

УДК 551

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДИАГЕНЕЗА В ОТЛОЖЕНИЯХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

© 2020 г. Ю. О. Гаврилов\*

Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: yugavrilov@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 17.06.2020 г.

В меловых и палеогеновых осадочных толщах Восточного Кавказа установлены следы вертикальной миграции веществ, возникших при диагенезе осадков и проходивших в процессе их образования стадию геля (кремнезем, сульфиды Fe). Признаки миграции соединений  $\text{SiO}_2$  зафиксированы в карбонатных отложениях с примесью биогенного кремнезема; следы миграции сульфидного вещества приурочены к интервалам переслаивания пластов известняков и обогащенных органическим веществом (ОВ) глинистых мергелей. Развитие процессов миграции аутигенного диагенетического вещества инициировалось воздействием на отложения землетрясений и связанных с ними горизонтов деструктурированных отложений. Явление миграции вещества такого рода характерно для зон с высокой сейсмической активностью, что определяет специфику диагенетических процессов в осадках палеоводоемов мобильных областей, отличая их от постседиментационных преобразований в осадках кратонов.

**Ключевые слова:** диагенетические преобразования, миграция вещества, кремнезем, гидротроилит, деструктурированные отложения, сейсмичность, Северо-Восточный Кавказ.

**DOI:** 10.31857/S0024497X20060038

Одной из основных задач при разработке представлений о литогенезе осадочных толщ было создание теории диагенеза морских осадков, т.е. их постседиментационных преобразований при превращении в породу. Детальные и систематические исследования современных осадков и древних отложений, проводившиеся во второй половине прошлого века, позволили эту задачу в основном решить [Страхов, 1953, 1956, 1962; Бутузова, 1969; Волков, 1961, 1973, 1979; Гаврилов, 1982; Диагенез ..., 1971; Зарицкий, 1970, 1971; Литология ..., 1979; Чухров, 1955; Berner, 1969, 1980; Curtis, Spears, 1968; Magara, 1974; Raiswell, Berner, 1985; Rickard, 1975; Sujkowski, 1958 и многие другие]. Разработанная теория диагенеза описывала главные, основные процессы постседиментационных преобразований осадков, общую направленность их развития. Были установлены главные факторы, влиявшие на диагенез осадков: их гранулометрический состав, степень обогащенности органическим веществом, соленость морских вод, скорость седиментации, геохимический и минералогический состав осадочного материала, уплотнение осадков и некоторые другие. Вместе с тем, в результате дальнейших исследований было выяснено, что в некоторых специфических обстановках осадконакопления существуют

и другие факторы, которые способны оказывать влияние на течение диагенетических процессов.

Сравнение процессов диагенеза в осадках палеоводоемов, располагавшихся в разных геодинамических обстановках, показывает, что, если во время периодов сейсмического покоя подвижных поясов течение этих процессов практически аналогично таковому в пределах древних кратонов, то при активизации сейсмичности в подвижных поясах диагенез здесь характеризуется рядом специфических черт. В разрезах мела Северо-Восточного Кавказа на интервалах со следами сейсмического воздействия на карбонатные толщи с примесью биогенного кремнезема нами обнаружены отчетливые признаки диагенетического перераспределения и достаточно масштабной вертикальной миграции кремниевое вещества как внутри этих толщ, так и в смежные горизонты разреза. Способность к миграции в таких условиях демонстрирует также некоторые соединения железа — например, гидротроилит ( $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), хотя объем вещества и расстояние, на которое происходит его перемещение существенно меньше, чем у кремневого геля.

Известно, что эти вещества, образуясь на диагенетической стадии преобразования осадков, в

принципе способны мигрировать на некоторое расстояние внутри пластов и образовывать достаточно крупные конкреции — продукты перераспределения новообразованных соединений. Однако в условиях активной сейсмичности масштаб и характер миграции некоторых продуктов диагенеза приобретают особые, специфические черты.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами наших исследований являлись мезозойские и нижнекайнозойские осадочные комплексы Восточного Кавказа (Горный Дагестан). Особый акцент был сделан на некоторых интервалах отложений, в которых рассматриваемые нами явления проявились в максимальной степени. Так, явление миграции соединений кремнезема исследовалось преимущественно в отложениях маастрихта и дания, представленных известняками, в которых часто содержится существенная примесь биогенного кремнезема. Наиболее многочисленные следы миграции соединений железа были зафиксированы в верхнеальбских и сеноманских отложениях — на интервалах переслаивания пластов известняков и обогащенных органическим веществом (ОВ) глинистых мергелей. В обоих случаях в осадочных толщах наблюдались следы воздействия на отложения сейсмических событий, сопровождавшихся существенным нарушением слоистой структуры отложений, их перемешиванием и оползанием.

## ПРОЯВЛЕНИЯ МИГРАЦИИ КРЕМНИСТЫХ ПРОДУКТОВ ДИАГЕНЕЗА В КАРБОНАТНЫХ ТОЛЩАХ МААСТРИХТА—ДАНИЯ

Следы диагенетической миграции соединений  $\text{SiO}_2$  встречаются довольно часто в верхнемеловых—датских отложениях Восточного Кавказа. Приурочены они, как правило, к карбонатным породам с примесью биогенного кремнезема. На рис. 1 приведены примеры таких следов. На рис. 1а, б, д хорошо видны как сами сгустки кремниевого вещества, опускающиеся в более низкие части известнякового пласта, так и расположенные выше кремниевые сгустки, от которых они оторвались. На рис. 1в, г можно наблюдать как от кремниевых конкреций, залегающих в слое обогащенных ОВ мергелей, обособляется перемещающийся вниз кремнистый материал. Если на пути опускающегося кремниевого геля встречалась достаточно резкая литологическая граница (между слоями), то этот гель накапливался над этой границей, образуя обогащенный  $\text{SiO}_2$  слой (см. рис. 1е). Масштаб перемещения кремневых сгустков на рис. 1 относительно небольшой — несколько дециметров. Вместе с тем, в некоторых случаях масштаб миграции — расстояние и коли-

чество вещества — могут быть гораздо более значительны.

