

УДК 551.24

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОТРУЗИИ КАК ТИПОВАЯ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТРАГРАНИТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

© М.Г. Леонов

*Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7
e.mail: mgleonov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.01.2019 г.; после исправления 27.01.2019 г.; принята в печать 28.01.2019 г.

В статье рассмотрены вопросы, связанные с изучением постмагматической тектоники гранитов и формированием интрагранитных залежей углеводородов: особенности постмагматической структуры гранитных массивов, в том числе содержащих углеводороды; механизмы структурно-вещественной переработки, экзугмации и формирования пустотно-порового пространства в пределах гранитных тел на постмагматической стадии их эволюции; наличие и распространение залежей углеводородов в гранитных массивах, расположенных в различных регионах и геодинамических обстановках; описание кристаллических тел протыкания – гранитных протрузий. Оценена роль структурно-тектонического фактора в формировании интрагранитных залежей углеводородов и предложена эволюционная структурно-тектоническая модель их образования в пределах гранитных массивов и, прежде всего, гранитных протрузий.

Ключевые слова: граниты, гранулированные среды, инфраструктура, протрузия, тектоника, углеводороды

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019324-41>

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена светлой памяти академика Юрия Георгиевича Леонова – моего старшего брата, геолога, коллеги и соавтора, который в своей научной деятельности много внимания уделял проблемам тектоники консолидированной земной коры и геологии глубинных залежей углеводородов и который был одним из инициаторов и руководителей Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Углеводороды с глубоких горизонтов в “старых” нефтегазодобывающих регионах как новый источник энергоресурсов: теоретические и прикладные аспекты”.

Обеспечение ресурсной базы – одна из основных задач экономической политики любой страны, и Россия здесь не исключение. Задача включает два прогностических аспекта: тактический – определение путей и механизмов разведки, добычи и переработки сырья, и стратегический – прогнозирование путей и механизмов развития сырьевой отрасли на основе совокупности научно-технических знаний. Стратегия прогнозирования и поисков новых месторождений полезных ископаемых связана, прежде всего, с выбором научных парадигм, которые должны быть положены в основу прогностической деятельности. Суть парадигм, на которых главным образом строится в настоящее время политика развития углеводородной сырьевой базы, заключена в трех положениях [6]:

- источником углеводородного сырья являются “нефтематеринские” осадочные толщи;
- углеводородное сырье образует залежи, расположенные главным образом в осадочных отложениях;
- именно к осадочным породам чехлов приурочены основные запасы углеводородов. Правильность этих предпосылок подтверждена практикой нефтегазовой геологии, но при таком подходе гораздо меньше внимания уделено изучению залежей углеводородов в пределах кристаллического основания [6]. Тезис этот подтверждается и словами известных геологов-нефтяников. В частности, один из ведущих специалистов в области нефтяной геологии, индийский ученый А. Сиркар [84], писал, что резервуары нефти в фундаменте, хотя и были известны нефтегазовой индустрии, обычно рассматривались как непродуктивные, не привлекали внимания эксплуатационников, и их зачисляли в “неэкономический потенциал”, а их разведочное бурение было предоставлено воле случая. В том же ключе высказывались и российские ученые [7, 64].

Тем не менее наличие скоплений (или проявлений) углеводородов в кристаллических породах фундамента континентов и дна акваторий не вызывает сомнений, и подавляющее число месторождений углеводородов в фундаменте сосредоточено в гранитах (рис. 1) [2, 7, 13–15, 17, 20, 26, 27, 29,

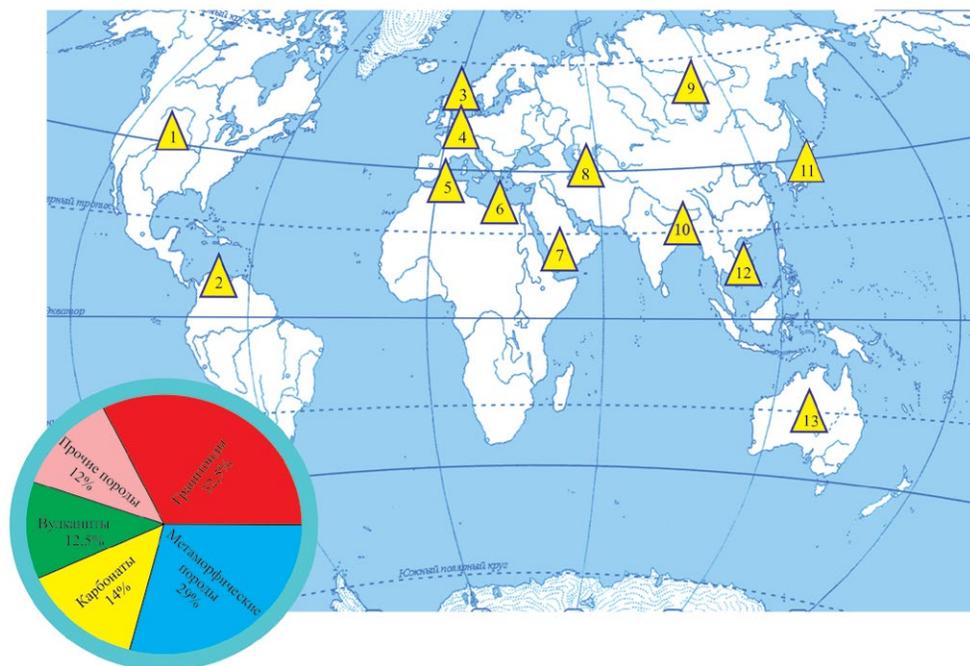


Рис. 1. Схема распространения месторождений углеводородов в породах фундамента различных регионов, в том числе, в гранитах.

Номера в треугольниках: 1 – Мид-Континент; 2 – Венесуэла; 3 – Североморский бассейн; 4 – Рейнский грабен; 5–6 – Северная Африка; 7 – Йемен; 8 – Южный Казахстан; 9 – Восточная Сибирь; 10 – Индия; 11 – Япония; 12 – Вьетнам; 13 – Центральная Австралия.

Вставка: количество (в %) месторождений углеводородов в различных породах фундамента (по данным [2]).

30, 38, 42, 43, 53, 62, 64, 65, 67, 76, 77, 81, 82, 88]. В статье рассмотрена проблема формирования залежей углеводородов в породах консолидированного фундамента, прежде всего, гранитного. При этом вопросы происхождения углеводородов в статье не затрагиваются – это отдельная тема и ей занимаются специалисты соответствующего профиля. Эта работа касается структурно-тектонического аспекта формирования залежей углеводородов в гранитных массивах на постмагматической стадии их существования.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГРАНИТАХ

К сегодняшнему дню в пределах фундамента выявлено около 450 месторождений углеводородов и порядка ста из них разрабатывается в промышленных масштабах (рис. 1). Углеводороды известны в фундаменте платформ (Мид-Континент в штате Канзас США, Северная Африка, Бразилия) и молодых плит (Венесуэла, Западная Сибирь), межгорных впадин (Калифорния, Панонский бассейн, Китай), шельфов окраинных и внутренних морей (Зондский шельф, Северное море) и океанов (шельф Индии). Многие месторождения принадлежит к уникальным и крупным, и они поставляют $\approx 15\%$ мировых запасов нефти. Из гранитов извлекается более 30% запасов от об-

щего объема углеводородов в фундаменте [1, 2, 7, 15, 20, 26, 27, 42, 64].

На территории Мид-Континента (штат Канзас, США) установлено несколько нефтегазовых месторождений в породах докембрийского фундамента и в переотложенных корах выветривания [77]. Коллекторами являются трещиноватые биотитовые граниты и порфириды, слагающие погребенные выступы фундамента. Нефть содержат также шлейфы гранитного шебня и дресвы – продукты переотложенной коры выветривания. В пределах Сиртского бассейна Ливии одним из наиболее крупных является месторождение Нафора-Ауджила, приуроченное к погребенному гранитному кряжу [1, 39] (рис. 2). Месторождение Хургада, расположенное на борту Суэцкого рифта [53], связано с системой купольно-блоковых структур кристаллического фундамента, представленного гранитогнейсами докембрийского возраста. Породы сильно трещиноваты и затронуты активными гидротермальными процессами. Нефтенасыщенными являются зоны деструкции. Флюидоупором нефтяных залежей служит толща гипсоносно-соленосных отложений миоценового возраста. В фундаменте флюидоупорами также являются монолитные пластины кристаллических пород. На северном борту Донецкого бассейна [51] открыты месторождения нефти и газа в породах кристаллического фундамента (Гашиновская

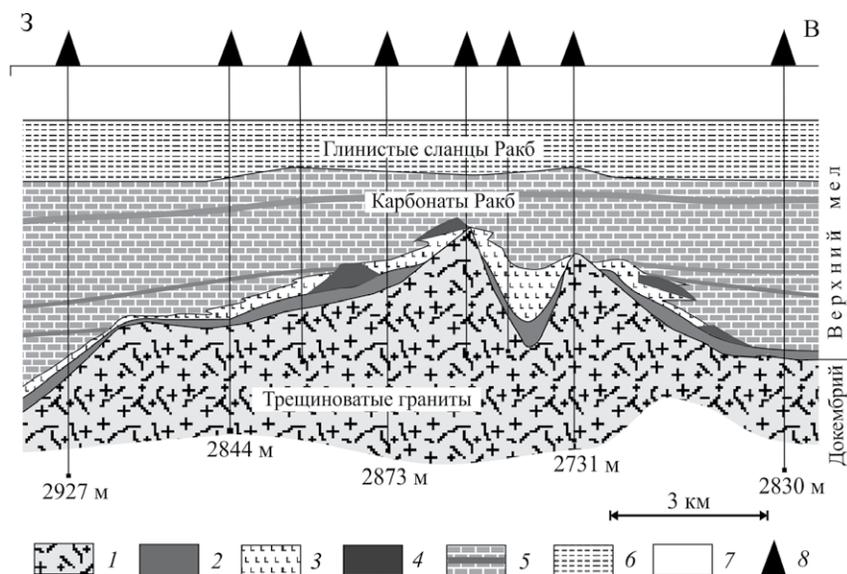


Рис. 2. Месторождение Нафора-Ауджила (по данным [1, 39], с изменениями и дополнениями).

1 – трещиноватые гранитоиды фундамента, докембрий; 2 – песчаники, кембро-ордовик; 3 – лавы; 4 – рифовые массивы; 5 – карбонатные отложения, верхний мел; 6 – глинистые сланцы, верхний мел; 7 – вышележащие осадки и водный слой, неразделенные и вне масштаба; 8 – буровые скважины

площадь). Нефтяные залежи расположены в зонах разуплотнения на глубинах до 1000 м от поверхности фундамента, а также в коре выветривания по породам фундамента. Несколько скважин, достигших гранитов, дали фонтанные притоки нефти. В пределах Южно-Мангышлакского нефтегазозносного района расположена структура Оймаша, представляющая собой купол, сложенный палеозойскими гранитами (рис. 3) [38]. Промышленная залежь нефти расположена в пределах приподнятого блока фундамента на глубинах 3600–3800 м. Нефтеносные горизонты установлены в отложениях нижней юры, триаса и в гранитах фундамента. Около 80% общего притока нефти получены из катаклазированных гранитов приподнятого блока, имеющего форму купола.

