

СЕЙСМОГЕННЫЕ КОНВОЛЮЦИИ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА СЕВАН (Армения)

А.М. Корженков, М.А. Аванесян*, А. Вирджино, А.С. Караханян***

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

** Institute of Geological Sciences NAS, 0019, Erevan, Baghramian Ave., 24a, Republic of Armenia*

*** Livermore National Laboratory, Ministry of Energy, Livermore, USA*

Целью исследований было выявление деформационных структур в рыхлых отложениях тектонически-активной области — Армянского нагорья, а также экспертиза этих деформаций как индикаторов палеосейсмичности. Деформационные структуры в рыхлых осадках в форме подушек, карманов, острых волн и овоидов обнажаются в Севанской котловине в переслаивающихся слоях мелководного озерного, пляжевого и речного генезиса. Были также обнаружены другие деформационные структуры: разбитые слои и малоамплитудные надвиги. Восемь полевых критериев для отнесения деформаций в рыхлых грунтах к палеосейсмическому инициированию обеспечивают весомое доказательство о сейсмическом происхождении выявленных деформационных структур. Согласно местной относительной стратиграфической шкале, севанские сейсмиды имеют плейстоцен-голоценовый возраст.

Сейсмогенные конволюции, сейсмиды, озерные отложения, древние землетрясения, Кавказ, Армения, оз. Севан.

SEISMIC CONVOLUTIONS IN THE QUATERNARY DEPOSITS OF LAKE SEVAN (Armenia)

A.M. Korzhenkov, M.A. Avanesian, E. Virgino, and A.S. Karakhanyan

The aim of the study is to detect deformations in the soft sediments in a tectonically active area (the Armenian Highland) and to examine the significance of the deformations as paleoseismicity indicators. Deformations in the form of pillows, pockets, sharp waves, and ovoids are exposed in the Sevan basin, within interbedded shallow lacustrine, beach, and fluvial sediments. Also, broken beds and low-amplitude thrusts are observed. Eight field criteria for assigning soft-sediment deformations to paleoseismic triggering provide strong evidence for the seismic origin of the deformations. According to the local relative stratigraphic scale, the Sevan seismites are of Pleistocene–Holocene age.

Seismic convolutions, seismites, lacustrine deposits, ancient earthquakes, Caucasus, Armenia, Lake Sevan

ВВЕДЕНИЕ

Деформационные структуры в рыхлых осадках — обычное явление в неуплотненных и водонасыщенных песках, переслаивающихся с глинами. Они описаны в различных отложениях, в частности озерных и речных, на примере разрезов, расположенных за рубежом [Hempton, Dewey, 1983; Tinsley et al., 1985; Anand, Jain, 1987; Scott, Price, 1988; Vittori et al., 1991; Bowman et al., 2000, 2001; Chunga et al., 2007; Üner et al., 2012], а также в России и странах СНГ [Корженков и др., 1999, 2007; Korzhenkov, 2000; Bowman et al., 2004; Поволоцкая и др., 2006; Деев и др., 2009а, б, 2013; Гладков, Лунина, 2010; Рогожин, 2010; Рогожин и др., 2010; Вологина и др., 2012; Имаев и др., 2012; Лунина и др., 2012; Lunina et al., 2012; Никонов, 2012]. Рыхлые осадки описываются как потерявшие прочность из-за того, что они становятся разжиженными [Lowe, 1975]. Во многих случаях деформации были приписаны сотрясениям во время землетрясений.

Кавказ является одним из наиболее сейсмически-активных регионов мира, который известен своими сильными землетрясениями. Несколько межгорных впадин этого активного орогена заняты озерами. Плейстоцен-голоценовые озерные осадки восприимчивы к интенсивному сейсмическому воздействию, однако до сих пор отсутствовали попытки исследовать эти деформационные структуры в отложениях как индикаторы палеосейсмичности, продлить в глубь тысячелетий запись сейсмической активности.

Цель работы — выявление, описание и датирование деформационных структур в осадках в районе оз. Севан (Армения) и оценка их значения как индикаторов палеосейсмичности.

ФАЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СЛОЕВ

В изученных нами разрезах (рис. 1) представлено чередование хорошо стратифицированных песков, песчаников, супесей, песчано-галечных слоев и ракушечников, часто демонстрирующих волнистое напластование, иногда косую слоистость, передовое залегание, редко массивное напластование. Сортировка хорошая. Моллюски и включения гидроксидов железа лагунно-озерного происхождения описывались и ранее [Саадян, 2009]. Подобные циклические формы разнозернистого песка, часто с галькой, указывают на динамические фациальные флуктуации между мелководными озерными, пляжными и флювиальными обстановками. Следующие главные характеристики наблюдались в изученных разрезах.

Разрез № 1 на трассе Ереван—Севан. Здесь под пачкой грубообломочных аллювиально-пролювиальных отложений лежит пачка белой супеси, с прослоями цельного и битого ракушечника (рис. 2). Конволютный горизонт представлен супесью, имеющей неровный контакт с подстилающим рыхлым крупнозернистым песком. Последний высыпался наружу и образовал углубления на стенке обнажения.

Продолжение этого разреза по латерали в сторону Севана показывает, что описанный выше рыхлый крупнозернистый песок фациально заместился здесь чередованием хорошо стратифицированных мелко- и среднезернистых песчаников. Именно в них внедряются вниз карманы битого ракушечника (рис. 3). Карманы небольшие, их глубина до 15 см, ширина до 10 см. Расстояние между ними — 30 см.

