

О ФОРМИРОВАНИИ ЗАПАДИННО-КАНАЛЬНЫХ СТРУКТУР МИГРАЦИИ

В.М. Шестопалов¹, В.Н. Бублясь²

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, НИЦ РПИ НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: vsh@hydrosafe.kiev.ua*

Доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик НАН Украины, заведующий отделом гидрогеологических проблем Института геологических наук НАН Украины, директор Научно-инженерного центра гидрогеоэкологических проблем при Президиуме НАН Украины.

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: bublias@ukr.net*

Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела гидрогеологических проблем.

Весьма распространенные на равнинных территориях суши и морского дна западинно-канальные структуры миграции рассматриваются как результат взаимодействия глобальной трещиноватости земной коры вибрационно-волнового генезиса и дегазации планеты. Рассмотрены общие закономерности возникновения и развития западин на суше и морском дне, ведущей роли трещиноватости литифицированных пород и ослабленных зон нелитифицированных пород над ними в постепенном переходе трещинной дегазации в трубоподобную, различия в последующих эпигенетических экзогенных процессах, наступающих после окончания активной фазы формирования западинно-канальной структуры. Отмечены выявленные признаки вторичной газовой активизации западинно-канальных структур. Среди возможного генетического разнообразия западин западины с глубинными корнями выделены как наиболее опасные для человеческой деятельности и как поисковые индикаторы глубинного скопления газов (метана, водорода и др.).

Ключевые слова: западины, дегазация, трещиноватость, вибрационно-волновые процессы.

ON FORMATION OF DEPRESSION-CHANNEL MIGRATION STRUCTURES

V.M. Shestopalov¹, V.N. Bublyas²

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: vsh@hydrosafe.kiev.ua*

Doctor of geological-mineralogical sciences, professor, academician of NAS of Ukraine, head of the Department of Hydrogeological Problems in the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Director of Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine.

² *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: bublias@ukr.net*

Candidate of geological-mineralogical sciences, senior research worker of the Department of Hydrogeological Problems.

The depression-channel structures widely developed in the flat areas of sea floor and dry land are considered as a product of interaction between the global earth crust fractures of the vibration-wave origin and degassing of the planet. The paper describes general peculiarities of the depression-channel structures generation and development on sea floor and dry land, the leading role of the lithified rocks fracturing and weakened zones of the overlying non-lithified rocks in the gradual transition of fracture degassing to degassing via channels, differences in subsequent epigenetic exogenous processes following the active phase of depression-channel structures formation. Revealed signs of secondary gas activation in the depression-channel structures were

© В.М. Шестопалов, В.Н. Бублясь, 2016

studied. Among the possible genetic diversity the deep-rooted depression structures were identified as presenting the greatest threat to human activities and serving as search indicators of deep gas accumulation (methane, hydrogen, etc.).

Key words: depression-channel structures, pockmarks and chimneys, degassing, fracturing, vibration-wave processes.

ПРО ФОРМУВАННЯ ЗАПАДИННО-КАНАЛЬНИХ СТРУКТУР МІГРАЦІЇ

В.М. Шестопапов¹, В.М. Бублясь²

¹ *Інститут геологічних наук НАН України, НіЦ РПД НАН України, Київ, Україна, E-mail: vsh@hydrosafe.kiev.ua*

Доктор геолого-мінералогічних наук, професор, академік НАН України, завідувач відділу гідрогеологічних проблем Інституту геологічних наук НАН України, директор Науково-інженерного центру радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України.

² *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: bublias@ukr.net*

Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник відділу гідрогеологічних проблем.

Досить поширені на рівнинних територіях суші і морського дна западинно-канальні структури міграції розглядаються як результат взаємодії глобальної тріщинуватості земної кори вібраційно-хвильового генезису і дегазації планети. Розглянуто загальні закономірності виникнення і розвитку западин на суші і морському дні, провідної ролі тріщинуватості літифікованих порід і ослаблених зон нелітифікованих порід над ними в поступовому переході тріщинної дегазації в трубоподібну, відмінності в наступних епігенетичних екзогенних процесах, що настають після закінчення активної фази формування западинно-канальної структури. Відмічені виявлені ознаки вторинної газової активізації западинно-канальних структур. Серед можливого генетичного різноманіття западин западини з глибинним корінням виділені як найбільш небезпечні для людської діяльності і як пошукові індикатори глибинного скупчення газів (метану, водню та ін.).

