г. А. (1978). "Урартский Армавир (По данным археологических раскопок). Культура востока: древность и раннее средневековье" Ленинград, РФ, 106 стр.
20. Трифонов В.Г., Караханян А.С., 2004. Геодинамика и история цивилизаций, Труды Геологического института РАН, вып. 553. Наука, Москва, 668 стр.
21. Трифонов В.Г., Караханян А.С., 2008. Динамика Земли и развитие общества. Труды Геологического института РАН, вып. 585. ОГИ, Москва. 436 стр.
22. Хаин, В. Е., Ломизе, М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. Учебник для студентов геологических специальностей вузов. М: Изд-во МГУ, 1995 г. 480 с.
23. Чернышев И.В., Лебедев В.А., Аракелянц М.М., Джрбашян Р.Т., Гукасян Ю.Г. Четвертичная геохронология Арагацкого вулканического центра (Армения) по данным К-Аг датирования. ДАН РФ, т. 384, 2002, № 1, с. 95-102.
24. Ավագյան Ա.Չ., «Ակտիվ խզվածքների մերձմակերեսային դրսևորումները շրջակա միջավայրում», Ատենախոսություն, ԳԱԱ, Երկրաբանական գիտությունների ինստիտուտ, Երևան, 2013, 292 էջ:
25. Ավագյան, Ա. Չ., Սահակյան, Լ. Հ., Աթալյան, Թ.Պ., Հովակիմյան, Հ. Գ. and Թոզալարյան, Պ. Վ. Նոր տեկտոնական տվյալներ Նորատուս-Քանազեղ ակտիվ

- խզվածքի տարածման գոտում. ՀՀ ԳԱԱ Տեղեկագիր. Գիտություններ Երկրի մասին, 2017, 1. pp. 60-75.
26. Հայաստանի Հանրապետության երկրաբանական 1:500 000 քարտեզ, Ե. Խարազյանի խմբագրությամբ, Երևան, 2005թ.,
27. Իգիթյան Հ. Ա., «ԱԿՏԻՎ ԽՁՎԱԾՔՆԵՐԻ ԳՈՏԻՆԵՐԻ ԼԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԵՐԿՐԱԲԱՆԱԿԱՆ ԵՎ ԳԵՈՌԱԴԱՐԱՅԻՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ (ՓԱՄԲԱԿ-ՍԵՎԱՆ-ՍՅՈՒՆԻՔ ԱԿՏԻՎ ԽՁՎԱԾՔԻ ՕՐԻՆԱԿՈՎ)», Ատենախոսություն, ԳԱԱ, Երկրաբանական գիտությունների ինստիտուտ, Երևան, 2017, 116 էջ.
28. Ստեփանյան, Վ. Ա., 1964. Երկրաշարժերը Հայկական Լեռնաշխարհում և նրա մերձակայքում: Հայաստան» հրատարկչություն, Երևան, 342 էջ.
29. Ambraseys, N.N., and Melville, C.P., 1982, A History of Persian Earthquakes: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 219 p.
30. Ambraseys N.N. Engineering seismology. Earthquake engineering and structural dynamics // J. Int. Assoc . Earthquake Eng., 1988, v. 17, p. 1—105.
31. Asatryan G., Danelian T., Sahakyan L., Person A., Avagyan A., Sosson M. Evidence of Late Middle Jurassic to lower Cretaceous Tethyan oceanic lithosphere in the Lesser Caucasus based on new palaeontological (radiolarian) dating of the sedimentary cover of Sevan ophiolite (Armenia) 2010, Ofioliti 35, p. 91-101.
32. Avagyan, A., 2009, Active faulting and related seismic hazard in the Vanadzor depression area: Proceedings of the National Academy of Sciences of Armenia—Earth Science, v. 62, no. 2, p. 48–57.
33. Avagyan, A., Sosson, M., Philip, H., Karakhanian, A., Rolland, Y., Melkonyan, R., Rebai, S., and Davtyan, V., 2005, Neogene to Quaternary stress field evolution in Lesser Caucasus and adjacent regions using fault kinematics analysis and volcanic cluster data: Geodinamica Acta, v. 18, no. 6, p. 401–416, doi:10.3166/ga.18.401-416.
34. Avagyan, A., 2001, Estimation of the Slip Rates and the Recurrence Intervals of Strong Earthquakes on the Fault System of Pambak-Sevan-Syunik(Armenia): Segmentation and Relation with Volcanic Activity [Ph.D. thesis]: Montpellier, France, Montpellier II University, 246 p.