На противоположной (восточной) части дороги также находится обнажение озерных и флювиальных осадков, но состав их более грубый. Конволютные структуры здесь представлены формами в виде наклонных битых плиток среднезернистого песчаника в крупнозернистом (рис. 4). Плитки длиной в 20—30 см наклонены в сторону Севана.

Возраст встреченных нами озерных осадков и развитых в нем конволюций, согласно местной стратиграфической схеме, голоценовый [Саадян, 2009].

Западный разрез № 2 (рис. 5). К западу от трассы Севан—Мартуни на северной окраине с. Цовард в искусственном карьере нами встречен разрез, представленный чередованием различных песчаных разностей. Сейсмитоподобные структуры представлены рваными и бесформенными фрагментами мелкозернистого песчаника, залегающими в крупнозернистом песке (рис. 6). В этом же разрезе к востоку появляются карманы крупнозернистого песка, внедряющиеся вниз — в мелкозернистый (рис. 7).

Согласно местной относительной стратиграфической шкалы, описанный разрез озерных отложений перекрывается голоценовым лавовым потоком. Следовательно, его возраст, скорее всего, позднеплейстоценовый.

Разрез озерных отложений № 3, содержащий многочисленные конволюции, расположен на западном побережье оз. Севан в 3 км к югу от с. Норадуз (рис. 8, 9). Вдоль дороги обнажается так называемая Сарыкаинская толща [Саадян, 2009]. Изученный разрез озерных осадков относится к раннему плейстоцену. Приведем описание встреченных нами конволюций (снизу вверх).

Прежде всего, бросаются в глаза значительные волнообразные конволюции в нижней части разреза (рис. 9, 10). Слой мелкозернистых песчаников внедряется вверх в крупнозернистый песчаник в виде волн с острым гребнем. Эти волны в верхней своей части имеют наклон на юг. Среднее расстояние между ними 2.5 м, средняя высота волны около 0.5 м, хотя отдельные волны имеют высоту в 1 м. Описанный конволюционный горизонт I начинается на высоте около 0.5 м от нижней кромки разреза, а его мощность с учетом самых высоких волн составляет до 1 м.

Конволюционный горизонт II находится выше по разрезу, он расположен

Рис. 1. Цифровая карта Севанской котловины.

1 — основные разломы, 2 — изученные разрезы, нумерация соответствует их описанию в тексте.

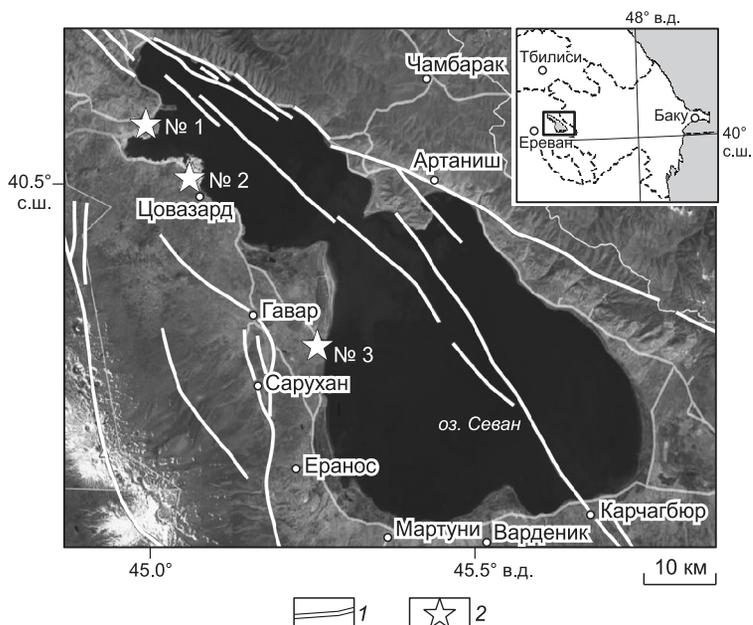




Рис. 2. Обнажение озерных осадков вдоль трассы Ереван—Севан (разрез № 1).

Северная сторона дороги.

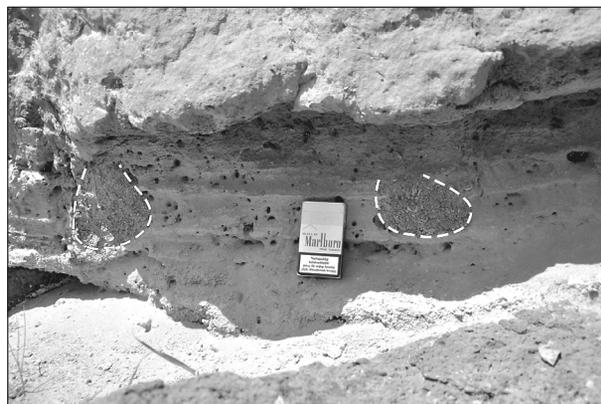


Рис. 3. Обнажение озерных осадков вдоль трассы Ереван—Севан (разрез № 1).

Северная сторона дороги. Внедрение битого ракушечника вниз — в слой переслаивающегося средне- и мелкозернистого песка.