Известны месторождения нефти, расположенные в фундаменте на морских шельфах. На шельфе Аравийского моря расположено месторождение Мумбай [83], где скопления нефти приурочены к поднятию гранитизированных пород докембрийского фундамента, перекрытого терригенными и карбонатными породами осадочного чехла (рис. 4). Массив характеризуется интенсивной раздробленностью, повышенной пористостью и проницаемостью пород. Скопления нефти сосредоточены в объемных зонах повышенной трещиноватости гранитов. Нефтяные месторождения, расположенные в пределах поднятий гранитного фундамента, известны также на Шетландских островах (рис. 5), в прибортовой части грабена Викинг (Северное море), в гранитах фундамента Зондского шельфа Южно-Китайского моря (месторождение Белый тигр) [2, 17]. Потенциально

нефтегазозносными являются породы фундамента Скандинавского щита [2], Западной Сибири [13, 14], Татарского свода Восточно-Европейской платформы [13, 15, 53, 54], и во всех регионах залежи или проявления углеводородов расположены преимущественно в породах гранитного состава.

Из этого краткого обзора следует, что залежи углеводородов в породах кристаллического фундамента, особенно гранитного, имеют широкое распространение и известны практически на всех континентах, и их образование сопровождается двумя обязательными условиями [2, 7, 27, 53, 80, 83]: формированием постмагматических положительных морфоструктур фундамента (куполов, горстов) и интенсивной постмагматической тектонической переработкой, приводящей к частичной или полной раздробленности породных массивов (см. рис. 5, рис. 6), а также [17].

ПОСТМАГМАТИЧЕСКАЯ ТЕКТОНИКА ГРАНИТОВ

Материалы, полученные в результате бурения и применения дистанционных методов, хотя и дают существенную информацию, требуют уточнения и дополнения на основе прямых наблюдений, что возможно при изучении гранитных массивов, эксгумированных на дневную поверхность. Были изучены массивы, входящие в фундамент различных геоструктур: древних щитов (Кумсинский купол Балтийского щита), срединных массивов (Дзирульский массив, Грузия), активизированных платформ (Тугнуйский горст, массив горы Шерловой в Забайкалье; массивы Дзурамтай, Танын, Их-

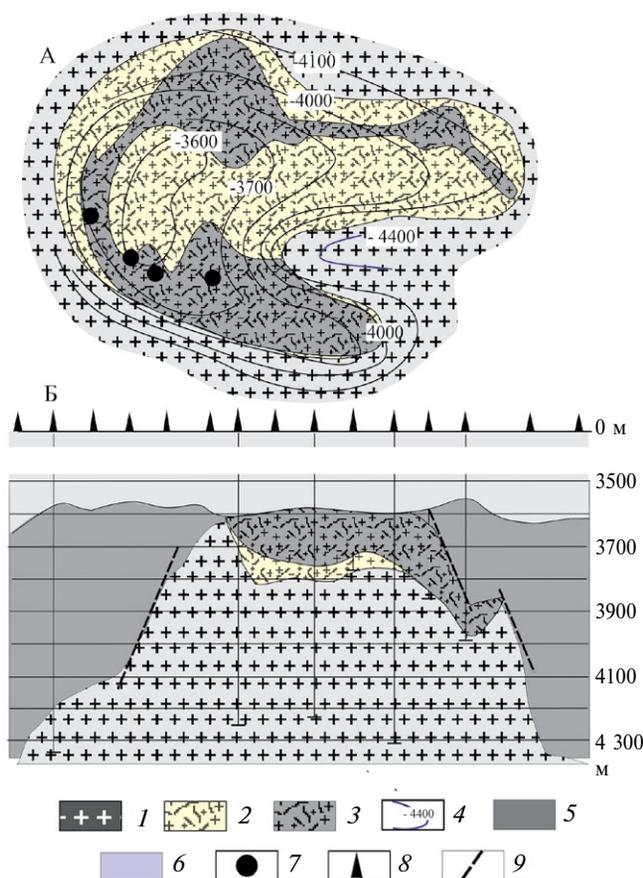


Рис. 3. Площадь Оймаша (по данным [38], с упрощениями и изменениями) А – структурный план кровли резервуара; Б – поперечный профиль через гранитный купол 1 – палеозойские граниты; 2 – разуплотненные и трещиноватые граниты; 3 – область интенсивной дезинтеграции гранитов, содержащие основные запасы нефти; 4 – изогипсы по кровле гранитов (в м); 5 – метаморфические породы (Pz?); 6 – осадочный чехол (N-J); 7 – скважины, давшие притоки нефти; 8 – расположение скважин на поверхности; 9 – зоны интенсивного дробления пород (предполагаемые разломы)

Хайрхан в Монголии), новейших орогенов (массивы Сулутерекский, Кызыл-Чоку, Чонкурчак и др., на Тянь-Шане), детальное описание постмагматической тектоники которых приведено в [25] и других работах этих авторов, и вряд ли оно нуждается в повторении. Подчеркнем лишь главное.

Инфраструктура и коллекторские свойства гранитов

Породы перечисленных выше гранитных массивов как погребенных, так и эксгумированных интенсивно дезинтегрированы: раздроблены, брекчированы, катаклазированы (см. рис. 6, рис. 7). Выделяются различные (экзогенные и эндогенные) факторы, ответственные за дезинтеграцию

гранитных массивов, которые (факторы) действуют одновременно или в определенной последовательности, приводя к изменению структуры пород, вариациям объема порового пространства и степени его проницаемости для флюидов. К первой категории относят процессы химического и физического выветривания [12], и их влияние на структуру пород ограничено приповерхностной зоной. Эндогенные факторы более разнообразны, и среди них указываются [1, 2, 3, 7, 8, 14, 15, 26, 33, 34] аутометасоматоз, контракционная усадка, тектоно-кессонный эффект, гидротермально-пневматолитовые процессы, тектонический фактор.

Действие этих механизмов влияет на степень и форму дезинтеграции породных субстанций и приводят к изменению их реологических параметров и коллекторских свойств деформируемых объемов за счет ослабления (нарушения) межфрагментарных, межзерновых и внутризерновых связей. Пористость неизменных гранитов обычно не превышает 1–1,5% (иногда – всего 0,2% от объема породы) [56, 57]. Анализ данных [2, 3, 32, 37, 38, 40–43, 56, 57, 74] и расчеты, осуществленные на их основе Е.С.Пржиялговским, позволяют оценить и уточнить значение некоторых факторов в общем процессе дезинтеграции гранитных массивов [24, 25, 45, 46].

Вкратце эти данные сводятся к следующему (рис. 8). Контракционная усадка проявляется при остывании гранитного массива. Суммарный эффект термоусадки массива в интервале от 600 до 20 °C в основном лимитируется соотношением усадки главных породообразующих минералов: полевых шпатов и кварца. Полевые шпаты, составляющие 50–70% объема породы, демонстрируют близкие величины контракционной усадки в большом интервале T° и образуют связный каркас, определяющей уменьшение объема породы в целом на ≈1,15% от исходного. Изменение объема кварца иное – при остывании массива до T° перехода из бета- в альфа-модификацию (575 °C) кварц несколько увеличивается в объеме, но при дальнейшем снижении T° его контракционная усадка превосходит усадку полевых шпатов в среднем в 4 раза. Кварц занимает 25–30% объема гранитов, и его аномальная усадка (на 4,54%) при снижении температуры с 600 до 20 °C, создает условия для увеличения внутренней пустотности породы на 1,2% в пересчете на весь объем. Величина усадки кварца несколько различается в направлении разных кристаллографических осей, в результате чего в зернах кварца и на его границах с полевыми шпатами возникают “области отслаивания” (рис. 9). Положение и амплитуда раскрытия пустот определяется положением кристаллографических осей каждого из зерен. Несмотря на потенциально значительный объем подобных зон отслаивания, их фильтрационные показатели, по-видимому, невелики, так как трещины локализованы и не объединены в сколько-нибудь протяженные сквозные

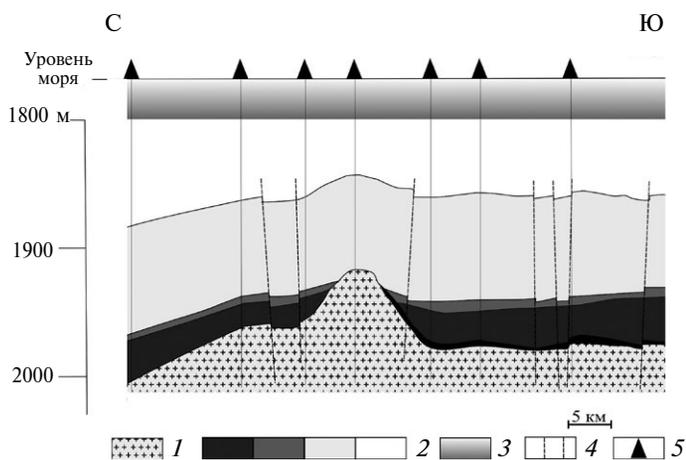


Рис. 4. Поднятие гранитизированных пород в фундаменте шельфа Индии (месторождение Мумбай) (по данным [83], значительно схематизировано).

1 – гранитизированные породы джебрийского фундамента; 2 – отложения осадочного чехла; 3 – вышележащие осадки и водный слой, неразделенные и вне масштаба; 4 – разломы; 5 – буровые скважины

системы. Приведенные выше оценки, конечно, приблизительны, поскольку процесс остывания интрузива сопровождается минеральными преобразованиями, особенно активными в интервале 600–200 °С, и реальный вклад контракции в формирование порового пространства составляет не более 2% от объема породы [45] (см. рис. 8).

Тектоно-кессонный эффект находит отражение в увеличении объема массива и его растрескивании [34, 37, 47, 71] при выведении в более высокие относительно первоначального положения горизонты коры, эксгумации и денудации вышележащих отложений. Возникающая при этом трещиноватость связана с формой массива, строением пород рамы и морфологией, если массив выходит на дневную поверхность, но в целом инфраструктура отражает обстановку объемного расширения (рис. 10). Однако увеличение объема и порового пространства за счет тектоно-кессонного эффекта незначительны. При эксгумации остывшего массива с глубины около 3 км при остывании со 100 до 20 °С и уменьшении литостатического давления с 1 кб до 1 б изменение объема пород и объема межзернового пространства составляет 0.02% и <0.01% соответственно. При остывании с 200 °С объем уменьшается на 0.24%, а внутренняя пористость увеличивается на 0.15%. Контракция и тектоно-кессонный эффект в принципе должны приводить к противоположным результатам и могут взаимно компенсировать друг друга. Так, например, при подъеме полностью раскристаллизованных и остывших гранитов при геотермическом градиенте 30 °С/км увеличение объема кристаллов кварца и полевых шпатов практически компенсируется их контракционной усадкой.

Гидротермально-пневматолитовые процессы, сопровождающиеся минеральными новообразованиями, метасоматозом и рекристаллизацией, проявляются импульсами в течение всей истории существования гранитных тел, в том числе и на постмагматической стадии, изменяя исходный состав и структуру пород. Автосоматические процессы и проявления рекристаллизации не улучшают емкостные или фильтрационные свойства пород, а наоборот – могут нейтрализовать изменение объема массива, вызванное другими протектоническими факторами за счет формирования новых минеральных фаз.

Собственно гидротермально-пневматолитовые преобразования могут активно влиять на изменение проницаемости и коллекторских свойств в ту или иную сторону. Они ведут к замещению относительно твердых и устойчивых к деформации минералов новыми минеральными фазами с более низкими показателями предела прочности и твердости, следовательно, к разуплотнению породы. Последующие вариации температуры и состава флюидов приводит к растворению, переотложению и формированию минеральных фаз, залечиванию трещин, образованию каверн. Растворы могут стимулировать возникновение и раскрытие трещин благодаря механизму “гидроразрыва” [43].