35. Brown, K., 2000, 2000, Tsunami! At Lake Tahoe? Surprised tourists could catch the ultimate wave: *Science News*, v. 157, no. 24, p. 378, doi:10.2307/4012358.
36. Connor C., Connor, L., Halama, R., Meliksetian, K., Savov, I. (2011). *Volcanic Hazard Assessment of the Armenia Nuclear Power Plant Site, Final Report*. University of South Florida, Tampa, Florida, Leeds University, Leeds, England, GeoRisk, Yerevan, Armenia. 278 pp
37. Connor, L. J., Connor, C. B., Meliksetian, K., and Savov, I. (2012), Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia *Journal of Applied Volcanology* 2012, 1:3.
38. Davtyan, V., 2007, *Active Faults of Armenia: Slip Rate Estimation by GPS, Paleoseismological and Morpho-Structural Data* [Ph.D. thesis], Montpellier, Montpellier II University, France, 244 p.
39. Elliott J. R., Copley A. C., Holley R., Scharer K. & Parsons B. (2013). The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake. *J. Geophys. Res.* 118, 1619–1637.
40. Fielding E. J., Lundgren P. R., Taymaz T., Yolsal-Cevikbilen S. & Owen S. E. (2013) Fault-slip source models for the 2011 Mw 7.1 Van Earthquake in Turkey from SAR Interferometry, Pixel Offset Tracking, GPS, and Seismic Waveform Analysis. *Seismol. Res. Lett.* 84, 579–593.
41. Guidoboni, E., Traina, G., 1995. A new catalogue of earthquakes in the historical Armenian area from antiquity to the 12th century, *Ann. Geofis.* 38(1), 85–147.
42. Ichinose, G.A., Anderson, J.G., Satake, K., Schweickert, R.A., and Lahren, M.M., 2000, The potential hazard from tsunami and seiche waves generated by large earthquakes within Lake Tahoe, California-Nevada: *Geophysical Research Letters*, v. 27, p. 1203–1206.
43. Karakhanyan, A., Arakelyan, A., Avagyan, A., Baghdasaryan, H., Durgaryan, R., and Abgaryan, Ye., 2011, *The Seismotectonic Model, Seismic Hazard Assessment for the Construction Site of a New Power Unit of the Armenian NPP: “NorAtom” Consortium Final Report*, Yerevan, Ministry of Energy of the Republic of Armenia, Vienna, IAEA, p. 328.

44. Karakhanian, A., Djr bashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S., and Avagian, A., 2002, Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factor for Armenia and adjacent countries: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 113, no. 1–2, p. 319–344, doi:10.1016/S0377-0273(01)00264-5.
45. Karakhanian, A., Trifonov, V.G., Azizbekian, O.G., and Hondkarian, D.G., 1997, Relationship of late Quaternary tectonics and volcanism in the Khonarassar active fault zone, the Armenian Upland: *Terra Nova*, v. 9, no. 3, p. 131–134, doi:10.1046/j.1365-3121.1997.d01-11.x.
46. Karakhanian, A., Trifonov, V., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, Kh., Jamali, F., Salih Bayraktutan, M., Bagdassarian, H., Arakelian, S., Davtian, V., and Adilkhanyan, A., 2004, Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran: *Tectonophysics*, v. 380, no. 3–4, p. 189–219, doi:10.1016/j.tecto.2003.09.020.
47. Karakhanyan, A., Arakelyan, A., Avagyan, A., Baghdasaryan, H., Durgaryan, R., and Abgaryan, Ye., 2011, The Seismotectonic Model, Seismic Hazard Assessment for the Construction Site of a New Power Unit of the Armenian NPP: “NorAtom” Consortium Final Report, Yerevan, Ministry of Energy of the Republic of Armenia, Vienna, IAEA, p. 328.
48. Karakhanyan A., Arakelyan A., Avagyan A., Sadoyan T. Aspects of the seismotectonics of Armenia: New data and reanalysis, in Sorkhabi, R., ed., *Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian’s Forty-Five Years of Research Contributions: Geological Society of America Special Paper 2016*, 525, doi:10.1130/2016.2525(14). © 2016 The Geological Society of America.
49. Karakhanyan A., Badalyan R., Harutyunian A., Avagyan A., Philip H., Davtyan V., Alaverdyan G., Makaryan K., and Martirosyan M. Archaeoseismological studies at the Pambak-Sevan-Syunik fault system, Armenia, in: Sorkhabi, R., ed., *Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian’s Forty Years of Research Contributions: Geological Society of America Special Paper 525-15*, 2016, p. 21.
50. Karakhanian, A.S., Vernant, P., Doerflinger, E., Avagyan, A.V., Philip, H., Aslanyan, R., Champollion, C., Arakelyan, S., Collard, P., Baghdasaryan, H., Peyret, M., Davtyan,