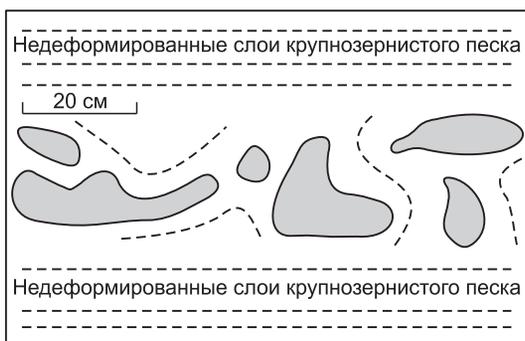
Рис. 4. Обнажение озерных осадков вдоль трассы Ереван—Севан (разрез № 1).

Южная сторона дороги. Конволютные структуры — битая плитка из среднезернистого песчаника в рыхлом крупнозернистом песке.



Рис. 5. Западный разрез № 2 озерных осадков Севана.

на уровне 1.5—2.5 м от основания разреза. Конволюции представляют собой подушки, сложенные сравнительно рыхлым серым крупнозернистым песком, окруженные массивным песчаником той же зернистости (рис. 11). Подушковидные конволюции выделяются по углублениям в стенке разреза: рыхлый песок высыпается и образует там полости-ниши. Подушки, сложенные рыхлым песком, имеют наволочку из слоя рыжего ожезненного песчаника мощностью в несколько сантиметров. Среднее расстояние между подушковидными конволюциями ~ 1 м.



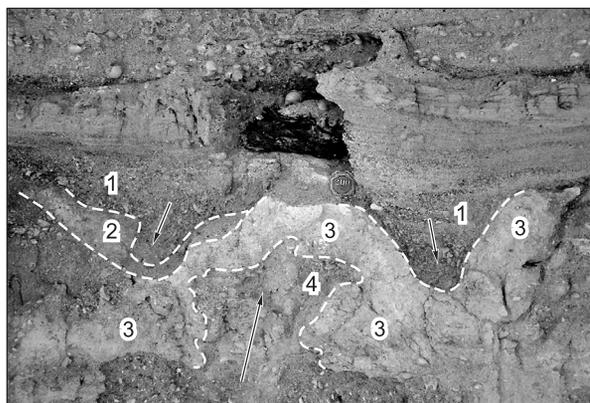
Конволютный горизонт: хаотические по форме фрагменты мелкозернистого песчаника в крупнозернистом песке

Рис. 6. Западный разрез № 2 озерных осадков Севана.

Схематическая зарисовка конволютного горизонта.

Рис. 7. Западный разрез № 2 озерных осадков Севана.

Внедрение крупнозернистых песков (1) вниз в средне- (2) и мелкозернистые (3) пески. Внедрение крупнозернистого песка галькой (4) вверх в мелкозернистые пески (3).



Средняя длина подушек также около 1 м, толщина ~ 30 см. Мощность слоя конволюций около метра. Среди подушковидных конволюций правильной формы встречаются сплюснутые (см. рис. 11) и изломанные подушки.

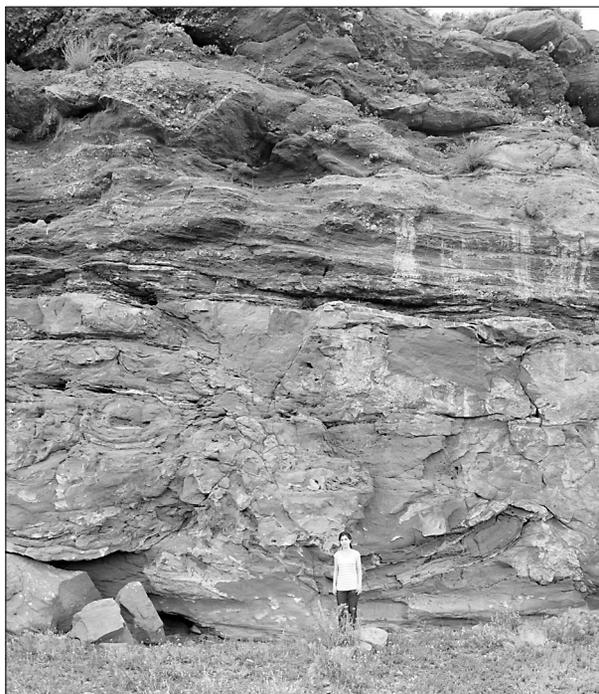
Еще выше по разрезу в интервале 2.5—4.0 м от основания разреза имеется слой овоидов, сложенных мелкозернистым песчаником и окруженных массивным крупнозернистым песчаником (рис. 12). Эти овоиды также окружены маломощным слоем (1—3 см) железистого песчаника. Их главное отличие от нижеописанных подушек — находящиеся в овоидах жеоидные конкреции. Данные конволюции достигают 1.5 м в длину и до 0.5 м в ширину. Расстояние между ними нерегулярное. Выше по слою конволюций не наблюдается.

Выше по разрезу располагается слой, представляющий собой чередование песчаных озерных осадков и более грубых аллювиально-пролювиальных галечных отложений. Этот слой довольно рыхлый, он высыпается и образует углубления на склоне. Мощность слоя 1.5—2.0 м. В нем имеются конволюции в виде карманов — внедрений вышележащего слоистого разнозернистого горизонта в однородный слой. По масштабу эти деформации несравнимы с вышеописанными (рис. 13).

Еще выше находится слой серо-коричневых аллювиально-пролювиальных отложений, представленных валунными конгломератами, с редкими прослоями озерных песчаников. Мощность слоя до 10 м. Венчает разрез лавовый поток мощностью до 10 м. В точке наблюдения лавы размыты, разрез находится в ядре очень пологой антиклинальной структуры, поэтому отложения этого потока сохранились к югу и северу от описываемого разреза — на крыльях структуры.