Эта категория факторов может обеспечить до 2–3% эффективной пористости, как это установлено, например, для месторождения Белый Тигр, где высокодебитные участки маркируются зонами цеолитизации [2, 42]. В процессе гидротермально-пневматолитового воздействия соотношения процессов “растворение/отложение” минеральных компонентов не стабильно и зависит от многих химических и физических факторов. На месторож-

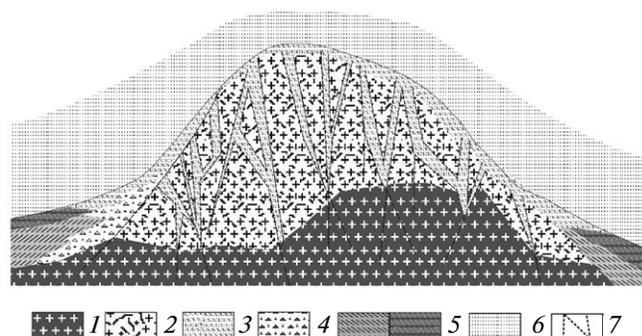


Рис. 5. Принципиальная схема строения погребенного гранитного массива, Шетландские острова (по данным [81], с упрощениями и изменениями).

1–2 – граниты фундамента: 1 – относительно слабо измененные, 2 – интенсивно раздробленные и катаклазированные; 3 – гранитные катаклазиты in situ и перемещенные; 4 – осыпные гранитные брекчии; 5–6 – отложения осадочного чехла: 5 – пермо-триасовые отложения, 6 – меловые отложения; 7 – разломы

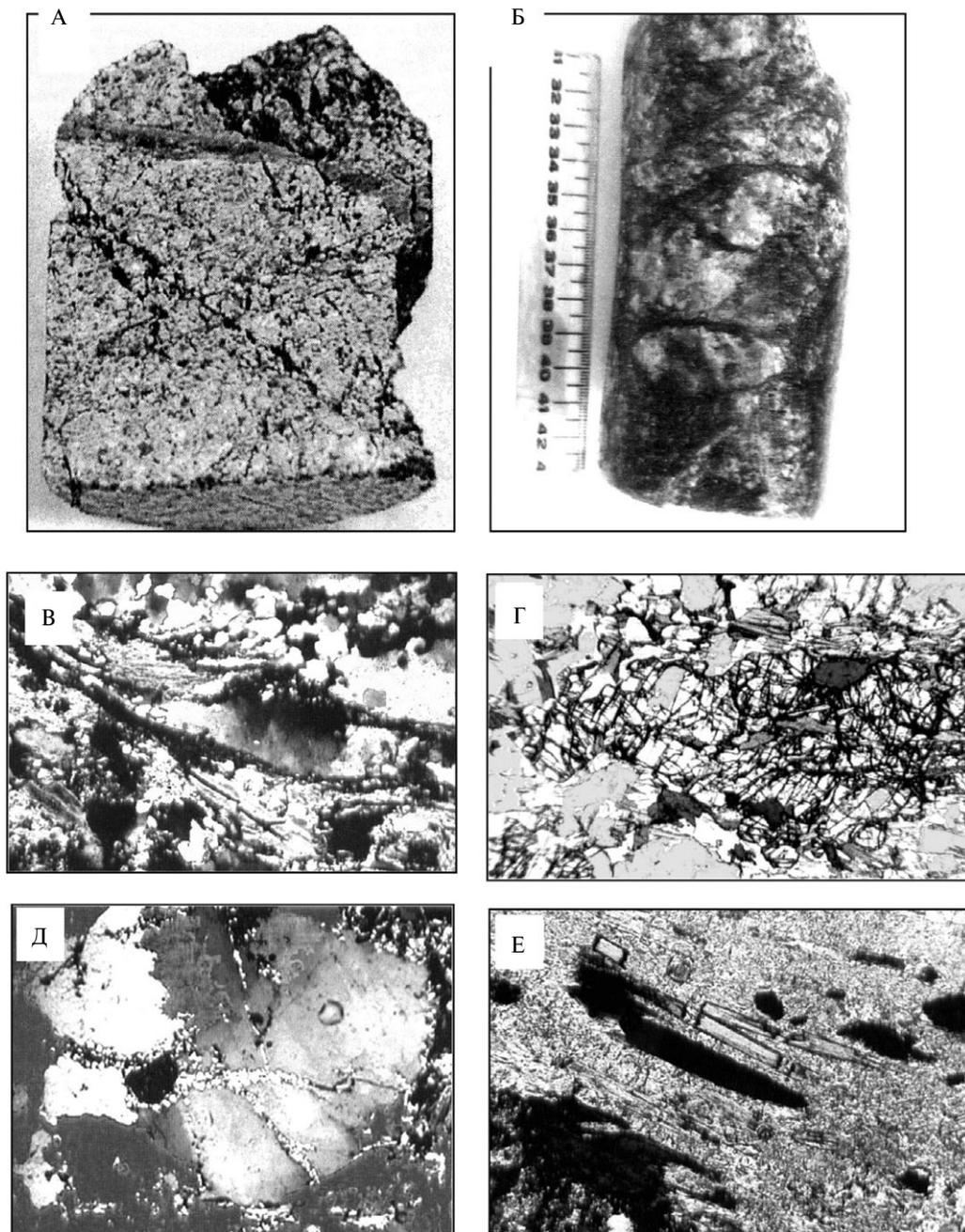


Рис. 6. Катаклазированные и измененные породы фундамента.

А–Б – месторождение Белый тигр (по [2]), раздробленные граниты с трещинами и кавернами, заполненными нефтью.

В–Е – Татарский свод (по [53]): В – Хлоритизация и серицитизация по blastsмилониту; Г – хрупкая деформация с двумя системами трещин в гранат-биотитовом гнейсе; Д – заполненные эпидотом трещины декомпрессии в деформированном кварце и сосюритизация плагиоклаза; Е – гидротермально переработанная порода; возникшие в процессе деформации пустоты полностью заполнены гидрослюдисто-серицитовой массой с выделениями пиробитумоидов.

дении Белый Тигр растворение превалировало над отложением цеолитов и местами способствовало увеличению емкости трещинно-кавернозных коллекторов. На месторождении Оймаша [38], напротив – минерализованные растворы залечивают трещины, каверны и зоны катаклаза кальцитом,

окислами железа и марганца, вплоть до образования непроницаемых для углеводородных жильных экранов. Вследствие этого достоверно оценить вклад гидротермальных процессов в изменение (особенно улучшение) фильтрационно-емкостных свойств пород вряд ли возможно. Но как бы там

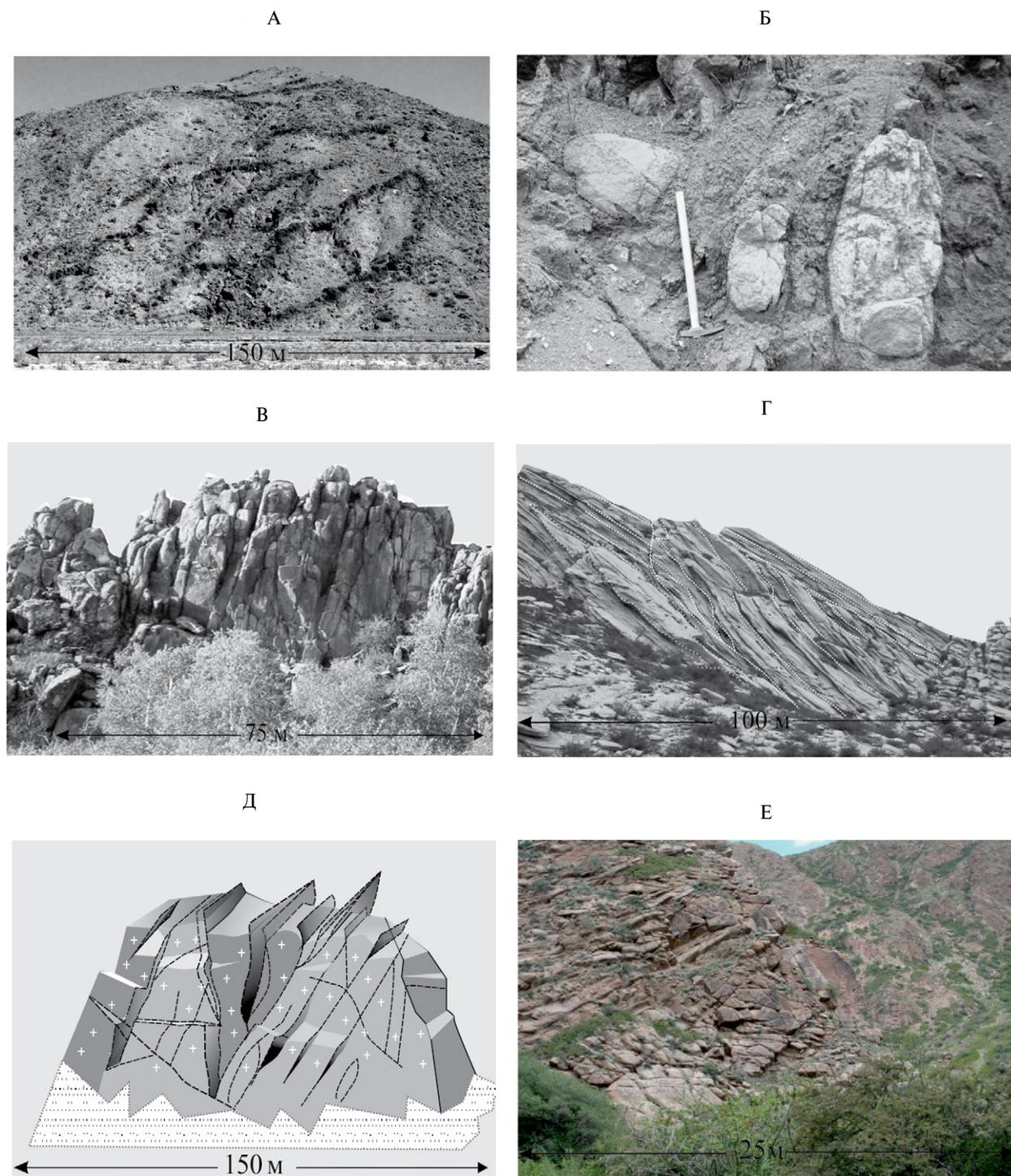


Рис. 7. Постмагматическая структура гранитов.

А – линзовидно-петельчатая структура пермских гранитов (Гобийский Алтай); дезинтегрированные граниты (относительно светлые поля) пронизаны переплетающимися пластообразными объемами брекчированных пород (темные полосы);

Б – катаклазированный гранитный матрикс с относительно монолитными фрагментами исходного гранита (C_2) (Тугнуйский горст, Забайкалье);

В–Г – слайс-структуры (“структуры нарезки”) в гранитах $J_1 - T_3$ (массив Баян-Ула, Центральная Монголия): В – вертикальная в апикальной части массива, Г – посклоновая в бортовой части;

Д – клавишно-блоковая веерообразная структура ордовикских гранитов (массив Чонкурчак, Тянь-Шань);

Е – внутренняя тектоническая делимость и расслоенность ордовикских гранитов (массив Чонкурчак, Тянь-Шань).

ни было, перечисленные процессы сами по себе (ни индивидуально, ни в совокупности), не приводят к возникновению сколько-нибудь заметного пустотного пространства и незначительно влияют на улучшение исходных для гранитов коллекторских свойств (см. рис. 8, рис. 11).

Тектонический фактор. Как было показано, многие гранитные массивы испытали интенсивную постмагматическую переработку и подверглись объемной дезинтеграции на различных — от “мега” до “нано” — масштабных уровнях (например, [25, 55]) (см. рис. 5, рис. 6, рис. 7). Особенности постмагматической структурной переработки гранитов указывают на ведущую роль тектонического фактора в этом процессе [22, 25, 46]. К таким особенностям можно отнести следующие:

- Различные формы дезинтеграции (вертикальная или посклоновая линзовидно-блоковая, плитчато-блоковая, ромбоэдровидная отдельность, веерные- и слайс-структуры), разные способы реализации процесса (трещиноватость, брекчирование, катаклаз), вариации размерности фрагментов (мегаглыбовая, глыбовая, щебнистая, дресвяная, песчаная).