Было установлено, что масштабные проявления миграции  $\text{SiO}_2$  находятся в ассоциации с горизонтами деструктурированных отложений, образование которых было спровоцировано сейсмическими событиями. На рис. 2 показан один из таких горизонтов (I), толщина которого достигает 13–15 м. Внутри него можно различать межпластовые смещения, разнообразные надвиговые структуры, разорванные и смятые слои и т.д. Принимая во внимание мощность деструктурированного горизонта и его значительную — на несколько километров — латеральную протяженность, можно связывать его образование с довольно мощным по магнитуде землетрясением. Непосредственно под этим горизонтом залегают пласт, переполненный кремниевыми стяжениями — неправильной формы и часто сливающимися в единую кремнистую массу (см. рис. 2б, в, слой II). Под этим пластом залегают пласты, разбитые многочисленными сейсмогенными трещинками, заполненными кремнистым веществом (см. рис. 2б, в, слой III, рис. 3). Морфологически они, как правило, имеют облик вертикально ориентированных линз, которые в некоторых случаях соединяются, образуя прихотливой формы стяжения. Поскольку сейсмогенные трещинки сверху упираются в обогащенный кремнеземом слой II, его следует рассматривать как источник кремневого геля, который мигрировал вниз и заполнял эти трещинки. Причем, если количество геля было достаточно большим, он проникал и в нижележащий пласт известняка.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что эти вертикально ориентированные линзы концентрируются преимущественно на уровне середины карбонатного пласта. Объясняется это тем, что диагенетическое уплотнение осадков происходит в первую очередь в области подошвы и кровли пластов, что характерно для слоистых толщ и особенно для интервалов переслаивания осадков разного гранулометрического и вещественного состава (как карбонатных, так и терригенных). То есть из этих пограничных зон при уплотнении осадков иловые воды удаляются в первую очередь, а соответственно, здесь существенно сокращается поровое пространство. При этом в центральных частях пластов первоначальный объем порового пространства сохраняется гораздо дольше, чем по краям. Поэтому кремнистый гель, опускаясь по трещинкам вниз, достигнув середины пласта, заполнял свободное поровое пространство по сторонам от трещинки, формируя линзовидное тело. Если бы миграция кремнистого вещества происходила на более поздней стадии постседиментационных преобразований, когда процессы уплотнения и раскры-





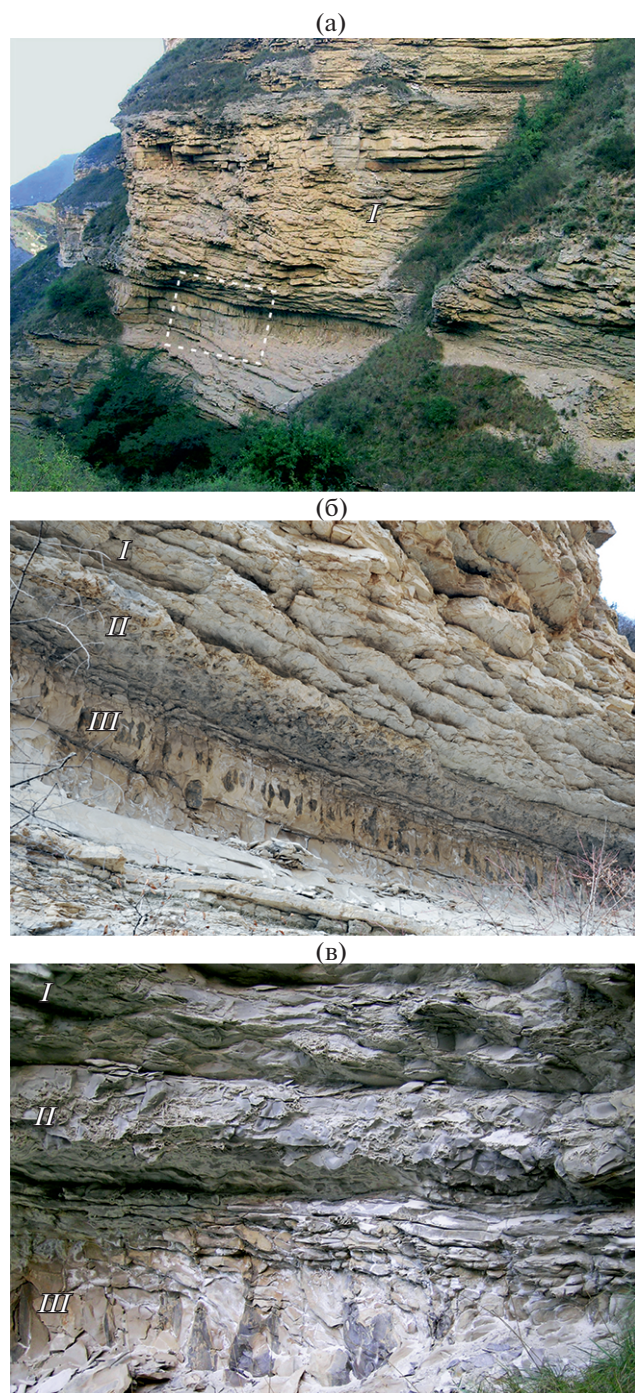
**Рис. 1.** Следы гравитационного перемещения кремневого геля в нижележащие слои осадков.

а, б, д — каплевидные сгустки кремнистого вещества (маастрихт, разрез по р. Герга), на “а” и “д” видны как капли, так и кремневые сгустки, от которых они оторвались; в, г — следы перемещения вниз черного кремневого геля, который первоначально образовывал цепочку линз в слое мергеля, обогащенного ОВ (верхний сеноман, разрез Хаджалмахи); е — концентрация кремнезема в подошве слоя на границе с подстилающим слоем со следами ряби (р. Герга).

сталлизации осадков уже в основном завершились, то образования линзовидных тел не произошло бы — кремнезем заполнял бы только пространство открытых трещин.

Явление диагенетической миграции кремнистого вещества наблюдалось нами и на других уровнях верхнемеловой толщи, но в схожих литологических условиях. На рис. 4 показан фрагмент





**Рис. 2.** Карбонатные отложения верхнего маастрихта с деформированным горизонтом и следами диагенетической миграции кремниевых веществ (разрез “Герга I”).

а — общий вид обнажения; прямоугольником выделен фрагмент толщи, показанный на рис. 2б; б, в — отложения под деформированным горизонтом, содержащие следы миграции кремнезема: *I* — нижняя часть деформированного горизонта, *II* — кремнистый слой, образованный в результате миграции  $\text{SiO}_2$  из вышележащих отложений, *III* — пласты известняка с сейсмогенными трещинами, заполненными кремнистым веществом.

маастрихтской толщи, стратиграфически расположенный несколько ниже, чем предыдущий (см. рис. 2, 3). Последовательность наблюдаемых в этом обнажении литологически различных горизонтов следующая.

**А)** Глинисто-карбонатные отложения с линзовидными прослоями черных кремнистых конкреций; интенсивно смяты, многочисленные пластические деформации, местами сильно разрушены (видимая мощность 2.5 м).

**В)** Горизонт известняков палевого цвета, в котором в целом сохранилась первичная слоистая структура отложений; вместе с тем, в них местами наблюдаются признаки нарушений слоистости, связанные с воздействием на отложения некоторых внешних факторов (сейсмичность); в породах содержится примесь биогенного кремнезема (мощность 3–3.2 м).