Вся вышеописанная толща рассечена значительными трещинами без видимого смещения с общим азимутом простирания около 270° (см. рис. 8, 9). Эти разрывы имеют разные азимуты падения: на юг и на север при сравнительно пологих углах падения до 55° . Отдельные трещины секут весь разрез. Вдоль трещин развиты желтые полосы ожелезнения.

В 1 км южнее вышеописанного обнажения выходы озерных осадков выявлены нами на склоне долины сухого ручья, по которому вверх поднимается грунтовая дорога. Здесь наблюдается чередование



слоев светлых разнозернистых песчаников с прослоями мелкой гальки и дресвы (рис. 14). Все эти слои рвутся малоамплитудными взбросами. Нижняя часть склона взброшена вверх (к западу) против сил гравитации. Простирание взбросов субмеридиональное. Видимая мощность нарушенного разрывами пакета около 3 м, толщина литонов между взбросами до 1.5 м, амплитуда смещений до 20 см. Параллельно со взбросами в слоях развиты конформные протрузии отдельных слоев вверх (рис. 15). Слои деформированы в виде асимметричных складок, осевая плоскость которых воздымается на запад под теми же углами, что и разрывные плоскости ($50—70^\circ$). Описанные озерные отложения перекрыты лавовым потоком, на поверхности которого расположено древнее поселение.

Рис. 8. Норадузский разрез № 3 озерных отложений.

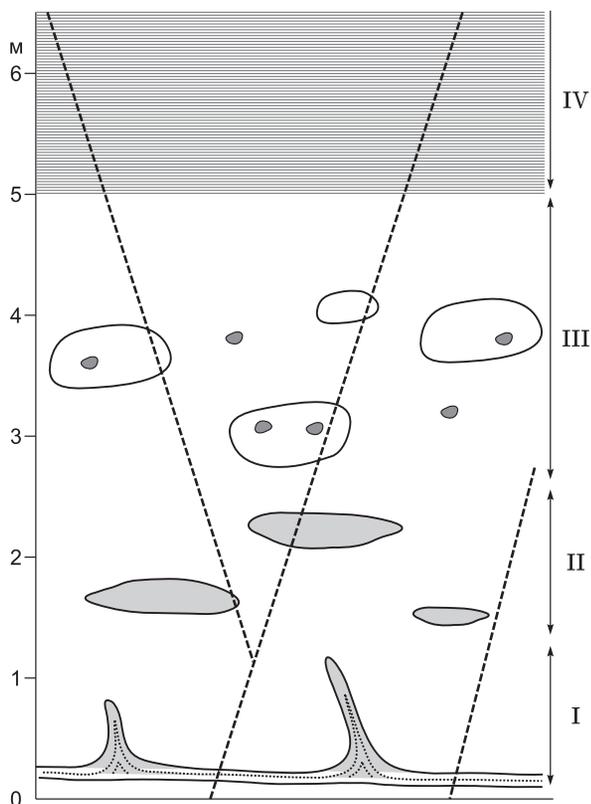


Рис. 9. Схематическая зарисовка Норадузского разреза № 3.

I—III — толщина чередующихся разнозернистых песчаников: I — слой волнообразных конволюций, II — слой подушковидных конволюций, III — слой оvoidных конволюций с жемчужными включениями; IV — толщина переслаивающихся озерных песчаников и аллювиально-пролювиальных конгломератов. Жирные штриховые линии — трещины в разрезе без смещения. Горизонтальный масштаб совпадает с вертикальным.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Типы деформаций в рыхлых осадках

На исследованных участках на западном побережье оз. Севан нами наблюдались следующие главные типы деформаций.

1. Карманы глубиной 15 см и шириной 10 см (см. рис. 3). Эти формы сложены битым ракушечником, они находятся в массивном средне- и мелкозернистом песке вмещающего слоя. Они наблюдались в придорожном западном разрезе № 1 на северо-западном побережье озера, а также в разрезе № 3 (см. рис. 13). Первичное напластование осталось в большинстве случаев неразрушенным, однако разорванное залегание слоев также отмечалось.

2. Структуры в форме наклонных битых плиток среднезернистого песчаника в крупнозернистом песке (см. рис. 4). Плитки длиной в 20—30 см. Они встречаются в придорожном восточном разрезе № 1 на северо-западном побережье озера и располагаются стратиграфически выше вышеописанного разреза.

3. Структуры перемешивания слоев песка (взаимные внедрения разнозернистых песков и отторженцы) наблюдались в основании разреза № 2 (см. рис. 6, 7). Конволюционный слой имеет мощность 20—30 см, он подстилается и перекрывается недеформированными слоями. Деформированный слой включает вертикальные интрузии крупнозернистого песчаника в мелкозернистый и сложные опрокинутые складки: дезорганизованные, нерегулярные и хаотические, что может предполагать некоторые горизонтальные смещения. Внутреннее напластование, хотя и искривленное, хорошо сохранилось. Этот слой может быть прослежен по латерали на десятки метров.