- Деформация даек и жил, пронизывающих граниты: будинаж, разрыв, изгибание, смещение фрагментов интрузивных тел.

- Микродеформация пород и минеральных зерен: трещиноватость, катаклаз, грануляция, изгибание, дробление, перетирание, наличие в микротрещинах газово-жидких включений, мозаичное угасание в зернах кварца, изгибание пластинок оруд, обдавливание зерен, наличие зубчатых ограничений, полигональная, брусково-блочная, удлиненно-ориентированная и полосчатая микроструктуры, перекристаллизация мелких зерен и их укрупнение, иногда с однонаправленной ориентировкой зерен, грануляция пород и минеральных зерен с образованием угловатых и полукруглых кластов, динамическая рекристаллизация.

- Присутствие шлейфов тектоно-гравитационных глыбово-щебнистых или дресвяно-песчаных кластитов с хаотичным распределением обломков.

- Наличие в теле гранитов фрагментов пород фундамента и осадочного чехла и наличие на поверхности гранитов прослойки тектонокластитов, состоящих из смеси продуктов разрушения гранитов и вышележащих пород чехла.

- Объемный характер деформаций, захватывающий массив на всю наблюдаемую глубину.

- Ориентация интрагранитных структур и взаимоотношение с обрамляющими граниты породами: тектонические и “прогрессивные” контакты, субвертикальная или веерообразная ориентация внутренних структурных элементов, пликвативная деформация дочехольной поверхности выравнивания.

- Тектонические смещения на контактах гранитов и чехла, фиксируемые структурами будинажа в базальных горизонтах чехла и зеркала-

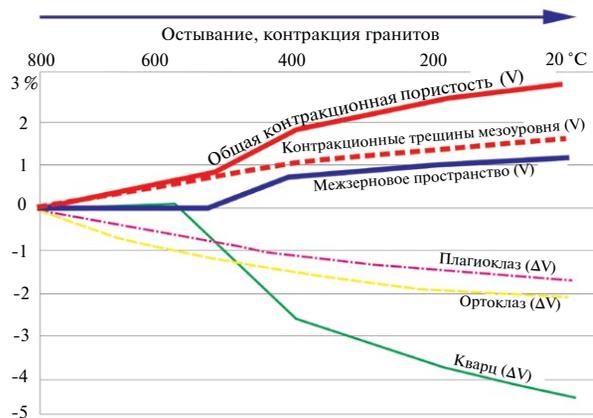


Рис. 8. Графики изменения объема минералов ΔV (нисходящие кривые) и максимально возможного объема V порового пространства (восходящие кривые) при остывании гранитов в интервале 800–20 °C.

ми скольжения в гранитах, а также образованием тектонокластитов — своеобразных микрокластовых пород, формирование которых связано с дифференциальным скольжением на контакте пород с разной реологией — осадочных отложений и прорывающего их протрузивного тела гранитов. [61] при температурах, не превышающих, по мнению И.М. Симановича (устное сообщение, 2006) 150–300 °C.

- Приподнятое относительно окружающих комплексов положение массивов (геоморфологические аномалии).

Тектоническая дезинтеграция кристаллических пород обычно ассоциируется с хрупкими локализованными деформациями. Тектонические трещинные коллекторы в монолитных породах обладают хорошими фильтрационными характеристиками, но их пористость редко превышает 1%, хотя этот показатель многократно увеличивается в так называемых “трещинных коридорах (системах связанных открытых трещин, зонах разломов и дробления). Все стороны строения нефтегазоносных участков блочно-разломного строения прекрасно изучены и детально разработаны (например, [74]). Однако деформация гранитных массивов, как видно из описания, характеризуется, прежде всего, объемной дезинтеграцией, которую применительно к кристаллическим комплексам Г. Штилле назвал “тектоника разрыхления” (нем. Lockertektonik). В настоящее время общепризнано, что дискретно-блоковое строение — это фундаментальное свойство земной коры, а главным следствием этого является объемная подвижность твердых породных субстанций. Это так называемая реидная деформация (от греч. “ρ’ε’ος” — течение, поток), которая описывается законами механики гранулированных сред или мезомеханики [11, 16, 19, 21, 25, 48–50, 69, 73, 78, 87, 89] и проиллюстрирована многочисленными геологически-

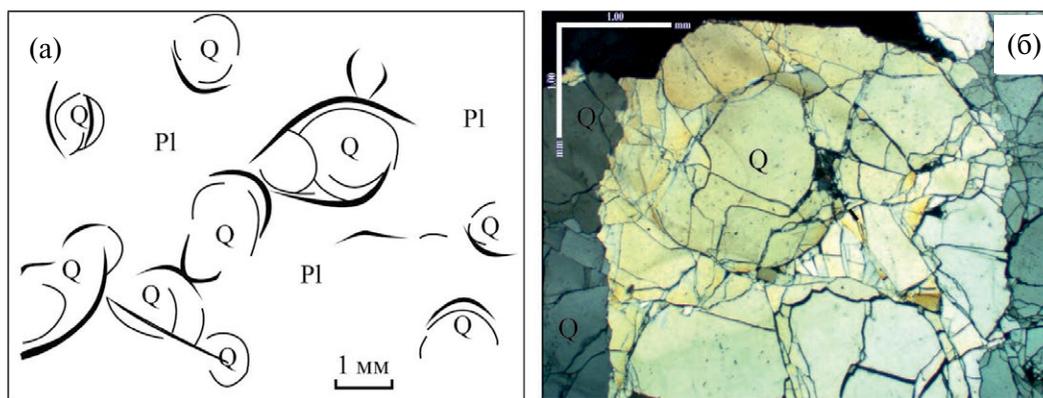


Рис. 9. Дезинтеграция гранита в результате контракции и тектоно-кессонного эффекта (по [25]). а – схема развития дуговых и концентрических трещин по границам зерен кварца и полевого шпата, обусловленных различием коэффициента контракционной усадки; б – дезинтеграция и формирование пустотного пространства в зерне кварца (гранитный массив Их-Хайрхан, Центральная Монголия), николи скрещены.

ми примерами [22, 25]. Неотъемлемыми свойствами деформации гранулированных сред является эффект дилатансии и сверхпластичность за счет зернограницного скольжения и, в результате чего, может существенно увеличиться пустотное межзерновое и/или межблоковое пространство. Согласно экспериментальным данным и расчетам, дилатансионный эффект в блоково-гранулярных средах может достигать 20–25%, и эти значения соизмеримы с параметрами гранитных коллекторов на нефтяных месторождениях [2, 38, 70]. Во всяком случае, ни один процесс, кроме реидной деформации гранулированной среды, сам по себе, или даже в различных сочетаниях, не может обеспечить тех значений пористости, которые известны в гранитных коллекторах разрабатываемых месторождений углеводородов (см. рис. 11).

Экзгумации гранитных массивов на постмагматической стадии механика гранулированных сред

Граниты после вхождения в состав консолидированного слоя не становятся его пассивными составляющими, а “выдвигаются” в верхние горизонты земной коры – иногда через значительный промежуток времени после кристаллизации и остывания – и формируют в современном рельефе горные возвышенности, воздымающиеся над окружающими пространствами, часто в окружении более устойчивых к выветриванию комплексов, и представляющие собой морфологические аномалии [25]. Геологические и геоморфологические наблюдения свидетельствуют, что подъем происходил импульсно и продолжается на неотектоническом этапе, опережая денудационные процессы. Амплитуда вертикального выдвигания гранитов может достигать от 1–5 до 10–12 км [58, 60]. При этом поверхность гранитных массивов, фиксированная корами выветривания и соответствующая поверхности выравнивания, в большин-

стве случаев подвергается пликативной деформации и образует изгибы без разрыва сплошности, что свидетельствует о 3D подвижности горных масс и их объемном вязко-пластическом (катаклическом) течении [4, 18, 22, 25, 28, 60, 91]. Крайним выражением объемной подвижности гранитов является формирование тел протыкания, тектонически внедрившихся в перекрывающие граниты вулканогенно-осадочные чехольные отложения и образующие специфические морфоструктуры – кристаллические протрузии (рис. 12) [25, 28, 35].

Граниты участвуют в строении трех основных типов морфоструктур.

Первый тип – это площадные поля, целиком или в значительной степени сложенные гранитами. Рельеф их разнообразен: от плоских или слабовсхолмленных равнин до резко расчлененного высокогорья, как, например, территории Северного Тянь-Шаня и Западного Забайкалья.

Второй тип – это гранитные массивы, приуроченные к линейным зонам концентрированной деформации, имеющие размер от сотен метров до первых километров и линзовидную или эллипсоидальную форму. Примеры: массивы Дзурамтай и Танын (Южная Монголия, Кумсинский массив (Карелия)).

Третий тип – “островные” горы – изолированные массивы гранитов, окруженные отложениями чехольных комплексов. Примеры: гора Шерловая (Восточное Забайкалье), гранитные массивы Казахстана, гранитные купола в пределах Иссык-Кульской впадины (Северный Тянь-Шань). Выделение этих морфотипов достаточно условно, и они могут встречаться совместно в пределах одного региона в различных комбинациях.

Феномен выдвигания гранитов и формирования ими горных массивов издавна привлекал внимание геологов, и предлагались различные механизмы, этот процесс обеспечивающие [25, 59]. Рассматривались следующие варианты:

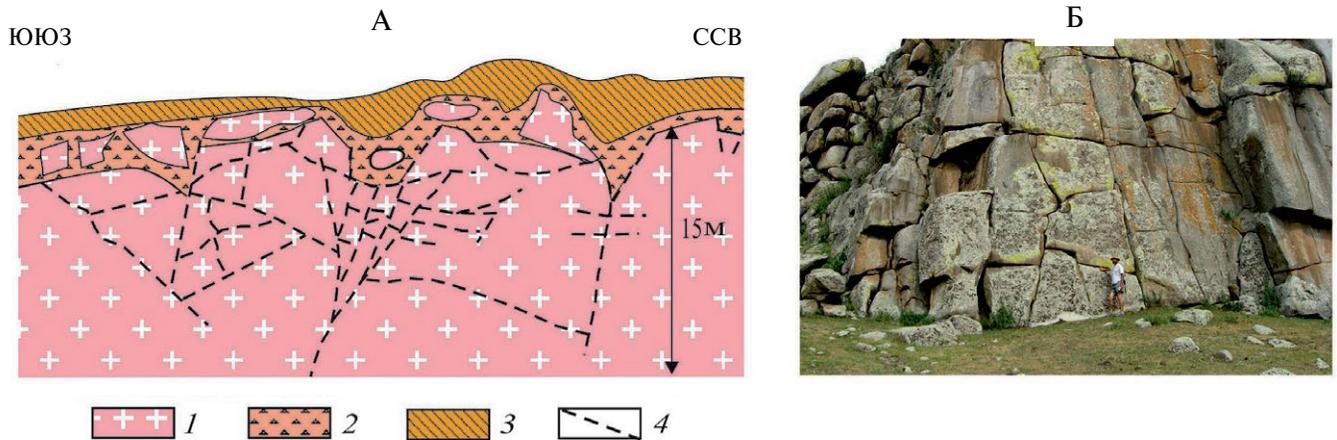


Рис. 10. Разломно-трещинная структура в апикальной части эксгумированных гранитов

А – структура “веера” (Павловский свод Воронежской антеклизы)

1 – граносиениты докембрия; 2 – додевонская кора выветривания; 3 – девонские отложения; 4 – разрывы

Б – Крупноблочная отдельность и дилатансионная трещиноватость в триасовых гранитоидах Хангайского батолита.