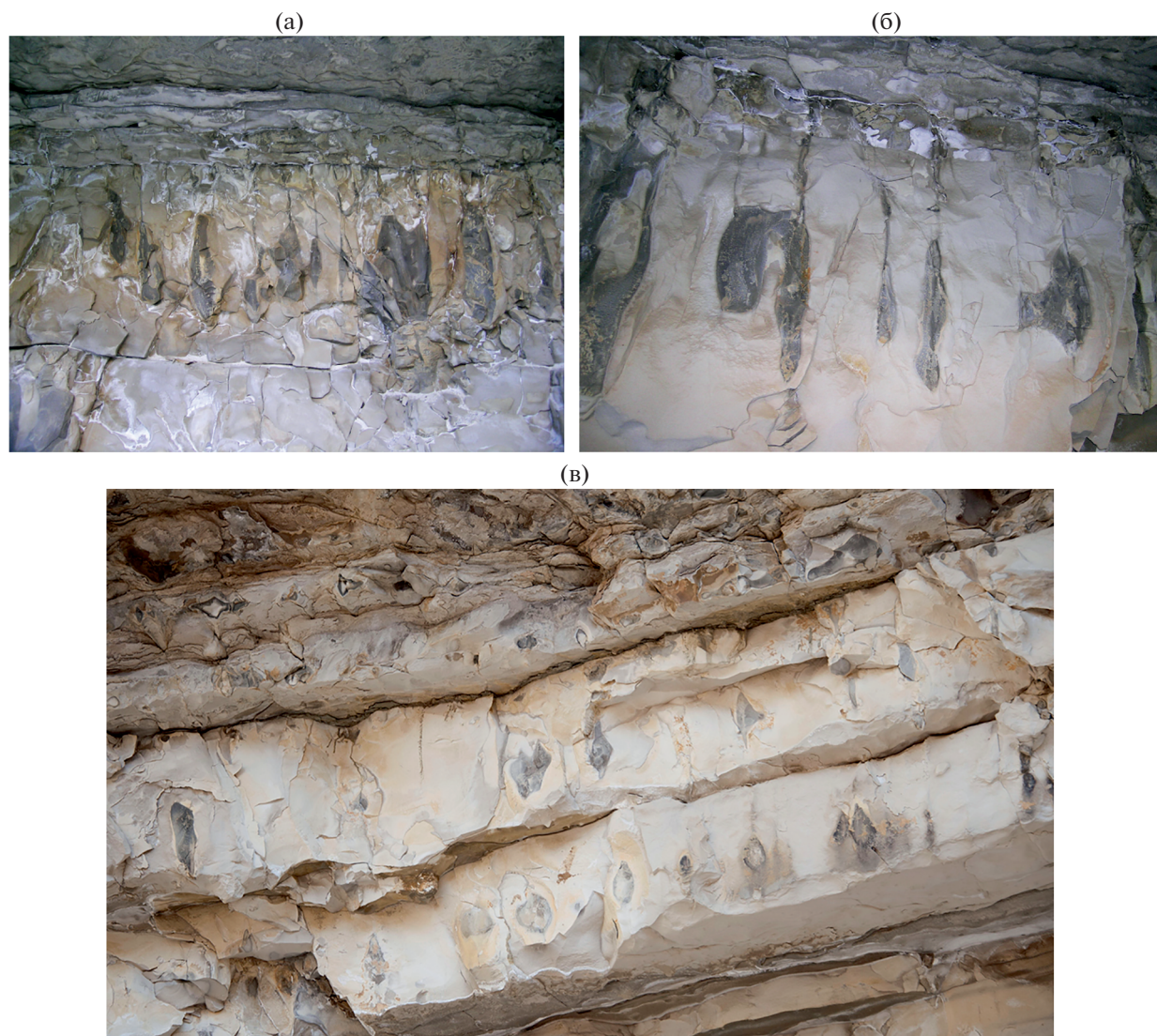
**С)** Карбонатные породы со значительной примесью биогенного кремнезема (мощность 4–4.2 м). Первоначальная слоистая структура существенно нарушена — слои разлинзованы, видны небольшие надвиги (см. рис. 4а), в результате чего седиментационная слоистость в основной части этого горизонта не прослеживается; только в самом верху этого интервала слоистость отчасти сохранилась. В породах горизонта наблюдается система субвертикальных трещин, толщиной 5–10 см, заполненных кремнеземом. Эти трещины сверху подходят к подошве деформированных пород горизонта *D*, а вниз они часто проникают в горизонт *B*. На границе горизонтов *B* и *C* залегает слой крупных кремневых линз (толщина 15–20 см, длина до 10 м и более).

**Д)** Горизонт деформированных карбонатных отложений с примесью биогенного кремнезема и заключающих в себе многочисленные кремнистые стяжения (см. рис. 4б). Характер нарушения слоистости весьма разнообразный — надвиги, пластические деформации, дробление, будинирование и разлинзование пластов и т.д. (см. рис. 4а–в).

В отложениях горизонта *B* залегают достаточно крупные кремнистые образования, ориентированные субвертикально.

На рис. 4г хорошо различимо крупное каплевидное образование, залегающее в горизонте *B* и сложенное преимущественно кремнистым материалом; внутри него видны вертикальные полосы — отражение существовавших здесь трещин. Сверху эта “капля” упирается в темный плотный слой, который является частью кремнистого линзовидного пласта. На рис. 4д видна хорошо выраженная неровная трещина, толщиной около 25 см, также заполненная кремнистым материалом. Она также контактирует со слоем кремнистых линз. Наиболее вероятным механизмом образования этих субвертикальных кремнистых тел была ми-





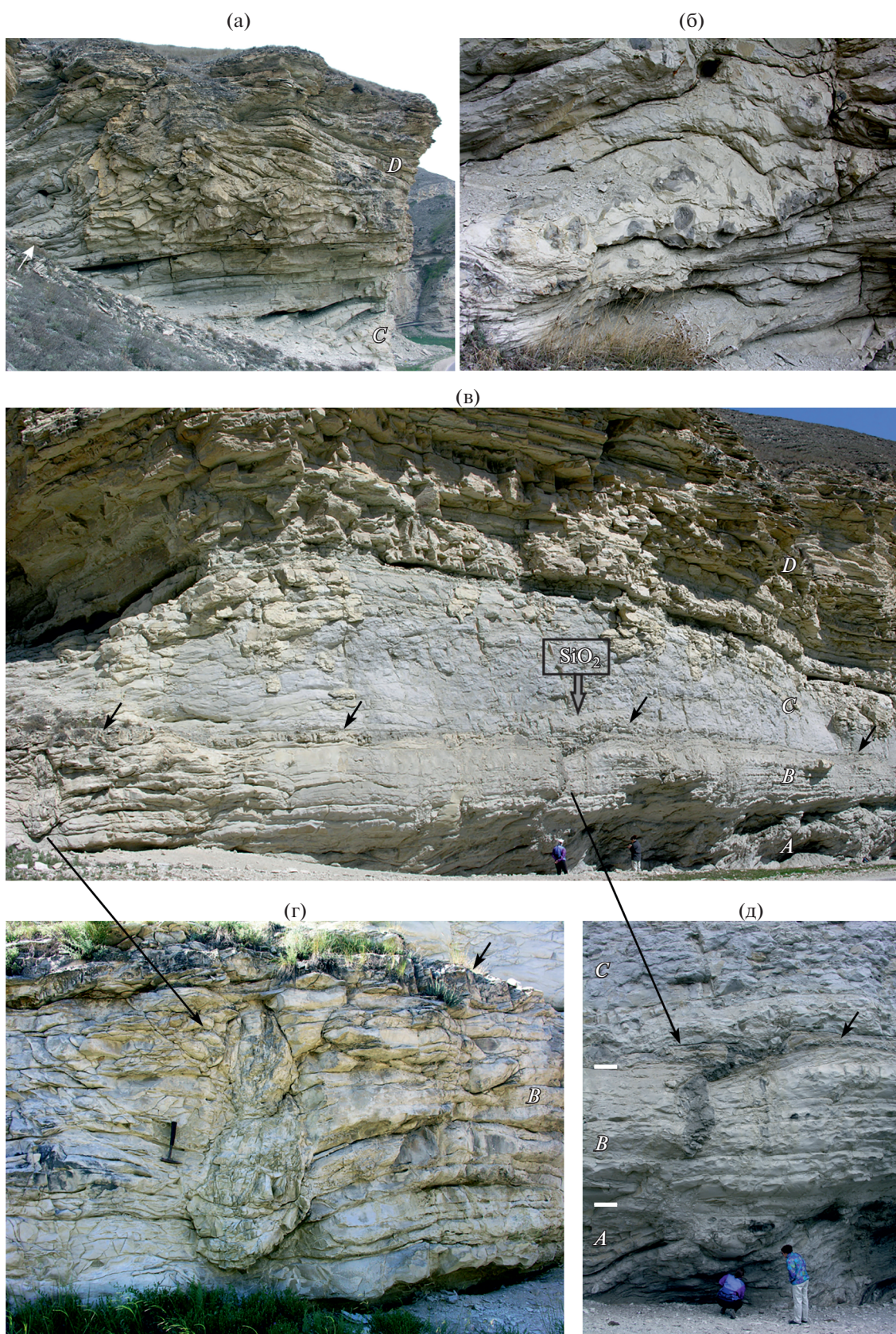
**Рис. 3.** Субвертикальные кремневые тела, образовавшиеся в результате миграции из перекрывающих отложений вниз кремневого геля вдоль сейсмогенных трещин (а–в).