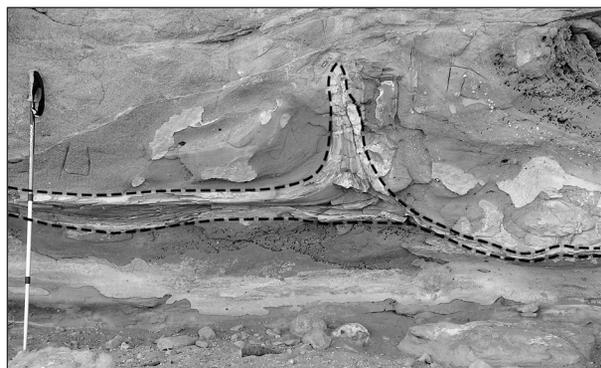
4. Волнообразные конволюции (см. рис. 10). Длина волн, сложенных песком, составляет в среднем 250 см, а их высота — от 45 до 100 см. Деформационные структуры располагаются на почти равных расстояниях в слое, выдержанном по мощности. Латеральное распространение волнообразных конволюций — от десятков до сотен метров.

5. Сплюснутые и изломанные подушковидные конволюции (см. рис. 11), 1 м длины и 0,3 м толщины. Эти формы сложены отторженцами крупнозернистого рыхлого песка, которые облекаются песчаным прослоем с признаками ожелезнения и находятся в массивном песчанике вмещающего слоя. Первичное напластование в большинстве случаев сохранилось, хотя отмечаются разрывы слоев.

6. Изолированные овоиды и псевдоконкрекции (см. рис. 12). Длина этих овоидов, сложенных песчаником, варьирует от 35 до 200 см, а ширина — от 12 до 100 см. Овоидные структуры окружены грубозернистой и нестратифицированной

Рис. 10. Норадузский разрез № 3.

Конволюционный горизонт I — внедрение слоя мелкозернистого песчаника вверх в крупнозернистый песчаник. Слой крупнозернистого песчаника также пликативно деформирован. Длина трости в левой части снимка 1 м.



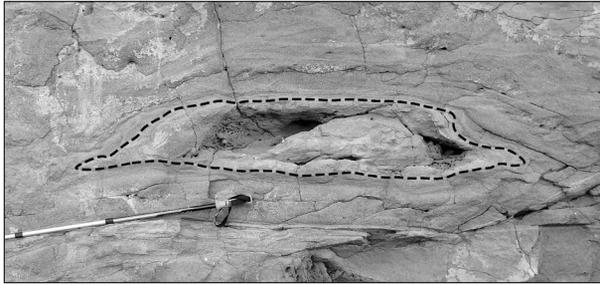


Рис. 11. Норадузский разрез № 3.

Конволютный горизонт II — подушкообразные конволюции (штриховая линия), сложенные рыхлым крупнозернистым песком в окружении массивного крупнозернистого песчаника. На границе рыхлого и сцементированного песка имеется тонкий слой ожезленного песчаника. Внизу под палкой видна сплюснутая подушка. Длина трости в левой части снимка 65 см.

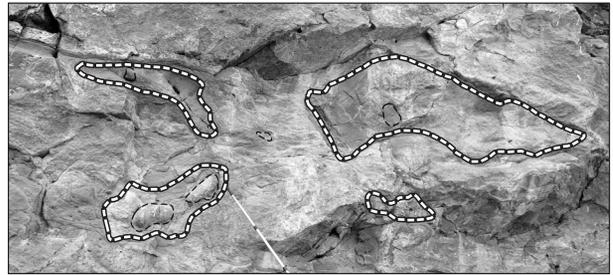


Рис. 12. Норадузский разрез № 3.

Конволютный горизонт III — овоиды из мелкозернистого песчаника в окружении массивного крупнозернистого песчаника. Внутри и (изредка) вне овоидов встречаются жеодистые стяжения. Длина трости в нижней части снимка 55 см.

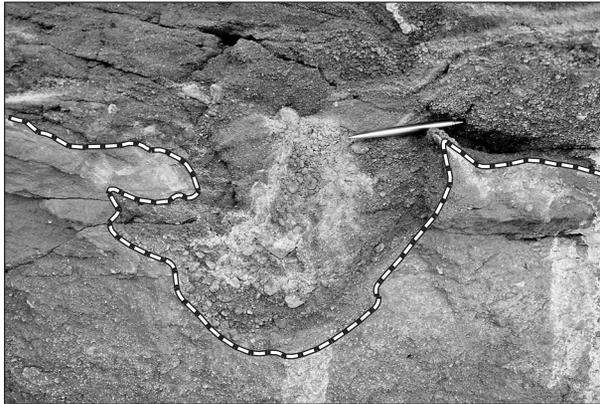


Рис. 13. Норадузский разрез № 3.

Конволютный горизонт IV — внедрение слоя, сложенного чередующимися крупнозернистыми песчаниками и дресвяниками, вниз в слой разнозернистых песчаников.



Рис. 14. Норадузский разрез № 3.

Конволютная толща V — надвиги в переслаивающихся слоях песка и дресвы.

Рис. 15. Норадузский разрез № 3.

Конволютная толща V (деталь рис. 14) — малоамплитудные надвиги (висячее крыло показано черной стрелкой) взбрасывают вверх по склону чередующиеся слои крупнозернистого песка и дресвы. Здесь также наблюдаются конформные нагнетания отдельных слоев вверх и к западу (белые стрелки).



песчаниковой вмещающей толщей. Первоначальное напластование изогнуто вокруг овоидов и параллельно базальной поверхности. Это пронизывающий тип деформаций [Allen, 1977]. Их латеральное простираение составляет от десятков до сотен метров, наличие псевдоконкреций предполагает небольшие вариации в интенсивности деформации.