- действие изостазии и архимедовой силы;
- постмагматическая гранитизация, приводящая к увеличению объема пород и выталкиванию ранее застывших масс;
- плотностная инверсия;
- клиновидная форма тел, за счет которой они выдавливаются вверх под действием тангенциальных сил;
- процесс замещения мантийной литосферы астеносферой.

Все эти механизмы – порознь или в определенных сочетаниях, вероятно, задействованы в процессе эксгумации, но ни один из них не объясняет необычайную объемную подвижность гранитных масс, зафиксированную многочисленными наблюдениями, и без которой они не могли быть перемещены в склеротизированной земной коре и сформировать те морфоструктуры, которые мы наблюдаем в настоящее время. Без приобретения горными породами 3D подвижности также практически невозможно изменение их внешней формы. Объяснение этому эффекту находим в механике блочно-гранулированных породных субстанций и мезомеханике.

Как известно [4, 11, 18, 22, 35], для того, чтобы твердое тело изменило свою форму, а поверхность этого тела испытала изгиб без разрыва сплошности (образовала складку, купол, серию куполов и складок), необходимо придать ему объемную (3D) подвижность или способность к течению, для чего должно произойти внутреннее перераспределение вещества, связанное с перемещением в пространстве отдельных его доменов или элементарных составляющих деформируемого объема пород, или сами эти составляющие должны изменить свою форму. Морфо- и инфраструктура гранитных массивов указывают на объемную структурную переработку пород на макро-, мезо-, микро-, и на-

но-уровнях. Установлено нескольких структурных механизмов, которые обеспечивают 3D подвижность и изменение формы залегания кристаллических пород: пластическая деформация; хрупкая макросколовая (блоковая) и микросколовая (кливажная) деформация; катаклаз; меланжирование; динамическая рекристаллизация и перекристаллизация. Все перечисленные формы деформации, по отдельности и в совокупности, присутствуют в дезинтегрированных гранитах, а наблюдаемые структурно-кинематические парагенезы и формы залегания свидетельствуют о 3D подвижности гранитных массивов и хрупко-пластическом течении пород. Но при всем многообразии масштабов и форм проявления структурной переработки пород, особенностью гранитов является возникновение в них блочной (гранулярной) структуры, которая отражает реологическую исключительность гранитов относительно большинства других пород фундамента, связанную с их составом и первичной структурой. Объемная дезинтеграция сопровождается потерей породой внутренней связности. Граниты приобретают характерные свойства блочных и гранулированных сред и деформируются в соответствии с законами, отражающими физическую сущность этих субстанций.

Механике гранулированных сред, в том числе и применительно к горным породам, посвящено множество публикаций, в которых содержатся теоретическое и экспериментальное обоснование приведенных ниже положений [5, 9, 10, 11, 16, 19, 21, 31, 36, 44, 48–50, 52, 68, 69, 72, 73, 75, 79, 85–87, 89]. Выделим главные.

- Деформация гранулированных субстанций осуществляется главным образом за счет зерно-границного скольжения и поворота (вращение + сдвиг) зерен и блоков, в меньшей степени – внутриверного дислокационного скольжения

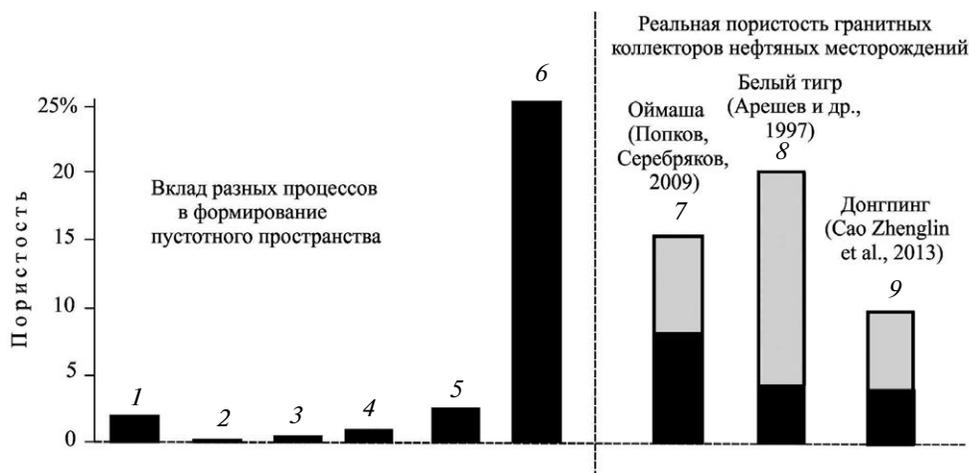


Рис. 11. Сопоставление значений внутреннего порового пространства в гранитах (по [25]).

Показаны: 1–6 – значения при проявлении различных процессов: 1 – контракция при остывании (сумма усадки породы и объема микротрещин); 2 – контракция и декомпрессия при подъеме массива с глубины 3 км при геотермическом градиенте 30 °С/км; 3 – то же при геотермическом градиенте 60 °С/км; 4 – хрупко-упругое разрушение (трещинные коллекторы в массивных породах), 5 – гидротермальные процессы в трещиновато-кавернозной среде (средние значения в зонах цеолитизации); 6 – максимальный дилатансионный эффект при течении гранулированных материалов (по [89]); 7–9 – значения реальной эффективной пористости гранитов на месторождениях (темная часть диаграмм – средние значения: 7 – Оймаша, Казахстан (по [38]); 8 – Белый Тигр (Вьетнам) (по [2]); 9 – Донгпинг (Китай) (по [70])

и диффузионной ползучести. “Твердое” тело, приобретая гранулированную структуру, приобретает и свойства “вязко-текучего” тела и способность к реидной деформации. Объемная подвижность – фундаментальное свойство блочной среды [19]. Течение гранулированной среды может не иметь структурного выражения, и только при наличии реперов (примеси, выделения минеральных фаз, механическая сегрегация) можно фиксировать перемещение вещества и рисунок возникших структурных форм. Реологически деформация описывается как пластическое или вязкое течение.

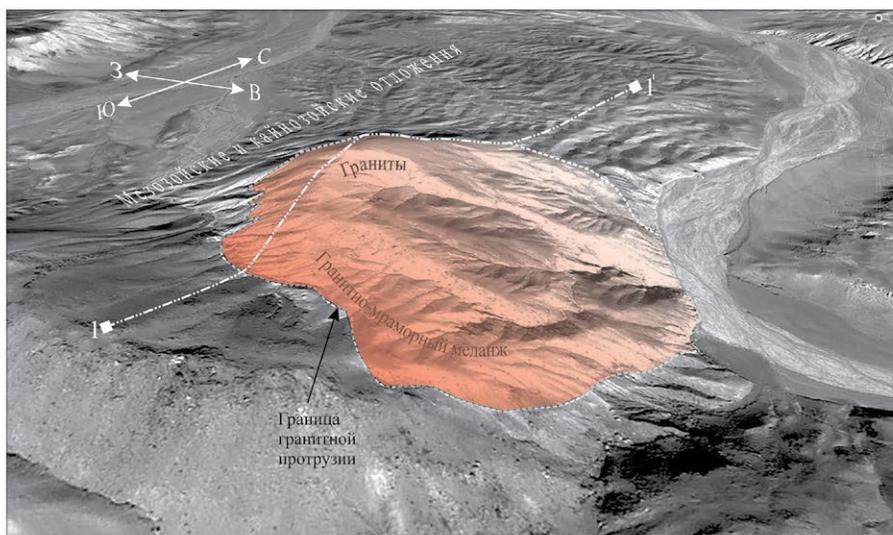
- В кристаллических породах при начальном нагружении проявляются упругая и пластическая деформации; интенсивное скольжение (вязкое, катакластическое течение) становится возможным после фрагментации среды на блоки и понижения объемной вязкости пород, и происходит оно в результате проскальзывания “жестких” доменов относительно друг друга. При величине угла сдвига больше некоторого критического значения (предельного угла сдвига) образуются поверхности скольжения, вдоль которых отдельные слои зерен (блоков) смешаются как единое целое, происходит разупрочнение фрагментированного материала на микроуровне и уменьшение коэффициента трения качения между частицами в макромасштабе. Неустойчивость скольжения связана с разуплотнением (дилатансией) слоя частиц между бортами раздела, и это приводит к ослаблению контакта блоков земной коры. Относительное вращение и дифференциальное перекатывание зерен приводит к возникновению упорядоченной структуры, определяет локализацию и масштаб деформаций, способствует существен-

ному снижению эффективного угла трения, что интерпретируется как проявление сверхпластичности [10], когда основные деформационные процессы перенесены из тела зерен на их границы.

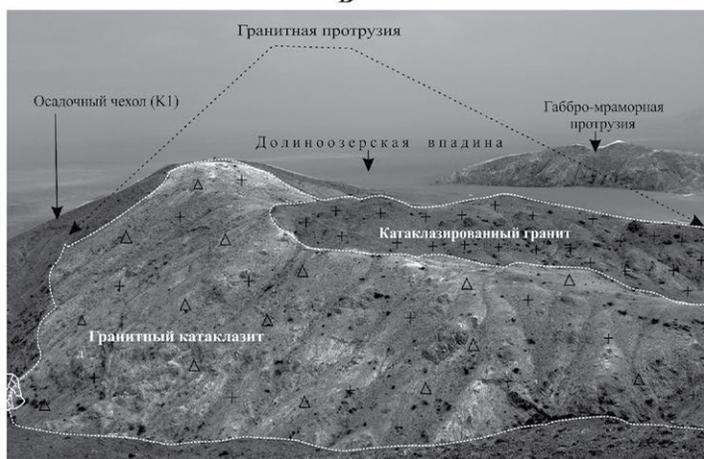
- Взаимное смещение зерен приводит к их хаотическому развороту и устранению исходной текстуры. Взаимное проскальзывание, приводящее к увеличению числа зерен вдоль оси растяжения, приводит к образованию микропустот по их границам и к разрушению образца задолго до достижения больших удлинений. Наибольшие удлинения при сверхпластическом течении зафиксированы в эвтектических и эвтектоидных смесях, к которым принадлежат граниты, а сверхпластичность может проявиться при весьма невысоких температурах (100–150 °С).

- Дискретным средам свойственна особая форма передачи напряжений по стыкам зерен, определяющая образование линзовидно-ромбоэдровидных объемов относительно монолитных пород, разделенных интерфейсными зонами (в механике – межблочные объемы вещества). Формируется так называемая “сетка напряжений” (“стрессовые цепочки”). Интерфейсные зоны обладают пониженными прочностными и деформационными характеристиками, что способствует локализации в них необратимых деформаций. Они определяются более высокой (в сравнении с блоками) нарушенностью, пористостью, либо другим фазовым составом (цемент, связующий зерна минералов). Появляются поверхности скольжения (кливаж, сланцеватость, возникновение “слайдов”), определяющие неоднородность тектонического течения. Межблочные интерфейсные области (границы

А



Б



ЮЮЗ

В

ССВ

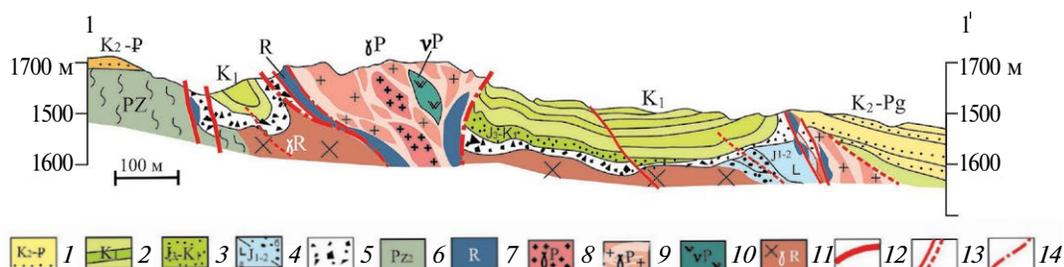


Рис. 12. Гранитная протрузия Танын (Гобийский Алтай, по [25, 46]).