грация кремневого геля из кремневого линзовидного горизонта вниз по ослабленным зонам — сейсмогенным трещинам и заполнение им этих трещин, и проникновение и заполнение порового пространства вмещающих отложений. Следует отметить, что “каплевидное тело” (см. рис. 4г) состоит как бы из двух частей — в центральной части оно заметно сужается. Анализ его взаимоотношения со слоями вмещающих отложений позволяет считать, что формирование этой “капли” происходило в два этапа: вначале в верхней части горизонта *В* за счет миграции вниз кремневого геля образовалось крупное эллипсовидное тело, которое на определенном этапе под действием своего веса начало опускаться вниз. Во время своего механического перемещения оно давило на примыкавшие к трещине слои вмещающих отложений,

что привело к их загибанию вниз. Освободившееся наверху место было заполнено новыми порциями кремневого геля, которые сформировали верхнюю часть каплевидного тела. Пластические изгибы слоев свидетельствуют о том, что их деформация произошла до окаменения пород — на стадии диагенеза осадков. Соответственно, формирование кремнистых тел также являлось результатом диагенетических процессов.

Сравнивая два описанных выше интервала со следами миграции подвижных форм кремнезема, видим, что им присущи схожие черты строения и состава отложений. В обоих случаях на этих интервалах залегают мощные — до 10 м и более горизонты интенсивно деструктурированных отложений с разнообразными формами дислокаций. Их образование было спровоцировано землетрясе-





ниями, периодически случавшимися в этом районе Восточного Кавказа. Под ними выделяются интервалы отложений, в той или иной мере подвергшихся механическому воздействию и в которых возникли многочисленные субвертикальные трещины. При этом в некоторых случаях вследствие перемещающихся осадочных масс (деструктурированные горизонты) в нижележащих слоистых отложениях происходили межпластовые срывы, разлинзование слоев, что приводило к потере их первичной седиментационной структуры (см. рис. 4, горизонт *С*). Совокупность этих явлений приводила к тому, что биогенный кремнезем, который после растворения в диагенезе кремневых организмов (микропланктон) пребывал в этих преимущественно карбонатных отложениях в рассеянном состоянии, сливался в более крупные гелеобразные сгустки. Последние под действием собственного веса начинали перемещаться вниз. На некоторых резких литологических границах происходила их концентрация и образовывались довольно протяженные кремнистые пласты, представлявшие собой цепочки крупных линз (см. рис. 2б, в, слой *II*, рис. 4в—д, слой между горизонтами *В* и *С*). Но поскольку масса кремнистого вещества, скопившегося в этом слое, была достаточно велика, это вещество в свою очередь начинало мигрировать по ослабленным — трещинным зонам в нижележащие отложения, образуя в них субвертикальные кремнистые тела (см. рис. 2б, в, рис. 3, рис. 4в—д).

#### ПРОЯВЛЕНИЯ ДИАГЕНЕТИЧЕСКОЙ МИГРАЦИИ СУЛЬФИДНОГО ВЕЩЕСТВА В КАРБОНАТНЫХ ТОЛЩАХ ВЕРХНЕГО МЕЛА

Помимо следов диагенетической миграции кремнистого материала, нами неоднократно наблюдались следы миграции сульфидного вещества. Ранее некоторые аспекты этого вопроса уже рассматривались [Гаврилов, 2010], но объектами рассмотрения являлись следы миграции сульфидов в отложениях кратонов. В настоящем сообщении обсуждается явление миграции диагенетических сульфидов в отложениях сейсмически активного региона.

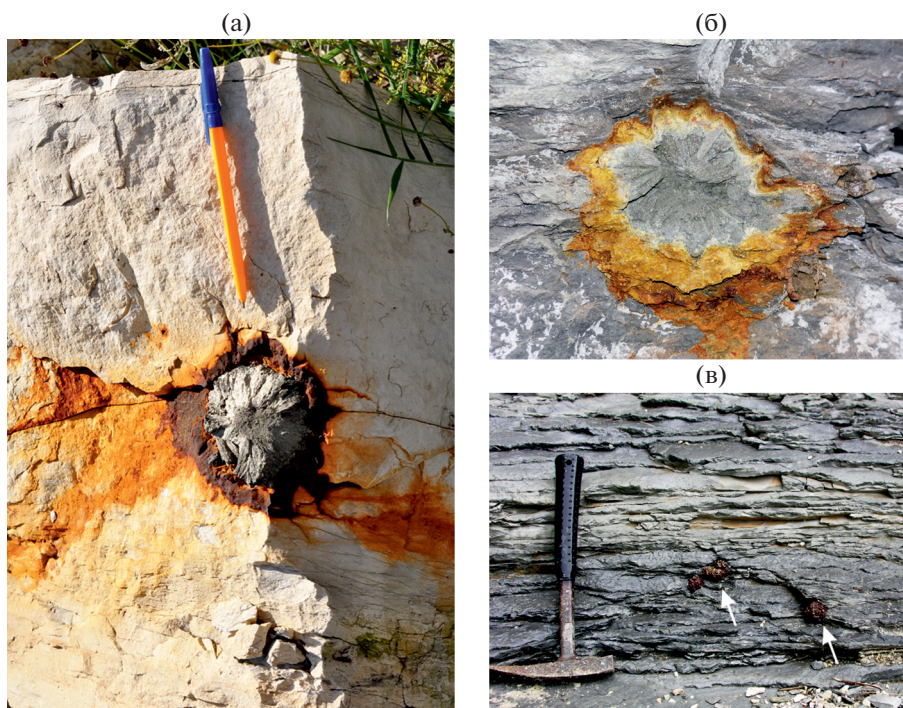
Следует подчеркнуть, что следы миграции сульфидов встречаются не повсеместно в разрезах мезозоя—кайнозоя, а приурочены к интервалам разрезов, где 1) наблюдается чередование пачек карбонатных пород — в основном светлых известняков и обогащенных ОВ темных глинисто-мергелистых отложений, 2) на тех интервалах отложений, которые накапливались в периоды активизации сейсмической активности.