7. Малоамплитудные взбросы (см. рис. 15). В чередующихся слоях песков и дресвы обнаружена система малоамплитудных взбросов. Кроме того, между разрывами наблюдаются и пликативные формы (см. рис. 15). Подобный тип деформации среды зависит главным образом от типа флюида в поровом пространстве [Деев и др., 2009а,б]. Если поры заполнены газом, деформация будет хрупкой с образованием трещин.

ПОЛЕВЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ СЕЙСМИТОВ

Мы используем термин «сейсмиды» [Seilacher, 1969] для структур, сформированных в рыхлых песчаных осадках вследствие сейсмических толчков. Каждый типологический полевой критерий [Sims, 1975; Hempton, Dewey, 1983; Anand, Jain, 1987] предложен для отнесения особенностей деформаций к палеосейсмическому событию.

Местонахождение исследуемых деформаций в сейсмически-активных областях. Кавказ — это территория с известными сильными современными и историческими землетрясениями. Не является исключением и Армения. Последним сейсмическим событием, поразившим запад Армении, была Спитакская катастрофа 1988 г. Тем не менее оз. Севан расположено на территории, где не были пока инструментально зафиксированы эпицентры сильных современных землетрясений. А. Караханян и Е. Абгарян [Karakhanyan, Abgaryan, 2004] указывают на их отсутствие и по историческим источникам. А.А. Никонов [Nikonov, 1991] обращает внимание на высокую ($I = VIII$ баллов) интенсивность сейсмических колебаний в западной части Севанской котловины во время Цахкадзорского землетрясения, произошедшего в 1827 г. к северо-западу от озерного бассейна. Такая же сейсмическая интенсивность в Севанской впадине приводится для Гёггёльского землетрясения 1139 г. [Никонов, Никонова, 1986], эпицентр которого располагался к востоку от котловины. Однако здесь в обоих случаях имело место воздействие транзитных сейсмических волн. Тем не менее по зоне Памбак-Севанского разлома, проходящего по восточному горному обрамлению озера, имеются отчетливые следы плейстоценовых и даже голоценовых сейсмических подвижек, а также вулканической активности этого возраста [Karakhanyan et al., 2002], что делает эту зону постоянным источником сейсмической опасности.

Подходящий состав осадков — слабоконсолидированные, метастабильные пески с низким сцеплением. В связи с такими качествами [Dzulynski, Smith, 1965; Mills, 1983] и излишком 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. Песчаные озерные фации, исследованные в данной работе, являются частично пористыми и слабоупакованными, так что соответствуют основным текстурным требованиям для пластичных деформаций, вызванных нагрузкой.

Сходство структур, образованных экспериментально, со структурами, образованными сейсмическими сотрясениями. Типы деформаций, выявленные в нашей работе, хорошо сопоставимы как с деформациями в рыхлых осадках, описанными в геологических публикациях как сейсмиды [Seilacher, 1969; Scott, Price, 1988; Ringrose, 1989], так и с теми, которые были получены экспериментально [Kuennen, 1958; Owen, 1996].

Исключение возможности образования деформаций вследствие гравитационного течения. Сейсмиды должны выявляться в областях, где склоновая нестабильность, вызванная гравитацией, может быть исключена. Это обстоятельство необходимо для того, чтобы избежать появления деформаций, которые могут возникнуть без сотрясения. Латеральная протяженность деформационных структур в пределах отчетливо выявляемых слоев исключает происхождение деформаций вследствие гравитационного течения.

Деформированный слой должен находиться в стратиграфическом сэндвиче из недеформированных слоев. Подобное положение видно во многих случаях, когда слой с деформациями перекрыт или подстилается недеформированными слоями (см. рис. 3, 4, 6, 7). Четкое ритмическое чередование деформированных слоев с ненарушенными горизонтами может также служить указателем мгновенного сейсмического происхождения конволюций [Rossetti, 1999], так как деформация имела место вскоре после отложения осадка [Jones, Omoto, 2000].

Латеральная протяженность и региональное изобилие конволюций. Широкое латеральное простираение деформационных структур и их региональное изобилие являются необходимым условием

для их отнесения к сейсмическим конволюциям [Allen, 1986]. Эти структуры широко распространены вдоль побережья оз. Севан. Их большое количество и распространение соответствуют ожидаемому эффекту сейсмических событий, хотя синхронность не была установлена (см. рис. 1). На каждом исследованном участке деформации могут быть латерально прослежены только на десятки метров. Эти данные хорошо согласуются с выводом о значительных вариациях во множестве структур разжижения в пределах небольшой области [Obermeier, 1996]. Невзирая на этот факт, пространственное распределение деформаций в рыхлых осадках очень широко вдоль побережья оз. Севан. Зоны, имеющие деформации в рыхлых осадках в связи с текстурными замещениями, чередуются вдоль границ бассейна. Это текстурное замещение (например огрубление осадков) приводит к отсутствию конволюций в отложениях, в которых невозможно разжижение (например в галечниках, валунниках), что усложняет выявление их пространственного распределения.

Циклическое повторение конволютных горизонтов в разрезе по вертикали следует ожидать в сейсмических зонах вследствие периодического проявления сильной сейсмической активности. Четыре горизонта сейсмитоподобных структур, расположенных один над другим, было выявлено нами в обнажении № 3 близ с. Норадуз.