А – вид с юго-востока: – линия профиля на фрагменте В; Б – вид с запада; В – поперечный профиль по линии 1–1. 1 – верхнемеловые-палеогеновые отложения (конгломераты, песчаники), нерасчлененные; 2 – нижнемеловые терригенно-карбонатные отложения; 3 – верхнеюрско-нижнемеловые грубообломочные и вулканогенно-осадочные отложения; 4 – вулканиты: а – средне-верхнеюрские, б – терригенные грубообломочные отложения; 5 – глыбово-щербнистые глинистые верхнеюрские отложения; хаотические глинистые комплексы тектоно-гравитационного типа, частично тектонизированные; 6 – верхнепалеозойские метавулканиты и сланцы; 7 – рифейские (?) мраморы; 8–9 верхнепалеозойские лейкократовые граниты: 8 – фрагменты относительно слабо дезинтегрированных разностей, 9 – основная масса, подверженная объемной дезинтеграции; 10 – позднепалеозойские основные и ультраосновные интрузии; 11 – рифейские (?) порфириовидные граниты; 12 – главные разломы; 13 – второстепенные разрывные нарушения: сплошная линия – картируемые, пунктир – предполагаемые; 14 – протрузивные контакты

раздела) имеют более низкие эффективные прочностные характеристики, нежели материал самих блоков. Это определяет способность фрагментов геологической среды, находящихся в сложном напряженном состоянии, к локализации необратимых деформаций на межблочных границах в условиях даже слабых динамических воздействий. По данным [63], силы трения гранулированной среды на бортах потока существенно меньше сил трения в самом движущемся потоке, а реологические свойства хорошо гранулированной среды близки к обычной вязкой, ньютоновской жидкости.

- Цикл “нагрузка/разгрузка” приводит к увеличению энергетического потенциала деформированного объема, который может запасать до 30% энергии, затраченной на его деформирование [21]. После снятия нагрузки деформированный объем может самопроизвольно увеличиваться за счет внутренних ресурсов, приобретенных в процессе деформации. Высвобождение энергии может приводить к спонтанным динамическим скачкам уплотнения [49]. Динамические воздействия приводят к появлению необратимых тангенциальных перемещений блоков даже при достаточно малых значениях сдвиговых напряжений, и в разных частях породного массива может иметь место одновременное разрыхление и уплотнение, что говорит о неоднородности напряженного состояния и проявления деформации, установленные Е.В.Лаврушиной и Е.С.Пржиялговским на целом ряде природных объектов [25].

При деформации дискретных сред обычно наблюдается эффект дилатансии – “необратимое увеличение объема материала, вызванное укрупнением пор и раскрытием трещин” [9, с. 657], особенно заметно проявляющиеся при сдвиговом деформировании и вязко-катакластическом течении дискретных сред. Дилатансионный эффект, вызываемый процессом грануляции, иногда сопровождается “вскипанием” дислокаций (автодиспергацией), может достигать 10–25% объема [44, 89].

Таким образом, переход пород в дискретное состояние вызывает объемную подвижность горных масс и их течение, что в свою очередь приводит в действие механизм вязкостной инверсии [35]. Происходит пространственное перераспределение горных масс: их перетекание из областей относительно высоких напряжений в области относительно высокой декомпрессии и, в частности, выжимание “текучих” масс в направлении меньшего литостатического давления, т.е. к дневной поверхности. Поднимающиеся массы внедряются в верхние горизонты коры, образуя выраженные в рельефе купола, массивы, кристаллические протрузии [25, 28, 46, 82, 90].

Таким образом, приведенные данные показывают, что основным фактором, который обеспечивает экстумацию гранитных массивов на постмагматической стадии, является процесс формирования протрузий, а возможность вязкопластического

(хрупко-пластического) течения гранитных масс обеспечивается, судя по всему, за счет механизмов деформации гранулированных сред и их повышенной текучести.

СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТРАГРАНИТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Комплекс признаков, свойственных гранитным массивам, содержащим залежи углеводородов, тождественен чертам морфо- и инфраструктурного облика гранитов, выявленным при изучении объектов, доступных для непосредственного наблюдения. Полученные данные позволяют сформулировать перечень положений, совокупность которых должна быть учтена при построении модели залежей углеводородов в пределах гранитных выступов фундамента. Не вдаваясь в детали, — они изложены в [25] и предшествующем тексте, суммируем главное.

- Значительная часть залежей углеводородов расположена в гранитах, которые испытали интенсивную постмагматическую деформацию. Деформация выражена в дроблении, объемном катаклазе, перекристаллизации пород, что, в конечном счете, приводит к их 3D дезинтеграции, возникновению разломно-блоковой структуры и грануляции горных масс. Основным фактором дезинтеграции (грануляции) гранитов является фактор тектонический.

- Блоковые, гранулированные и диспергированные среды обладают рядом специфических механических свойств, среди которых — сверхпластичность и способность к дилатансии, что приводит к возникновению 3D подвижности (текучести) пород [5, 9–11, 16, 19, 21, 31, 36, 44, 48–50, 52, 68, 69, 72, 73, 75, 79, 85–87, 89]. Дилатансия, особенно интенсивно проявляющаяся при пластическом течении, может достигать 20–25% от первоначального объема породной массы, что способствует уменьшению трения между частицами, облегчает их относительное проскальзывание, приводит к расширению пустот и трещин, возрастанию пористости и проницаемости пород, облегчают процесс М-инфильтрации флюидов [66]. Процесс усиливается благодаря автодиспергации [44], которая приводит к “вскипанию” дислокаций и усилению дезинтеграции пород.

- Главным фактором объемной дезинтеграции является фактор тектонический, а выдвигание гранитных тел в более высокие горизонты коры, внедрение в осадочные отложения чехла и формирование купольных структур и тел протыкания (кристаллических протрузий) реализуется за счет объемного течения пород в условиях вязкостной инверсии.

- Кристаллические протрузии по форме, структуре и механизму образования благоприятны для формирования потенциальных (и реальных!) резервуаров (залежей) углеводородов.

Совокупность перечисленных характеристик ограничивает выбор моделей, удовлетворяющих условиям задачи. Перечисленным параметрам в наибольшей степени соответствуют модель кристаллических протрузий (рис. 13), которая не противоречит данным нефтяной геологии [2, 7, 8, 15, 27, 29, 54, 62, 70, 76, 82, 83] и верифицирована на примере нефтяного месторождения Белый тигр [17, 23, 24].

Суть модели сводится к следующему. В результате рассмотренных выше структурно-тектонических процессов в теле фундамента древних платформ и молодых плит зарождаются и развиваются долгоживущие положительные морфоструктуры (купола, протрузии), ядра которых выполнены дезинтегрированными (гранулированными) породами кристаллического или складчато-метаморфического цоколя, а крылья и покрывка — осадочными отложениями плитного чехла. Наиболее распространены среди структур этого типа “тела протыкания”, сложенные гранитами, которые обладают повышенной, а с ростом протрузии — все более возрастающей проницаемостью и пористостью за счет дилатансионного эффекта и ряда структурных изменений, о которых упоминалось выше. Эти объемы характеризуются условиями декомпрессии и всасывания. Осадочные породы чехла, облегающие свод, напротив, находятся в условиях сжатия и повышенного давления (в том числе флюидного), обусловленного действием встречных сил гравитации (вес вышележащих чехольных комплексов) и напором растущего купола. И если породы нижних горизонтов чехла являются углеводородсодержащими, то в результате тектоно-кессонного эффекта происходит процесс их перетока, перекачки из осадочных толщ в разуплотненные кристаллические породы фундамента, где они и образуют скопления-залежи углеводородов. Для проявления такого механизма особенно благоприятны гранитные массивы, которые легко подвергаются структурно-вещественной переработке в процессе формирования кристаллических диапиров и протрузий, что подтверждено многочисленными наблюдениями и практикой нефтяной геологии.

Описанный вариант (см. рис. 13, а) предполагает поступление углеводородов в интрагранитную ловушку из отложений осадочного чехла. Но модель инвариантна относительно “материнского” источника углеводородов. В случае поступления углеводородных флюидов из более глубоких горизонтов коры (см. рис. 13, б) или мантии (реален ли этот процесс здесь не обсуждается), углеводороды задерживаются в разрыхленном и пористом теле протрузии, чему способствует формирование карбонатно-силикатно-каолинового панциря кор выветривания в апикальной части куполов и протрузий и зоны тектонокластитов в их бортах [61], которые служат флюидоупраами. При этом не исключен вариант просачивания флюидов по ослабленным зонам (разломам, провалам в коре выветривания) в осадочные толщи чехла, облегающие

протрузию, что может привести к формированию в них “вторичных” углеводородсодержащих горизонтов или залежей. Данный вариант является умозрительным и, по-видимому, никогда геологами не рассматривался, но если он окажется реальным, то это может послужить импульсом для разработки теории нахождения углеводородов в осадочных толщах и возобновляемости углеводородных ресурсов, а также для постановки прогнозных работ на нефть и газ, основанной на новой парадигме. Но рассмотрение генезиса углеводородов — это задача специалистов соответствующего профиля, и им принадлежит решающее слово.

Сходные до некоторой степени модели предлагались и ранее (например, [2]), однако это были модели “жесткого” типа — возникновение выступов фундамента в них связывается с разломной тектоникой. Пластическая составляющая процесса, механизмы подвижности породных масс и их эксгумации не рассматриваются, в то время как ведущим фактором подъема гранитных тел и образования купольных структур является объемное тектоническое течение (рейдная деформация) горных масс, в конечном счете реализующиеся в возникновении кристаллических протрузий и создающая геодинамические условия перераспределения и формирования залежей углеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в статье рассмотрены вопросы, связанные с изучением постмагматической тектоники гранитов и формированием интрагранитных залежей углеводородов в пределах кристаллических массивов. На основании изучения особенностей постмагматической тектонической структуры гранитных массивов как погребенных, так и эксгумированных на дневную поверхность, выявлены: механизмы и формы структурно-вещественной переработки пород; способы выведения остывших или остывающих гранитных интрузий в верхние горизонты коры; условия и характеристики формирования пустотно-порового пространства в пределах гранитных тел на постмагматической стадии их эволюции; распространение залежей углеводородов в гранитных массивах, расположенных в различных регионах и геодинамических обстановках; описаны кристаллические тела протыкания — гранитные протрузии.

В результате, на основе этих данных, произведена оценка значения структурно-тектонического фактора в формировании интрагранитных залежей углеводородов и предложена эволюционная структурно-тектоническая модель их образования в пределах гранитных массивов и, прежде всего, гранитных протрузий. Изложенный материал позволяет рассматривать кристаллические протрузии в качестве типовой модели интрагранитных залежей углеводородов, которая на сегодняшний день наиболее адекватно отражает известные геологам и нефтеразработчикам данные.