На рис. 5 показаны диагенетические конкреции дисульфидов, образованные по традиционной схеме — стягивание возникшего в обогащенных ОВ осадках сульфидного вещества к некоторым центрам и раскристаллизация гелевого сгустка с оттеснением из него вмещающего карбонатного осадка. В результате возникает сульфидное стяжение, в котором почти полностью отсутствует примесь карбонатного или терригенного материала.

На рис. 6 показаны следы заполнения трещин гидроксидами железа, образованными в результате окисления пирита и возможно некоторых других сульфидных минералов. Связь этих продуктов миграции сульфидов с пластами обогащенных ОВ отложений прослеживается достаточно отчетливо. На рис. 6а, б хорошо видно, что пересекающие пласты известняков трещинки с гидроксидами железа в середине пластов расширяются, образуя незакономерной формы сгустки. Объясняется такая форма скоплений гидроксидов Fe теми же причинами, которые обуславливали приуроченность системы кремневых вертикально ориентированных линз к средней части карбонатных пластов (см. рис. 2, 3), что было связано с различиями в степени диагенетического уплотнения краевых и центральных частей карбонатных пластов. Сульфидный гель во время своего движения по трещине не задерживался в краевых частях пласта, но в его центральной части он проникал в сохранившееся к этому времени поровое пространство и выступал в качестве цемента в прилегающей к трещине породе. В этом случае сульфидная масса хотя и занимала определенный объем осадка и была ограничена отчетливо выраженными границами, но представляла собой мелкозернистый и относительно рыхлый агрегат (см. рис. 6). Поэтому в гипергенных условиях этот сульфидный цемент легко

**Рис. 4.** Карбонатные отложения верхнего маастрихта с деструктурированными горизонтами и следами диагенетической миграции кремниевого вещества (разрез “Герга 2”). в — общий вид обнажения; А—Д — горизонты литологически различных отложений: А — горизонт деформированных карбонатных пород с длинными (до 1 м и более) конкреционными линзами черных кремней, В — горизонт слоистых известняков с относительно слабыми следами воздействия на них сейсмических событий, С — горизонт карбонатных отложений со значительной примесью биогенного кремнезема (наклонными стрелками отмечен линзовидный новообразованный кремнистый слой на границе горизонтов В и С), Д — мощный горизонт деструктурированных карбонатных отложений; а, б — породы деструктурированного горизонта Д, на фото “б” хорошо видны темные сгустки кремнистого вещества в карбонатных породах; г, д — кремнистая “капля” и заполненная кремнистым веществом трещина, сверху примыкающие к кремнистому слою (стрелками показано положение “г” и “д” на “в”).





**Рис. 5.** Диагенетические сульфидные конкреции в сеноманских отложениях. а — конкреция в пласте известняка; б, в — в обогащенных ОВ мергелях (на “в” отмечены стрелками).

окислялся и образовывал рыхлую массу гидроксидов железа (более крупные сульфидные конкреции также были подвержены окислению с поверхности, но в основном сохраняли свою первоначальную структуру и состав (см. рис. 5а, б).

В тех случаях, когда пласт известняка подстилался слоем глинистого мергеля, последний мог служить с одной стороны экраном для дальнейшего перемещения геля, а с другой своеобразным резервуаром, в котором сульфидный гель концентрировался. На рис. 6а, в хорошо видно, как часть сульфидного геля, достигнув нижней части пласта, “растеклась” вдоль более глинистого слоя (зоны его распространения отмечены отрезками линий со стрелками).

Охарактеризовав морфологию типичных следов миграции сульфидного геля, рассмотрим в какой геологической ситуации эти процессы осуществлялись. На рис. 7 показан фрагмент верхне-сеноманской—нижнетуронской толщи (разрез

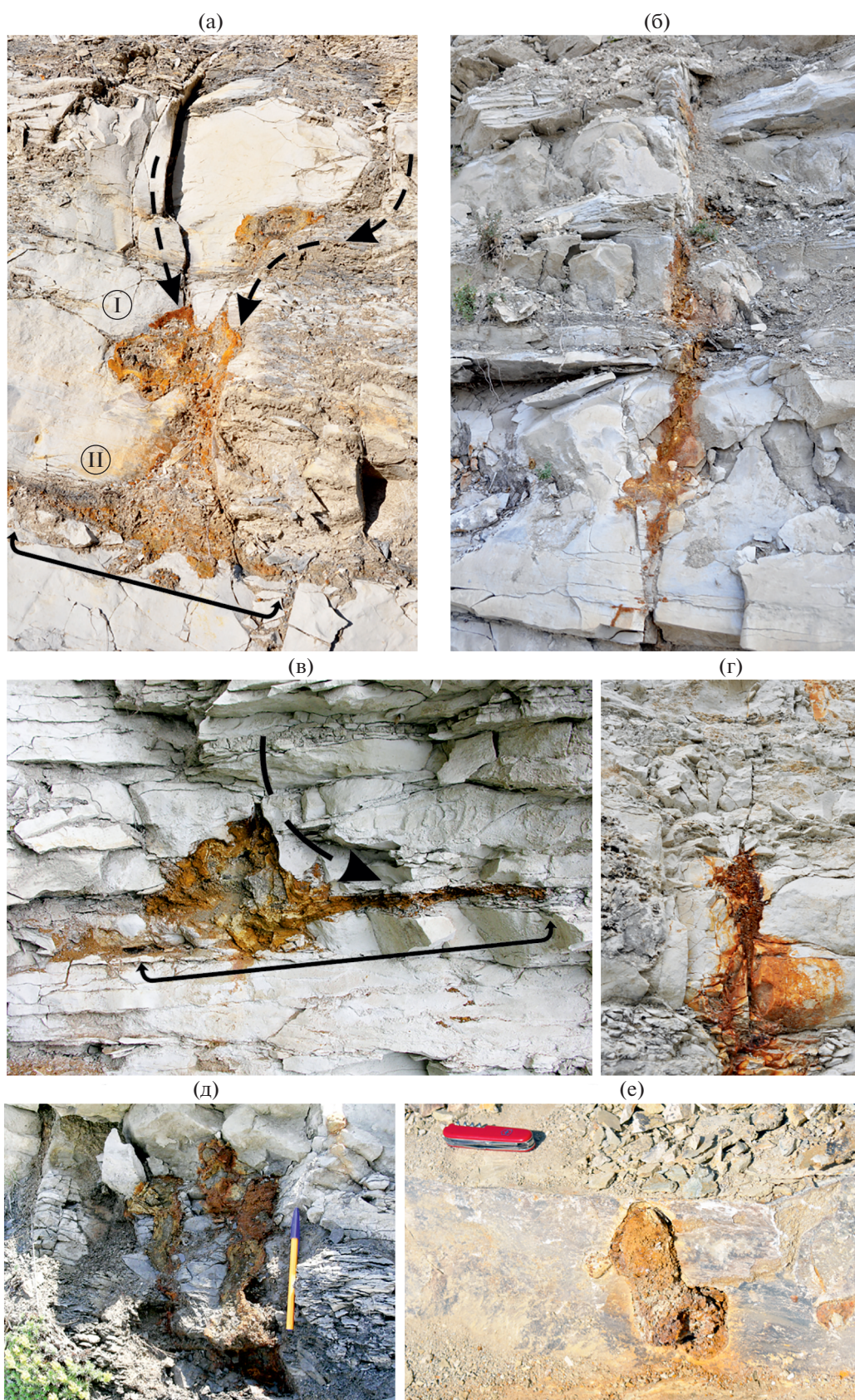
“Акуша”, горный Дагестан). Верхний сеноман здесь представлен толщей чередования известняков и обогащенных ОВ глинистых мергелей. Прежде всего обращает на себя внимание горизонт, в котором отчетливо выражен пологий надвиг одной части пласта на другую. По простиранию этого горизонта в нем наблюдаются и другие деформационные структуры, трещиноватость. По совокупности признаков такие деформации можно рассматривать как возникшие вследствие сейсмического события.