Систематическое повторение форм сейсмиков в слое по латерали. Именно систематическое повторение волн, грибов, подушек и др. форм (одна за другой) является важным признаком сейсмического генезиса деформаций. Мы предлагаем этот критерий в качестве диагностического впервые. Деформации различной морфологии, расположенные рядом друг с другом в одном слое, скорее будут свидетельствовать об их мерзлотном или гравитационном происхождении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деформационные структуры в рыхлых осадках обнаружены нами в бассейне оз. Севан в переслаивающихся слоях мелководно-озерного, пляжного и флювиального генезиса. Восемь полевых критериев, используемых для отнесения выявленных деформаций в рыхлых осадках к палеосейсмической деятельности, являются убедительными доказательствами сейсмического происхождения данных деформационных структур.

Известно, что явление разжижения может иметь место уже при магнитудах $M \geq 5.0$ [Kuribayashi, Tatsuoka, 1975]. Для расстояния, не превышающего 100 км, $M = 7.0$ является минимально допустимой величиной [Ambraseys, 1988]. Хотя исследованные разрезы находятся на значительном расстоянии друг от друга, их региональное распространение тем не менее не было достаточно протяженным, чтобы локализовать по развитию деформаций палеоэпицентры.

Относительное датирование осадков выявило временной интервал в десятки тысяч лет, указывающий на высокую сейсмическую активность в позднем плейстоцене—голоцене.

Изучение сейсмиков в озерных осадках оз. Севан должно быть продолжено, особенно по определению их абсолютного возраста — времени сформировавшихся их сильных землетрясений и их повторяемости. Эти работы совместно с исследованиями по локализации эпицентров древних катастроф к определенным разломным зонам или их сегментам послужат делу более достоверной оценки сейсмической опасности региона.

Авторы сердечно благодарят рецензентов Е.В. Деева и О.В. Лунину за их тщательное и критическое прочтение рукописи, за их важные и доброжелательные рекомендации, которые позволили в значительной степени улучшить качество статьи.

Эти исследования были поддержаны программой «НАТО для мира и безопасности», проекты № 983142 и 983284.

ЛИТЕРАТУРА

Вологина Е.Г., Штурм М., Радзиминович Я.Б., Воробьева С.С., Щетников А.А. Землетрясение 1912 года на Южном Байкале: следы в донных осадках и выброс газа в водную толщу // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (12), с. 1744—1755.

Гладков А.С., Лунина О.В. Сейсмичность юга Восточной Сибири: проблемы и перспективы изучения // Геодинамика и тектонофизика, 2010, т. 1, № 3, с. 249—272.

Деев Е.В., Зольников И.Д., Гуськов С.А. Сейсмичность в четвертичных отложениях Юго-Восточного Алтая // Геология и геофизика, 2009а, т. 50 (6), с. 703—722.

Деев Е.В., Зольников И.Д., Сибиряков Е.Б., Гуськов С.А. Свидетельства сейсмичности Юго-Восточного Алтая в четвертичное время // ДАН, 2009б, т. 426, № 6, с. 777—781.

Деев Е.В., Зольников И.Д., Гольцова С.В., Русанов Г.Г., Еманов А.А. Следы древних землетрясений в четвертичных отложениях межгорных впадин центральной части Горного Алтая // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (3), с. 410—423.

Имаев В.С., Смекалин О.П., Стром А.Л., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Оценка сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монгольская Народная Республика) по результатам сейсмогеологических исследований // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (9), с. 1182—1193.

Корженков А.М., Бауман Д., Омуралиев М., Хасельтон К. Следы древних сильных землетрясений в отложениях озера Иссык-Куль // Изв. РГО, т. 131, 1999, вып. 4, с. 48—55.

Корженков А.М., Кросби К., Мамыров Э., Поволоцкая И.Э., Эрроусмит Р. Сейсмогенные конволюции в озерных осадках озера Иссык-Куль, Северный Тянь-Шань // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Материалы совещания. Т. 1. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2007, с. 179—184.

Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С. По следам Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале: результаты исследования вторичных косейсмических деформаций в рыхлых осадках // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (6), с. 775—796.

Никонов А.А. Сейсмодетформации в молодых эстурных отложениях г. Санкт-Петербурга // ДАН, 2012, т. 443, № 2, с. 203—206.

Никонов А.А., Никонова К.И. Сильнейшее землетрясение Закавказья 30 сентября 1139 г. (реконструкция по историческим, историко-архитектурным и археологическим материалам) // Вопросы инженерной сейсмологии, 1986, вып. 27, с. 152—183.

Поволоцкая И.Э., Корженков А.М., Мамыров Э.М. Следы сильных землетрясений в озерных осадках Кок-Мойнокской впадины (Северный Тянь-Шань) // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (9), с. 1024—1035.

Рогожин Е.А. Реконструкция долговременного сейсмического режима с использованием палеосейсмологических данных // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. М., ИФЗ РАН, 2010, с. 44—64.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Новиков С.С., Мараханов А.В. Активная тектоника района Калининградских землетрясений 21 сентября 2004 года // Вопросы инженерной сейсмологии, 2010, т. 37, № 3, с. 5—20.

Саадян Ю.В. Новейшая геологическая история Армении. Ереван, Изд-во Гитутюн НАН РА, 2009, 357 с.

Allen J.R.L. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds // J. Geol. Soc., 1977, v. 134, p. 19—31.

Allen J.R.L. Earthquake magnitude-frequency, epicentral distance and soft sediment deformation in sedimentary basins // Sediment. Geol., 1986, v. 43, p. 67—75.