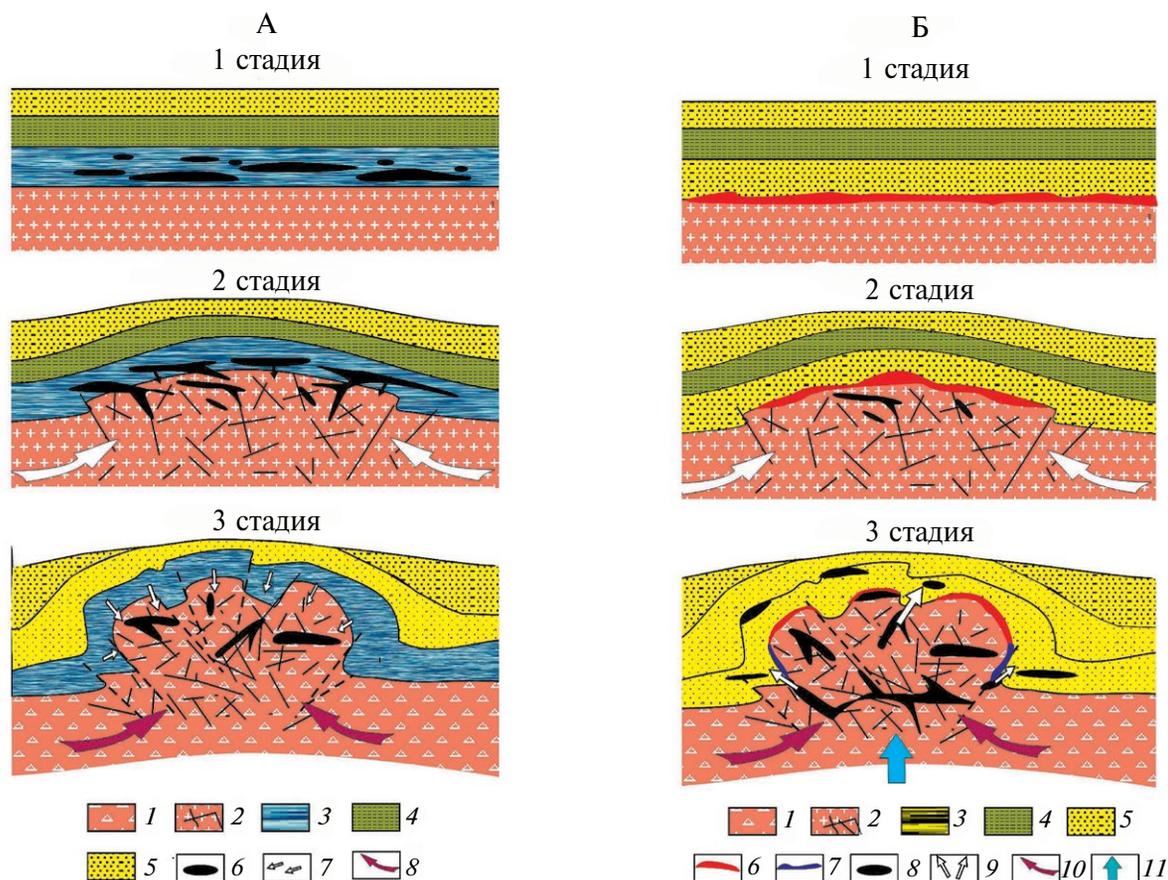


Рис. 13. Модели формирования скоплений углеводородов в теле гранитных протрузий.

А – стадии при поступлении углеводородов из осадочного чехла: 1 – формирование плитного чехла, включающего горизонты нефтематеринских пород; 2 – начало роста кристаллической протрузии, первичное перераспределение углеводородов; 3 – оформление кристаллической протрузии, перераспределение углеводородов и образование залежи. 1 – граниты; 2 – дезинтегрированные граниты; 3–5 – отложения чехла: 3 – нефтематеринская толща, 4 – отложения непроницаемой покрывки, 5 – отложения чехла; 6 – скопления углеводородов; 7 – направление движения углеводородов. 8 – направление катакластического течения пород фундамента

Б – стадии при поступлении углеводородов из фундамента: 1 – формирование коры выветривания (карбонатно-силикатного панциря) и плитного чехла; 2 – начало роста кристаллической протрузии, поступление углеводородов из фундамента; 3 – оформление протрузии, образование панциря из тектонокластитов, формирование интрагранитных скоплений углеводородов, проникновение порций углеводородов в чехольные отложения и формирование “псевдо-нефтематеринской толщи.

1 – граниты; 2 – дезинтегрированные граниты; 3–5 – отложения чехла: 3 – псевдо-нефтематеринская толща, 4 – отложения непроницаемой покрывки, 5 – отложения чехла; 6 – кора выветривания (карбонатно-силикатный панцирь); 7 – тектонокластиты; 8 – скопления углеводородов; 9 – направление движения углеводородов; 10 – направление катакластического течения пород фундамента; 11 – приток глубинных флюидов

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своим коллегам Е.С. Пржиялговскому, Е.В. Лаврушиной (Геологический институт РАН, г. Москва), А.В. Никитину (Воронежский государственный университет, г. Воронеж), которые являлись участниками исследований по проблеме и внесли весомый вклад в ее разработку и представили фотоматериалы для статьи, а также признателен Ю.А. Воложу (Геологический институт РАН, г. Москва), с которым неоднократно и плодотворно обсуждалась данная проблема.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаменталь-

ных исследований Президиума РАН П-46 (Проект № 0135-2018-0046) и Российского научного фонда (проект № 16-17-10059).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева Е.Р., Кучерук Е.В., Хорошилова Т.В. Фундамент осадочных бассейнов и его нефтегазоносность. М., 1987. 63 с.
2. Арешев Е.Г., Гаврилов В.П., Донг Ч.Л. и др. Геология и нефтегазоносность фундамента Зондского шельфа. М.: Изд-во “Нефть и газ”, 1997. 288 с.
3. Белов С.В. Анализ полей напряжений при обра-

зовании постагматических трещин контракции в куполе гранитов Караобинского интрузива // Изв. АН СССР. Серия геол. 1982. № 1. С. 101–111.

4. *Бероуш Р.А.* Фундамент. Структурная геология и тектоника плит. М.: Мир, 1991. Т.3. С. 265–269.

5. *Блехман И.И.* Вибрационная механика / Ред. И.И. Блехман. М.: Физматлит, 1994. 400 с.

6. Вчера, сегодня, завтра нефтяной и газовой промышленности России / Ред. Н.А.Крылов. М.: Изд-ие ИГ и РГИ, 1995. 448 с.

7. *Гаврилов В.П.* Нетрадиционная модель образования гранитов и их нефтегазоносности (на примере южного шельфа Вьетнама) // Геология нефти и газа. № 1. 2010. С. 51–58.

8. *Гаврилов В.П., Дзюбло А.Д., Поспелов В.В. и др.* Геология и нефтегазоносность фундамента шельфа Южного Вьетнама // Геология нефти и газа. 1995. № 4. С. 15–20.

9. *Гарагаш И.А.* Условия формирования регулярных систем полос сдвига и компакций // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 657–668.

10. *Гарагаш И.А., Николаевский В.Н.* Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12. Вып. 1. С. 131–183.

11. *Гольдин С.В.* Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физ. Мезомеханика. 2002. Т. 5. № 5. С. 5–22.

12. *Добровольский В.В.* Гипергенез и коры выветривания. Избранные труды. Т. 1. / Отв. ред. Н.С. Касимов. М.: Научный мир, 2007. 508 с.

13. *Дружинин В.С., Осипов В.Ю., Шилина Е.В.* Геофизические исследования кристаллического фундамента Южно-Татарского свода в районе Ново-Елоховской сверхглубокой скважины // Урал. Геофиз. Сб. 2005. № 8. С. 38–43.

14. *Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Федоров Ю.Н., Кормильцев В.В., Клец А.Г., Сажнова И.А.* Гранитоидные комплексы фундамента Западной Сибири // Состояние тенденций и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири. Тюмень: Зап. СибНИИ ГГ, 2007. С. 49–56.

15. *Изотов В.Г., Ситдикова Л.М., Муслимов Р.Х.* Геодинамическая модель миграции углеводородных флюидов в кристаллическом фундаменте древних платформ // Генезис нефти и газа / ред. А.Н. Дмитриевский, А.Э. Конторович. М. ГЕОС, 2003. 124 с.

16. *Кайбышев О.А., Пшеничнюк А.И.* Структурная сверхпластичность: от механизма деформации к определяющим соотношениям // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1999. № 5. С. 148–164.

17. *Керимов В.Ю., Леонов М.Г., Осипов А.В., Мустаев Р.Н., Ву Нам Хай.* Залежи углеводородов в фундаменте шельфа Вьетнама и структурно-тектоническая модель их формирования // Геотектоника. 2019. № 1. С. ...–... .

18. Кинг Л. Морфология Земли. М.: Прогресс, 1967. 560 с.

19. *Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов / отв. ред. В.В. Адушкин. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

20. *Кучерук Е.В.* Нефтегазоносность пород фун-

дамента // Геология нефти и газа. 1992. № 1. С. 45–46.

21. *Лавриков С.В., Микенина О.А., Ревуженко А.Ф.* Численное и экспериментальное моделирование эффекта аккумуляции и высвобождения упругой энергии в массиве горных пород // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы Всерос. семинара-совещания / ред.: В.В.Адушкин, Г.Г. Кочарян. М.: ГЕОС, 2010. С. 209–218.

22. *Леонов М.Г.* Тектоника консолидированной коры / ред. Ю.А. Гаврилов. М.: Наука, 2008. 454 с.

23. *Леонов М.Г., Керимов В.Ю.* Гранитные протрузии как элемент морфоструктурной дифференциации осадочных бассейнов и тип ловушек нефти в фундаменте Кыулунгского бассейна (Зондский шельф Вьетнама) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту. Науч. совещ. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2018. С.166–168 .

24. *Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В.* Гранитные протрузии и их углеводородный потенциал // Геология и минерально-сырьевые ресурсы России. Мат. VIII Всерос. Конф. с междунар. участием. Т. 2. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2018 а. С. 107–111.

25. *Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В.* Граниты. Постагматическая тектоника и углеводородный потенциал / ред. К.Е. Дегтярев. М.: ГЕОС, 2018 б. 332 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 619).

26. *Лобусев А.В., Силантьев Ю.Б., Халошина Т.О. и др.* Углеводородные системы фундамента осадочных бассейнов // Нефтегазоносность фундамента осадочных бассейнов. М.: РГУ нефти и газа, 2001. С. 33–34.

27. *Мартынова И.И.* Закономерности размещения залежей нефти и газа в фундаменте на основе мирового опыта открытий месторождений углеводородов в породах кристаллического фундамента // Нефтегазоносность фундамента осадочных бассейнов. М.: РГУ нефти и газа, 2002. С. 51–57.

28. *Морозов Ю.А., Леонов М.Г., Алексеев Д.В.* Пулл-апаратный механизм формирования кайнозойских впадин Тянь-Шаня и их трансpressивная эволюция: структурные и экспериментальные свидетельства // Геотектоника. 2014. № 1. С. 29–61.

29. *Муслимов Р.Х.* Потенциал фундамента нефтегазоносных бассейнов – резерв пополнения ресурсов углеводородного сырья в XXI веке // Георесурсы. № 4 (12). 2003. С. 2–5.

30. Нефтегазоносность фундамента осадочных бассейнов. Мат. Междунар. научно-практич. конф. Москва: РГУ нефти и газа, 2002. 216 с.

31. *Опарин В.П., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф. и др.* Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов и виброволновых технологиях / Ред. В.В.Ивашин. Новосибирск: НАУКА, 2010. 404 с.

32. *Осипов М.А.* Контракция гранитоидов и эндогенное минералообразование. М.: Наука, 1974. 158 с.

33. *Осипов М.А.* Формирование расслоенных плутонов с позиций термоусадки. М.: Наука, 1982. 223 с.