Под деформированным пластом известняка залегает слой темных глинистых мергелей, в котором выделяются две части (см. рис. 7б, в): верхняя, примыкающая к зоне надвига, почти полностью деструктурирована, и нижняя, в целом сохранившая слоистую осадочную структуру. В основании этого слоя — на контакте с нижележащим пластом известняка — залегают линзовидные скопления гидроксидов Fe (см. рис. 7б—г). В некоторых случаях в непосредственной близости к этим линзам

**Рис. 6.** Следы диагенетической миграции сульфидов железа (гидротроилита) вдоль сейсмогенных трещин.

а — сульфидное вещество поступает в трещину сверху: на уровне I — заполнение сульфидом порового пространства в недоуплотненной центральной части пласта карбонатного осадка, на уровне II — зона растекания сульфидного вещества вдоль прослоя глинистого мергеля (зона растекания отмечена отрезком прямой линии со стрелками); б — трещина со следами миграции сульфидного вещества, которое также заполняло свободное поровое пространство в центральной части пласта; в — нижняя часть трещины, заполнявшейся сульфидным веществом, которое растекалось вдоль прослоя глинистого мергеля (зона растекания отмечена отрезком прямой линии со стрелками); г—е — примеры следов диагенетической миграции сульфидов Fe, сопровождавшейся заполнением порового пространства вмещающих их отложений.







(a)



(б)



(в)



(г)





расположены трещины в пласте известняка, также заполненные массой гидроксидов Fe (см. рис. 7г).

Образование линз и трещин, заполненных массой гидроксидов Fe в соответствии с нашими реконструкциями происходило следующим образом.

Сейсмическое событие привело к нарушению первичной структуры пласта известняка и образованию надвигов, некоторых пластических деформаций, появлению трещиноватости, а также перемещению пласта на расстояние, видимо, в несколько метров (~4–6 м). Это перемещение вызвало деструкцию осадочной структуры части глинистого пласта, подстилающего карбонатный пласт. Как сейсмический удар, так и механическое воздействие на обогащенные ОВ осадки, в которых шли процессы диагенетического аутигенного сульфидообразования, привели к тому, что гелевидные микросгустки гидротроилита сливались в более крупные агрегаты, которые под действием собственного веса начинали опускаться вниз. На границе между деструктурированной и сохранившей первоначальную структуру частями слоя глинистых мергелей, обогащенных ОВ, происходило накопление части подвижного сульфидного вещества. Однако эта граница не могла служить полноценной непроницаемой экранирующей поверхностью и часть опускающегося сульфидного вещества преодолевала этот барьер и достигала резкой литологической границы — кровли нижележащего пласта известняка, которая являлась реальным препятствием для миграции сульфидного геля. Здесь — на этой границе — он концентрировался и образовывал сравнительно крупные линзы (см. рис. 7б, в, линзы:  $h \sim 10\text{--}15$ ,  $d \sim 50\text{--}70$  см). Причем часть сульфидного вещества мобилизовывалась также из нижней — не деструктурированной части слоя углеродистых глинисто-мергелистых пород. Если эти скопления сульфидного геля соседствовали с открытыми сейсмогенными трещинами в пласте известняка, происходила дальнейшая миграция сульфидного вещества, которое заполняло эти трещины (см. рис. 7г). Следует отметить, что без образования линз сульфидного геля не могло происходить заполнение секущих слоистость трещин. Поскольку образование стратиформных линз происходило в результате заполнения в глинистом осадке остаточного порового пространства (без “очистительной” раскристаллизации сульфидного мате-

риала), вещество в этих линзах представляло собой сульфидно-глинистую смесь, относительно неплотную, легко окислявшуюся при контакте с кислородом воздуха.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенного описания следов миграции гелеобразных веществ кремнезема и сульфидов, видно, что между ними есть много общих черт. В то же время видно, что масштабы процессов миграции  $\text{SiO}_2$  и  $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  существенно различаются. Это объясняется тем, что, если содержание Fe в осадках не превышает 5%, то содержание примеси биогенного кремнезема в карбонатных осадках могло достигать десятков % и, соответственно, в процессы миграции могли вовлекаться существенно большие массы вещества.

Явление диагенетической миграции сульфидной субстанции установлено в отложениях разных стратиграфических интервалов фанерозоя [Гаврилов, 2010]; отмечается оно также и в четвертичных осадках современных морей. А.Д. Архангельский [1934] отмечал, что в Черном море из обогащенных ОВ древнечерноморских отложений в подстилающие их новоэвксинские слои с очень низким содержанием ОВ происходила диффузия сероводорода и миграция коллоидного моносulfида — гидротроилита. Диффундировавший  $\text{H}_2\text{S}$  реагировал с находившимся в иловых водах  $\text{Fe}^{2+}$ , образуя дополнительные порции гидротроилита. Вследствие этих процессов в верхней части новоэвксинских отложений сформировался гидротроилитовый слой, как бы “подвешенный” к пласту древнечерноморских осадков [Архангельский, 1934; Страхов, 1963, 1976 и др.]. В дальнейшем проблема образования этого сульфидного горизонта обсуждалась в работах [Jørgensen et al., 2004; Neretin et al., 2004 и др.].