- V., Calais, E., Masson, F., 2013. GPS constraints on continental deformation in the Armenian region and Lesser Caucasus. *Tectonophysics* 592, 39-45.
51. McCalpin, J.P., ed., 1996, *Paleoseismology*: London, Academic Press, 583p.
52. Michetti, A. M., Esposito, E., Gurpinar, A., Mohammadioun, B., Mohammadioun, J., Porfido, S., Rogozhin, E., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Audermand, F., Comerci, V., Marco, S., McCalpin, J., and Morner, N.A., 2004, The INQUA Scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment: in Vittori, E. and Comerci, V, editors, *Memorie descriptive della Carta Geologica D'Italia*, vol. LXVII, Special Paper, APAT, Rome, SystemCart Srl, 116 p.
53. Nikonov, A.A., and Nikonova, K.I., 1986, The strongest earthquake in the Trans-Caucasus on September 30, 1139 (reconstruction by the historical, architectural and archeological materials): *Engineering Seismology Issues*, v. 27, p. 152–183.
54. Philip, H., Avagyan, A., Karakhanyan, A., Ritz, J.-F., and Rebai, S., 2001, Slip rates and recurrence intervals of strong earthquakes along the Pambak-Sevan-Sunik Fault (Armenia): *Tectonophysics*, v. 343, no. 3–4, p. 205–232 doi:10.1016/S0040-1951(01)00258-X..
55. Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., Abdullah ArRajehi, Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., and Karam, G., 2006, GPS constraint on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions: *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, v. 111, no. B5, p. 1–26, doi:10.1029/2005JB004051.
56. Seismic Hazard Assessment for the Construction Site of a New Power Unit of the Armenian NPP, February 2011. “NorAtom” Consortium, Final Report, Annex 2, Yerevan, Karakhanyan A.(eds).
57. Seismic Hazard Assessment for the Construction Site of a New Power Unit of the Armenian NPP, February 2011. “NorAtom” Consortium, Final Report, Annex 3,

- Yerevan, Karakhanyan A., Avagyan A., Bagdasaryan A., Avanesyan M., Arakelyan A. (eds).
58. Sengör, A.M.C., 1990, A new model for the late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman, in Robertson, A.H.F., Searle, M.P., and Ries, R.C., eds., *The Geology and Tectonics of the Oman Region*: Geological Society, London, Special Publication 49, p. 797–831.
59. Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites // *Sedimentology*, 1969, v. 13, p. 155—159. Sims J.D. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments // *Tectonophysics*, 1975, v. 29, p. 141—152.
60. Shebalin, N.V., and Tatevossian, R.E., 1997, Catalogue of large historical earthquakes of the Caucasus, in Giardini, D., and Balassanian, S., eds., *Historical and Pre-historical Earthquakes in the Caucasus*: International Lithosphere Program Publication 333, NATO Advanced Study Institute (ASI) Series 28: Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 201–232, doi:10.1007/978-94-011-5464-2_12.
61. Sosson, M., Rolland, Y., Muller, C., Danelian, T., Melkonyan, R., Kekelia, S., Adamia, Sh., Babazadeh, V., Kangarli, T., Avagyan, A., Galoyan, Gh., and Mosar, J., 2010, Subductions, obduction and collision in the Lesser Caucasus (Armenia, Azerbaijan, Georgia), new insights, in Sosson, M., Kaymakci, N., Stephenson, R., Bergerat, F., and Starostenko, V., eds., *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*: Geological Society, London, Special Publication 340, p. 329–352, doi:10.1144/SP340.14.
62. Tatevossian R.E., Rogozhin E.A., Arefiev S.S., Ovsyuchenko A.N., 2009. Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies: *Geol. Soc. London, Special Publication 316*, p. 73–91.
63. Toumanoff C. 1963. "Studies in Christian Caucasian history Armenian Research Center collection". Georgetown University Press, pp. 599
64. Trifonov V.G., Klerkx J., Theunissen K., 1994. The Poermond earthquake of 13 April 1992, the Netherlands: geological aspects: *Terra Nova*, v. 6, p. 301–305.
65. Tsuchida, H., 1971. Estimation of liquefaction potential of sandy soils. Proc. 3rd Joint Meeting, US–Japan, UNJR

66. Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: *Geophysical Journal International*, v. 157, no. 1, p. 381–398, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x.
67. Wells, L.D., and Coppersmith, J.K., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, no. 4, p. 974–1002.
68. Yeats, R. S., C. R. Allan, and K. E. Sieh. 1997. *The Geology of Earthquakes*, Oxford University Press, Oxford
69. Youd, T. L., 1973, Liquefaction, flow, and associated ground failure: U.S. Geol. Survey Circ. 688, 12 p.
70. Youngs, R. R., and Coppersmith, K. J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 939-964.
71. Zardaryan, M., and Hovsepyan, R., 2017. The Agriculture of Western Syunik, Armenia in the Light of Archaeological and Archaeobotanical Data (Preliminary Study on the Economy of Early Yervandid Settlements). In: *Bridging Times and Spaces, Papers in Ancient Near Eastern, Mediterranean and Armenian Studies*, Avetisyan, P.S. and Grekyan, Y. H. (eds)., Arcaeopress Publishing Ltd., Gordon House, Oxford, 407-420