34. *Павлов Н.Д.* Тектоно-кессонный эффект и проблемы формирования трещинных и суперколлекторов подсолевых отложений Прикаспийской впадины

- // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1992. Вып. 2. С. 7–14.
35. *Паталаха Е.И.* О дифференциальной подвижности совместно деформируемых разнородных геологических тел, ее причинах и следствиях: вязкостная инверсия // Геотектоника. 1971. № 4. С. 15–20.
36. *Поляков А.С.* Гранулированные среды и седиментогенез. М.: Геоинформмарк, 2001. 60 с.
37. *Пономарев В.С.* Энергонасыщенность геологической среды / Отв. ред. Ю.Г.Леонов. М.: Наука, 2008. 233 с.
38. *Попков В.И., Серебряков А.О.* Нетрадиционные нефтегазоносные объекты. Астрахань. Издательский дом “Астраханский университет”, 2009. 183 с.
39. *Порфирьев В.Е.* Природа нефти, газа и ископаемых углей // Абиогенная нефть. Киев: Нуакова думка, 1987. С. 78–103.
40. *Поспелов В.В.* О формировании трещинных коллекторов в гранитоидных породах фундамента // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 2000. Вып. 6. С. 2–6.
41. *Поспелов В.В.* Петрофизическая модель и фильтрационно-емкостные свойства пород фундамента южного шельфа Вьетнама по керновым данным // Актуальные проблемы геологии нефти и газа / Ред. В.П. Гаврилов. М.: Изд-во “Нефть и газ”. 2005. С. 175–186.
42. *Поспелов В.В., Шнип О.А.* Геологическое строение и нефтегазоносность Зондского шельфа // Геология нефти и газа. 1997. № 8. С. 32–37.
43. *Поспелов Г.Л.* Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников // Геология и геофизика. Т. 4. № 3. 1963. С. 18–38.
44. *Поспелов Г.Л.* Диспергиты и автодиспергация как важная проблема физики литопетро- и тектогенеза // Геология и геофизика. 1972. № 12. С. 53–73.
45. *Пржиялговский Е.С., Леонов М.Г., Лаврушина Е.В.* Структура, механизмы и предпосылки постумных реидных деформаций в гранитах // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы Третьей тектонофиз. конф. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 39–42.
46. *Пржиялговский Е.С., Леонов М.Г., Лаврушина Е.В.* Гранитные протрузии в структуре зон внутриплитной активизации Южной Монголии // Геотектоника. 2014. № 3. С. 1–28.
47. *Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В., Никитин А.В., Щербакова Т.Ф.* Особенности трещиноватости некоторых гранитоидных массивов Хэнтейского батолита // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2009. Вып. 7. Т. 2. С. 43–46.
48. *Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Григорьев А.С.* О возможности оценки близости сдвиговых напряжений на активных границах раздела в блочных средах к критическому значению // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы всероссийского семинара-совещания / Ред.: В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. М.: GEOS, 2010. С. 230–238.
49. *Ревуженко А.Ф.* Механика сыпучей среды / Ред. Е.И.Шемякин. Новосибирск: Изд-во ЗАО ИПП “ОФСЕТ”, 2003. 274 с.
50. *Ревуженко А.Ф., Бобряков А.П., Косых В.П.* О течении сыпучей среды с возможным неограниченным скольжением по поверхностям локализации // Физ.-тех. пробл. разработки полезн. ископаемых. 1997. № 3. С. 37–42.
51. *Сианисян Э.С., Распопов Ю.В., Булков Г.К., Анареев В.М.* Современное состояние и перспективы развития ресурсной базы углеводородной составляющей ТЭК Южного федерального округа // Геология нефти и газа. 2009. № 4. С. 2–9.
52. *Сибиряков У.Б., Деев Е.В.* Использование метода граничных интегральных уравнений для определения модулей гранулированных геологических тел // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 85–93.
53. *Ситдикова Л.М., Изотов В.Г.* Геодинамические условия формирования деструктивных резервуаров углеводородов глубоких горизонтов земной коры // Георесурсы. 2003. № 4 [12]. С. 17–22. URL: <http://geors.ru>
54. *Ситдикова Л.М., Муслимов Р.Х.* Зоны деструкции – реальный объект локализации углеводородов в кристаллическом фундаменте Татарского свода Республики Татарстан // Перспективы нефтегазоносности кристаллического фундамента на территории Татарстана и Волго-Камского региона. Мат. конф. Казань. 1998. С. 10–16.
55. *Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Креенкова С.М.* и др. Нанокристаллы в горных породах. М.: GEOS, 2016. 102 с.
56. Справочник физических констант горных пород / Ред. С. Кларк. М.: Мир. 1966. 545 с.
57. Справочник по физике / Ред. Кухлинг Х. М.: Мир, 1985. 250 с.
58. *Трифонов В.Г., Артюшков Е.В., Додонов А.Е.* и др. Плиоцен-четвертичное горообразование в Центральном Тянь-Шане // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. №2. С. 128–145.
59. *Турутанов Е.Х.* Становление гранитных интрузий и рельефообразование // Литосфера. 2014. №.1. С. 117–122.
60. *Фуз Р.* Вертикальные тектонические движения и сила тяжести во впадине Биг-Хорн и в окружающих хребтах Средних Скалистых гор. Сила тяжести и тектоника / Ред. К.А. Де Джонг, Р. Шолтен. М.: Мир, 1976. С. 434–445.
61. *Цеховский Ю.Г., Леонов М.Г., Никитин А.В.* и др. Псевдоосадочные обломочные породы массива Дзурамтай (Южная Монголия) // Литология и полезн. ископаемые. 2009. № 3. С. 312–328.
62. *Шахновский И.М.* Взаимосвязь месторождений УВ с погребенными выступами фундамента // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. Москва: GEOS, 2002. С. 294–302.
63. *Шваб А.В., Марценко М.С.* Модель движения высококонцентрированной гранулированной среды // Вестник Томск. гос. университета. Математика и механика. 2011. № 3 (15). С. 108–116.
64. *Шнип О.А.* Методика поисков скоплений нефти и газа в фундаменте // Актуальные проблемы геологии нефти и газа / Ред. В.П. Гаврилов. М.: Изд-во “Нефть и газ”, 2005. С. 187–195.
65. *Шустер В.Л.* Нефтегазоносность кристаллического фундамента // Геология нефти и газа. 1997. № 8. С. 17–19.

66. Яковлев Л.Е. Инфильтрация воды в базальтовый слой земной коры. М.: Наука, 1999. 200 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 497).
67. Batchelor T., Gutmanis J. and Ellis F. Hydrocarbon Production from Fractured Basement Formations. 2010. URL: www.geoscience.co.uk
68. Behringer R.P., Howell D., Kondic L., Tennakoon S., Veje Ch. Predictability and granular materials // *Physica D*. 1999. Vol. 133. P. 1–17.
69. Cambell C.S. Rapid granular flow // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1990. № 22. P. 57–92.
70. Cao Zhenglin, Wei Zhifu, Zhang Xiaojun et al. Bedrock gas reservoirs in Dongping area of Qaidam Basin, NW China. Oil-gas source correlation in Dongping area, Qaidam Basin // *Lithol. Reservoirs*. 2013. 25(3). P. 18–20.
71. Chigira M. Micro-sheeting of granite and its relationship with landsliding specifically after the heavy rainstorm in June 1999, Hiroshima Prefecture, Japan // *Engineering Geology*. 2001. Vol. 59. P. 219–231.
72. Clare P.U., Hansel A.K. Clast ploughment and glacier sliding over a silt glacier bed // *Boreas*. 1989. No 18. P. 201–207.
73. Drake T.G. Structural features in granular flow // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. № B6. P. 8681–8696.
74. Dershowitz W.S., Einstein H.H. Characterizing rock joint geometry with joint system models // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1988. Vol. 21. P. 21–51.
75. Jullien R. La ségrégation chez les grains de sable // *Recherche*. 1992 / Vol. 23(247). P. 1198–1199.
76. Koning T. Oil and gas production from basement reservoirs: examples from Indonesia, USA and Venezuela. *Geol. Soc., London, Sp. Publ.* 2003. Vol. 214. P. 83–92.
77. Merriam D.F., Newell K.D., Doveton J.H. et al. Northeast Kansas well tests oil, gas possibilities in Precambrian rocks: *Oil & Gas Journal*, 2007. Vol. 105, № 35. P. 54–58.
78. Mehta A. Granular matter: an interdisciplinary approach / Ed. by A. Mehta. N.Y.: Springer, 1994. 306 p.
79. Nur A.A. note on the constitutive law for dilatancy // *Pure and Applied Geophysics*. 1975. Vol. 113. P. 197–206.
80. P'an Chung-Hsiang. Petroleum in Basement Rocks // *Bull AAPG*. 1982. Vol. 66. P. 1597–1643.
81. Petrie B., Lakin M. Licence P. 1368 (Blocks 205/21a, 22a & 26b) Lancaster 'Fractured Basement' Discovery-Appraisal / Hurricane exploration. 2008. URL: Presentation //www.envoi.co.uk.
82. Porras J.S., Ferro E., Castillo C.E., Machado V.I. et al. Fractured basement: New exploratory target in La Concepcion field, western Venezuela // *Abstr. AAPG Annual Meeting*, 2007.
83. Satyanaryana P., Sinha P.K., Gupta D.K., Sathe A.V. Hydrocarbon prospectivity of the Basement of Mumbai High Field P-374. Hyderabad 2010. 8 Biennial international Conference, Exposition on Petroleum Geophysics. P. 1–6.
84. Sircar A. Hydrocarbon production from fractured basement formation // *Geol. Soc. London. Sp. Publ.* 2004. Vol.133. P. 191–213.
85. Sitharam T.G., Nimbkar M.S. Micromechanical Modelling of Granular Materials: Effect of Particle Size and Gradation // *Geotechn. and Geol. Engineering*. 2000. Vol. 18. P. 91–117.
86. Tejchman J., Wu W. Modeling of textural anisotropy in granular materials with stochastic micro-polar hypo-plasticity // *Int. J. of Non-Linear Mechanics*. 2007. Vol. 42. P. 882–894.
87. Thompson P.A., Grest G.S. Granular flow: friction and the dilatancy transition // *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67. No 13. P. 1751–1754.
88. Trinh Xuan Cuong, Warren J.K. Bach ho field, a fractured granitic basement reservoir, CUU Long Basin, offshore SE Vietnam: a “buried-hill” play // *J. of Petrol. Geology*. 2009. Vol. 32(2). P. 129–155.
89. Yaeger H.M., Nagel S.R. The physics of granular materials // *Physics Today*. 1996. April. P. 32–38.
90. Vita-Finzi C. Pie de Palo, Argentina: A clastic diaper // *Geomorphology*. 2009. Vol. 104. P. 317–322.
91. Wise D.U. Microjointing in basement, Middle Rocky Montana and Wyoming // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1967. Vol. 75. P. 287–306.

Crystalline Protrusions as the Typical Structural-Tectonic Model of Intragranite Hydrocarbon Accumulation

M.G. Leonov

*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 119017, Moscow, Russia
e.mail: mgleonov@yandex.ru*

Received January 15, 2019; revised January 27, 2019; accepted January 28, 2019

The paper deals with issues related to the study questions on magmatic tectonics and intragranitic hydrocarbon accumulating formation: (i) post-magmatic structure of granitic massifs containing hydrocarbons; (ii) mechanisms of structure-material processing, exhumation and forming porosity in granitic bodies on post-magmatic evolutionary stage; (iii) availability and distribution of hydrocarbon deposits in granitic massifs located in different geodynamic settings and different regions; (iv) description of crystal piercing bodies – granite protrusions. The role of structural-tectonic factor in intra-granitic hydrocarbon accumulating was estimated. An evolutionary structural-tectonic model of their formation within granitic massifs and, above all, granitic protrusions is proposed.

Keywords: granites, granular media, infrastructure, oil, protrusion, tectonics, hydrocarbons