Механизмы образования сульфидных прослоев в четвертичных отложениях Восточного Средиземноморья, расположенных под сапропелевыми горизонтами, обсуждались неоднократно [Passier et al., 1996, 1997, 1999 и др.]. Эти исследователи привлекали механизм диффузии  $\text{H}_2\text{S}$  из обогащенного ОВ сапропелевого слоя в протосапропели и реакцией его с железом осадков (т.е. в своих построениях использовали механизм, схо-

**Рис. 7.** Верхнесеноманская толща переслаивания известняков и обогащенных ОВ глинистых мергелей в разрезе “Акуша”. а — общий вид верхнесеноманской и нижнетуронской (светлые известняки) толщ в верхней части толщи — сейсмогенная надвиговая структура: деформирован мощный пласт известняка — 0.8 м и часть подстилающего темного глинистого мергеля; прямоугольником выделен фрагмент обнажения, показанный на б–г; б, в — пунктирной линией обозначена граница между деструктурированной и сохранившей первичную структуру частями глинистого пласта, над этой границей, а также на кровле пласта известняка залегают линзовидные скопления гидроксидов Fe; г — трещина в пласте известняка, заполненная гидроксидами железа, наверху контактирующая с железистыми линзами, из которых диагенетический сульфидный материал поступал в трещину.



жий с тем, который предлагал А.Д. Архангельский).

Помимо диффузионного механизма формирования пиритовых прослоев такого типа, высказывалось предположение о его гравитационной природе — миграции из сапропелевых осадков образованного в них некоторого количества гелеобразного гидротроилита [Страхов, 1963, 1976], что нам представляется наиболее убедительным объяснением происхождения сульфидного слоя [Гаврилов, 2010]. Однако триггером для создания предпосылок к укрупнению гидротроилитовых сгустков с последующим развитием процесса гравитационной миграции сульфидного геля были землетрясения. Оба водоема — Черное море и Восточное Средиземноморье, в осадках которых залегают сапропелевые горизонты, находятся в областях высокой сейсмической активности [Никонов и др., 2018; Burmin, Shumlianskaya, 2018a, б; Guidoboni et al., 1994; Pirazzoli, 1996; Polonia et al., 2013; Shaw et al., 2008, 2010; Stiros, 2010 и др.], поэтому причинно-следственная связь между землетрясениями и реализацией процесса гравитационной миграции сгустков гидротроилита и образованием сульфидного прослоя представляется нам вполне реальной.

Почему же именно в областях подвижных поясов с высокой конседиментационной сейсмической активностью проявляется способность некоторых аутигенных новообразований к миграции на сравнительно большое расстояние?

Нас в данном случае интересуют аутигенные новообразования, которые в процессе формирования проходили стадию геля — такие минеральные субстанции как  $\text{SiO}_2$  и  $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . В условиях спокойного течения процессов диагенеза осадков вначале возникали микроскопической размерности сгустки этих веществ, рассеянные по всему объему осадка. Причем для образования кремнистого геля источником материала были растворившиеся раковинки кремневых планктонных организмов (радиолярии, диатомеи), а также, возможно, остатки кремневой бентосной фауны; источником материала для гидротроилита было железо, содержавшееся в осадке, и сероводород — продукт процессов сульфат-редукции. В дальнейшем микровключения этих веществ могли либо остаться на месте и — как в случае с сульфидом железа — образовать рассеянный в осадках фрамбоидальный пирит, либо могли быть вовлечены в процессы перераспределения аутигенного вещества в осадках, концентрации около некоторых центров и образовании диагенетических конкреций.

Процесс образования гелеобразных микровключений развивался постепенно, и через некоторое время после накопления осадка в нем одновременно сосуществовали как те, которые недавно

возникли, так и те, в которых гелевая субстанция уже начинала “стареть”, что ограничивало их способность к миграции. Однако, в случае сейсмического удара, а в некоторых случаях еще и в результате дополнительного механического воздействия на осадок сместившихся в результате землетрясения деструктурированных осадочных масс, проявлялись тиксотропные свойства геля — происходило одновременное разжижение его новообразованных в диагенезе сгустков, их слияние, что приводило к появлению в осадках значительной массы относительно жидкой субстанции. Эта масса под действием собственного веса начинала опускаться вниз. На резких литологических границах мигрирующее вещество могло задерживаться, концентрироваться и образовывать слои, которые существенно отличались по минеральному составу от вмещающих их отложений. При возникновении проницаемых зон (сейсмогенных трещин) в подстилающих отложениях, гелевидные массы проникали в эти отложения, формируя субвертикальные тела разнообразной морфологии.

Такой “ступенчатый” сценарий развития процессов гравитационной диагенетической миграции аутигенного вещества в отложениях сейсмоактивных областей был характерен для геля как кремнистых, так и железистых соединений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показывают, что приуроченность областей осадконакопления к тектонически спокойным зонам в пределах древних платформ или к сейсмически активным зонам подвижных поясов — в некоторых случаях демонстрирует различия в поведении продуктов диагенеза.

В отложениях бассейнов мобильных поясов на поведение продуктов диагенеза существенное влияние оказывали сейсмические удары. Причем различные классы химических веществ, образованные в диагенезе литологически разных отложений (терригенных, карбонатных) реагировали на это воздействие по-разному.

Ранее нами были рассмотрены процессы вертикальной миграции истинных растворов — бикарбонатов Fe, Ca, Mg в терригенных толщах, в результате чего формировались секущие слоистость субвертикальные карбонатные тела — карбонатные дайки, пирамидальные стяжения и др. [Гаврилов, 1982, 2017]. Движущим механизмом миграции растворов бикарбонатов по сейсмогенным трещинам была разница давлений интерстициальных вод в пластах с различной степенью уплотнения, а движение растворов происходило преимущественно вверх.

Аутигенные минеральные новообразования в глинисто-карбонатных и карбонатных осадках, которые в процессе формирования проходили гелевую стадию, могли при сейсмических ударах вследствие тиксотропных свойств геля приобретать подвижность и мигрировать под действием собственного веса вниз — в смежные горизонты осадков, для которых этот тип минералообразования не был характерным. Причем следы такой миграции вещества нередко ошибочно интерпретируются как проявления гидротермальной деятельности, что может приводить к некорректным генетическим построениям и к необоснованным поисковым рекомендациям. Соответственно, возможность вертикальной миграции аутигенного диагенетического вещества должна учитываться при литолого-геохимических реконструкциях условий формирования древних толщ.