Ключові слова: западини, дегазація, тріщинуватість, вібраційно-хвильові процеси.

Введение

До последнего времени в региональной гидрогеологии преобладали взгляды о том, что в пределах платформенных структур преобладают относительно выдержанные проницаемые и слабопроницаемые пласты, обеспечивающие однотипность условий вертикальной гидравлической связи этажно залегающих водоносных горизонтов на значительных площадях (так называемая «кусочная» однородность при схематизации условий). При этом считалось, что гидравлически раскрытые разломы, тектонические трещины, а также литофациальные окна – достаточно редкое явление.

Еще одной специфической особенностью существующих подходов является исключительное использование в решении практических и теоретических задач гидрогеологии лишь механизмов массопереноса. Между

тем в природе существуют два способа передачи энергии, которая может быть движущим началом в формировании различных процессов. Во-первых, это перенос энергии с помощью движущегося вещества (воды, твердых частиц, растворенных во флюидах солей, коллоидов и т.п.). До сих пор эти способы передачи энергии в основном самостоятельно не анализировались, ибо сам массоперенос рассматривался как мерило и главный результат затраченной при этом энергии. Во-вторых, это волновой перенос энергии, при котором частицы вещества испытывают ограниченные в пространстве колебательные движения. Передача энергии осуществляется при этом импульсами и зависит от амплитуды и частоты колебаний. Волновая передача энергии в геологической среде осуществляется под влиянием различных природных и техногенных воздействий.

Выполненные в этом направлении исследования свидетельствуют не только об исключительной роли волновых процессов в формировании глобальной трещинной структуры земной коры планеты, но и в преобразовании вещества, изменении его состава и параметров массообмена, в создании и развитии динамических зон аномальной фильтрации и миграции, обеспечивающей интенсификацию вертикальной взаимосвязи этажных флюидонапорных систем.

Наряду с этим весьма важным определяющим процессом, формирующим аномальные локально выраженные, но массовые пути вертикальной миграции в земной коре является дегазация Земли, осуществляющаяся в колоссальных объемах на протяжении, по-видимому, всей геологической истории планеты. В процессе собственно дегазации в миграционный процесс постепенно вовлекаются разнообразные флюиды с ведущей водной компонентой и даже местами дезинтегрированные компоненты нелигифицированных и лигифицированных пород.

В результате, кроме ограниченных по территории зон спрединга, субдукции, вулканов, на планете сформировалась разветвленная система газово-флюидной миграции в пределах разломно-трещинной и западинно-канальной сети. Последняя весьма распространена на суше и в морских условиях. Но с единых позиций, насколько нам известно, такая система освещена недостаточно. В данной публикации мы попытались это восполнить.

Вибрационно-волновая энергия и трещиноватость

Основными процессами, предопределяющими возникновение и распространение волновой энергии, является неравномерное вращение Земли в течение суток, месяцев, лет, многолетних периодов (в том числе тысячелетних и миллионнолетних). Это также сейсмические процессы – землетрясения, форштоковые и афтерштоковые возмущения. Если учесть все сейсмические толчки и колебания, то они на нашей планете происходят каждую минуту и распространяются на большие расстояния. При

этом основную их часть можно зафиксировать лишь инструментально. Это также многочисленные штормы в океанах и морях. Передача от них энергии в виде волн фиксируется на всех континентах, несмотря на огромную отдаленность друг от друга. Так, сейсмостанции Ташкента, Ашхабада, Новосибирска, расположенные в центральной части огромного Евразийского материка, четко фиксируют колебания, возникающие под влиянием штормов в Атлантике или Тихом океане.

Изменение скорости вращения Земли в соответствии с ротационной теорией [Moody et Hill, 1956; Bostrom, 2000; Тяпкин, Довбинич, 2009; Ротационные..., 2007, Собственные..., 1964 и др.] является ведущим процессом, определяющим пространственную ориентировку и параметры сформировавшейся глобальной трещиноватости разной размерности и порядка.