Ambraseys N.N. Engineering seismology. Earthquake engineering and structural dynamics // J. Int. Assoc. Earthquake Eng., 1988, v. 17, p. 1—105.

Anand A., Jain A.K. Earthquakes and deformational structures (seismites) in Holocene sediments from the Himalayan-Andaman Arc, India // Tectonophysics, 1987, v. 133, p. 105—120.

Bowman D., Banet-Davidovich D., Bruins H.J., van der Plicht J. Dead Sea shorelines facies with seismically-induced soft-sediment deformation structures, Israel // Israel J. Earth Sci., 2000, v. 49, p. 197—214.

Bowman D., Bruins H.J., van der Plicht J. Load structure seismites in the Dead Sea area, Israel: chronological benchmarking with ¹⁴C dating // Radiocarbon, 2001, v. 43, p. 1383—1390.

Bowman D., Korjenkov A., Porat N. Late-Pleistocene seismites from Lake Issyk-Kul, the Tien Shan range, Kyrgyzstan // Sediment. Geol., 2004, v. 163, p. 211—228.

Chunga K., Livio F., Michetti A.M., Serva L. Synsedimentary deformations of Pleistocene glaciolacustrine deposits in the Albese con Cassano (Southern Alps, Northern Italy), and possible implications for paloseismicity // Sediment. Geol., 2007, v. 196, p. 59—80.

Dzulynski S., Smith A.J. Sedimentary features of flysch and greywackes // Developments in Sedimentology, 1965, v. 7, p. 81—108.

Hempton M.R., Dewey J.F. Earthquake-induced deformational structures in young lacustrine sediments, East-Anatolia Fault, Southeast Turkey // Tectonophysics, 1983, v. 98, p. T7—T14.

Jones A.P., Omoto K. Towards establishing criteria for identifying trigger mechanisms for soft-sediment deformations: a case study of Late Pleistocene lacustrine sands and clays, Onikobe and Nakayamadaira Basins, Northeastern Japan // Sedimentology, 2000, v. 47, p. 1211—1226.

Karakhanian A., Abgaryan Ye. Evidence of historical seismicity and volcanism in the Armenian Highland (from Armenian and other sources) // Ann. Geophys., 2004, v. 47, № 2/3, p. 793—810.

Karakhanian A., Djrbashian R., Trifonov V., Philip H., Arakelian S., Avagian A. Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2002, v. 113, p. 319—344.

- Korjenkov A.M.** Seismogenic convolutions in soft lacustrine sediments of the Issyk Kul Lake, Tien Shan, Kirgizstan — initial report // *J. Earthquake Prediction Res.*, 2000, v. 8, № 4, p. 514—519.
- Kuenen P.H.** Experiments in geology // *Geol. Mag.*, 1958, v. 23, p. 1—28.
- Kuribayashi E., Tatsuoka F.** Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan // *Soils and Foundations*, 1975, v. 15, p. 81—92.
- Lowe DR.** Water escape structures in coarse grained sediments // *Sedimentology*, 1975, v. 22, p. 157—204.
- Lunina O.V., Nevedrova N.N., Gladkov A.S.** Tectonic and geoelectric structures of rift basins in the Baikal region // *Comptes Rendus Geosci.*, 2012, v. 344, p. 149—158.
- Mills P.C.** Genesis and diagnostic value of soft sediment deformation structures — a review // *Sediment. Geol.*, 1983, v. 35, p. 83—104.
- Nikonov A.A.** Destructive historical earthquakes in Soviet Armenia // *Tectonophysics*, 1991, v. 193, p. 225—229.
- Obermeier S.F.** Using liquefaction-induced features for palaeoseismic analysis // *Palaeoseismology*, San Diego, Academic Press, 1996, p. 331—396.
- Owen G.** Experimental soft sediment deformation structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples // *Sedimentology*, 1996, v. 43, p. 279—293.
- Ringrose P.S.** Palaeoseismicity (?) liquefaction events in late Quaternary lake sediments at Glen Roy, Scotland // *Terra Nova*, 1989, v. 1, p. 57—62.
- Rossetti D.F.** Soft sediment deformation structures in late Albian to Cenomanian deposits, Sao Luis Basin, Northern Brazil: evidence for palaeoseismicity // *Sedimentology*, 1999, v. 46, p. 1065—1081.
- Scott B., Price S.** Earthquake-induced structures in young sediments // *Tectonophysics*, 1988, v. 147, p. 165—170.
- 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.
- Tinsley J.C., Youd T.L., Perkins D.M., Chen A.T.F.** Evaluating liquefaction potential // *Evaluating earthquakes hazards in the Los Angeles region — an earth science perspective*. USGS Prof. Pap. 1985, v. 1360, p. 263—316.
- Vittori E., Labini S.S., Serva L.** Palaeoseismology, review of the state-of-art // *Tectonophysics*, 1991, v. 193, p. 2—14.
- Üner S., Yeşilova Ç., Yakupoğlu T.** The traces of earthquake (seismites): examples from Lake Van deposits (Turkey) // *Earthquake research and analysis — seismology, seismotectonic and earthquake geology* / Ed. S. D'Amico. Rijeka, Croatia, InTech Publishers, 2012, p. 21—32.

*Рекомендована к печати 10 апреля 2013 г.
Н.А. Берзиньм*

*Поступила в редакцию
22 октября 2012 г.*