Полученные результаты исследований дополняют и развивают теорию диагенеза в части, касающейся специфики постседиментационных преобразований осадков палеобассейнов, расположенных в различных палеотектонических обстановках.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в соответствии с темой госзадания Геологического института РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архангельский А.Д. Сернистое железо в отложениях Черного моря // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1934. Т. XII. № 3. С. 431–440.
- Бутузова Г.Ю. К минералогии и геохимии сульфидов железа в осадках Черного моря // Литология и полез. ископаемые. 1969. № 4. С. 3–15.
- Волков И.И. Сульфиды железа, их взаимосвязь и превращения в осадках Черного моря // Труды Института океанологии АН СССР. 1961. Т. 50. С. 68–92.
- Волков И.И. Основные закономерности распределения химических элементов в толще глубоководных осадков Черного моря // Литология и полез. ископаемые. 1973. № 2. С. 3–22.
- Волков И.И. Окислительно-восстановительные процессы диагенеза осадков // Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков. М.: Наука, 1979. С. 363–413.
- Гаврилов Ю.О. Диагенетические преобразования в глинистых отложениях (средний миоцен Восточного Предкавказья) // Труды ГИН АН СССР. Вып. 364. М.: Наука, 1982. 100 с.
- Гаврилов Ю.О. Диагенетическая миграция сульфидов в отложениях различных обстановок седиментации // Литология и полез. ископаемые. 2010. № 3. С. 133–150.
- Гаврилов Ю.О. Отражение сейсмических палеособытий в мезозойско-кайнозойских терригенных толщах Северного Кавказа // Литология и полез. ископаемые. 2017. № 1. С. 3–24.
- Диагенез и катагенез осадочных образований / Под ред. Г. Ларсена и Дж.В. Чилингара. М.: МИР, 1971. 463 с.
- Зарицкий П.В. Минералогия и геохимия диагенеза угленосных отложений. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1970. Ч. 1. 224 с.; 1971. Ч. 2. 176 с.
- Литология и геохимия осадков Тихого океана (транс-океанский профиль) // Труды ГИН АН СССР. Вып. 334. М.: Наука, 1979. 263 с.
- Никонов А.А., Гусяков В.К., Флейфель Л.Д. Новый ката-лог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности российского побережья // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 2. С. 240–255.
- Страхов Н.М. Диагенез осадков и его значение для осадочного рудообразования // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1953. № 5. С. 12–49.
- Страхов Н.М. К познанию диагенеза // Вопросы минералогии осадочных образований. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1956. Кн. 3–4. С. 7–26.
- Страхов Н.М. О некоторых новых чертах диагенеза черноморских отложений // Литология и полез. ископаемые. 1963. № 1. С. 7–27.
- Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 574 с.
- Страхов Н.М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза // Труды ГИН АН СССР. Вып. 292. М.: Наука, 1976. 299 с.
- Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 671 с.
- Berner R.A. Migration of iron and sulfur within anaerobic sediments during early diagenesis // Amer. J. Sci. 1969. V. 267. № 1. P. 19–42.
- Berner R.A. Early diagenesis: a theoretical approach. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1980. 241 p.
- Burmin V.Yu., Shumlyanskaya L.A. On the Problem of Deep Earthquakes in Crimea–Black Sea Region // Seismic Instruments. 2018a. V. 54. № 3. P. 362–371.
- Burmin V.Yu., Shumlyanskaya L.A. Spatial distribution of earthquake hypocenters in the Crimea – Black Sea region // J. Seismology. 2018b. V. 22. № 2. P. 391–405.
- Guidoboni E., Comastri A., Traina G. Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th century. SGA. Bologna: Istituto Nazionale di Geofisica, 1994. 504 p.
- Curtis C.D., Spears D.A. The formation of sedimentary iron minerals // Econ. Geol. 1968. V. 63. № 3. P. 257–270.
- Jørgensen B.B., Bottcher M.E., Luschen H. et al. Anaerobic methane oxidation and a deep H<sub>2</sub>S sink generate isotopically heavy sulfides in Black Sea sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. V. 68. № 9. P. 2095–2118.
- Magara K. Compaction, Filtration and Osmosis shales and their significance in primary migration // Bull. Amer. Assoc. Petrol. 1974. V. 58. № 2. P. 283–290.
- Neretin L.N., Bottcher M.E., Jørgensen B.B. et al. Pyritization processes and greigite formation in the advancing sulfidation front in the Upper Pleistocene sediments of the Black Sea // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. V. 68. № 9. P. 2081–2093.
- Passier H.F., Middelburg J.J., van Os B.J.H., de Lange G.J. Diagenetic pyritisation under eastern Mediterranean sapropels caused by downward sulphide diffusion // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. V. 60. № 5. P. 751–763.



- Passier H.F., Middelburg J.J., de Lange G.J., Bottcher M.E.* Pyrite contents, microtextures, and sulfur isotopes in relation to formation of the youngest eastern Mediterranean sapropel // *Geology*. 1997. V. 25. № 6. P. 519–522.
- Passier H.F., Middelburg J.J., de Lange G.J., Bottcher M.E.* Modes of sapropel formation in the eastern Mediterranean: some constraints based on pyrite properties // *Marine Geology*. 1999. V. 153. P. 199–219.
- Pirazzoli P.A., Laborel J., Stiros S. C.* Earthquake clustering in the Eastern Mediterranean during historical times // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 6083–6097.
- Polonia A. et al.* Mediterranean megaturbidite triggered by the AD 365 Crete earthquake and tsunami // *Sci. Reports*. 2013. V. 3. № 1285. P. 1–12.
- Raiswell R., Berner R.A.* Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments // *Amer. J. Sci.* 1985. V. 285. № 8. P. 710–724.
- Rickard D.T.* Kinetics and mechanism of pyrite formation at low temperatures // *Amer. J. Sci.* 1975. V. 275. № 6. P. 636–652.
- Shaw B. et al.* Eastern Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the AD 365 earthquake // *Nature Geosci.* 2008. V. 1. P. 268–276.
- Shaw B. et al.* Radiometric dates of uplifted marine fauna in Greece, Implications for the interpretation of recent earthquake and tectonic histories using lithophagid dates // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 297. P. 395–404.
- Stiros S.C.* The 8.5+ magnitude, AD 365 earthquake in Crete: Coastal uplift, topography changes, archaeological and historical signature // *Quaternary International*. 2010. V. 216. Iss. 1–2. P. 54–63.
- Sujkowski Zb.* Diagenesis // *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 1958. V. 42. № 11. P. 2692–2717.

## Features of Behavior of Diagenesis Products in Sediments of Seismically Active Regions

**Yu. O. Gavrilov\***

*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bl. 1, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: yugavrilov@gmail.com*

In the Cretaceous and Paleogene sedimentary strata of the Eastern Caucasus, traces of vertical migration of substances that occurred during the diagenesis of sediments, which passed the gel stage during their formation (silica, Fe-sulfides), were found. Signs of migration of SiO<sub>2</sub> compounds were recorded in carbonate deposits with an admixture of biogenic silica; traces of migration of sulfide matter were confined to the intervals of interlayer of limestone strata and clay marls enriched with organic matter. The development of migration processes of autigenic diagenetic substance was initiated by the impact of earthquakes and associated horizons of destructured sediments on the sediments. The phenomenon of this kind of migration of matter is typical for zones with high seismic activity, which determines the specifics of diagenetic processes in the sediments of paleobasins of mobile regions, distinguishing them from post-sedimentation transformations in craton sediments.

**Keywords:** diagenetic transformations, migration of matter, silica, hydrotroilite, destructured deposits, seismicity, North-Eastern Caucasus.