Образование этой трещиноватости увязывается с напряжениями, возникающими при изменении сил сжатия – растяжения Земли в результате изменения скорости ее вращения под влиянием изменяющегося гравитационного взаимодействия Земли с различными космическими телами (Луна, Солнце, планеты, положение по отношению к галактическим массам).

Постепенно становится все более ясным, что это весьма мощный энергетический процесс. Суммарный энергетический баланс волновых колебаний литосферы Земли составляет около 27×10^{40} эрг в год, что на 12 порядков больше энергетического баланса всех тектонических, сейсмических и геофизических процессов [Селюков, Стигнеева, 2010]. В результате их воздействия в земной коре и верхней мантии накапливаются напряжения, которые при превышении ими предела прочности пород тектоносферы приводят к образованию системы трещиноватости, разделяющей земную кору на блоки разного порядка – от сотен километров до нескольких метров.

При этом выраженность на земной поверхности этих систем в зависимости от конкретных геолого-ландшафтных условий может быть весьма разной. Исследования по этой проблеме, выполненные в 60–80-е годы XX ст. [Moody and Hill, 1956; Марты-

нова, 1969; Шульц, 1973; Шаблинская, 1977 и др.], показали, что в каждом изученном регионе выделяются до восьми систем основных разломов земной коры и сопутствующей им трещиноватости. При этом параметры простираения систем разломов разных регионов в основном согласуются, что свидетельствует об их подчиненности единым глобальным процессам. Позднее результаты этих исследований получили дальнейшее развитие [Анохин, Одесский, 2001 и др.].

Усиление и снятие дополнительных напряжений, которые функционируют в основном в рамках глобальной сети трещиноватости ротационного генезиса, активизируются изменениями угловой скорости вращения Земли, лунно-солнечными приливами, деформирующими поверхность геоида, и другими процессами. Под влиянием этих процессов, имеющих периодический временной характер, выявляется ритмическая сменяемость состояния разуплотнения и сжатия по системам трещин. В скальных и полускальных породах смена ритмов сжатия – растяжения хорошо фиксируется по степени раскрытия трещин. В сыпучих осадочных отложениях эти изменения обычно более завуалированы, но также могут быть выявлены.

Изменение поля деформаций земной толщи пород независимо от теоретических построений было выявлено и зарегистрировано как научное открытие Вартаняна – Куликова [Вартанян, 1998]. Ими представлена технология мониторинга гидрогеодеформационного поля как основа выявления изменяющегося во времени и пространстве поля деформации.

Использование скважинных деформографов позволило установить, что в некоторых местах изменения напряжения пород могут происходить достаточно быстро. Скачки деформаций могут длиться минуты, часы, сутки. По данным В.П. Рудакова [Рудаков, 1993] уверенно выделяются деформационные ритмы годичной периодичности. Они порождены годовым изменением скорости вращения Земли.

Интересные результаты были получены при анализе аварийности газовых сетей в г. Одесса и их связи с геодеформацион-

ными процессами [Учитель и др., 2000]. Было установлено, что значительная часть аварий зависит не от технического состояния газового хозяйства, а происходит под влиянием различных геодеформационных процессов в земной коре. При этом были выделены:

- сезонные максимумы аварийности (преимущественно май – июнь и октябрь – декабрь), обусловленные внутригодовым изменением скорости вращения Земли;
- существенное увеличение аварийности (в десятки раз) накануне катастрофических землетрясений в смежных регионах.

Выполненные параллельно с указанными исследованиями наблюдения за выделением газов показали совпадение с периодами повышенной аварийности газовых систем выделения газов глубинного естественного происхождения, свидетельствующие о периодическом увеличении раскрытости недр на значительные глубины.

Исключительно важная роль волновых процессов этим не ограничивается. Интересные результаты получил В.Л. Ильченко [Ильченко, 2000]. На примере анализа керн Кольской сверхглубокой скважины и моделирования разрушения отдельных прослоев пород на глубине было показано, что упругие стоячие волны способны выполнять эту работу в массиве кристаллических пород. При моделировании были использованы характеристики упругих свойств пород, вскрытых скважиной, и волновая энергия, аналогичная лунно-солнечным воздействиям на Землю. В результате модельного эксперимента было подтверждено образование в геологическом разрезе интервалов пород с напряжением растрескивания вплоть до деградации отдельных прослоев. При моделировании распространения стоячих волн в глубь горного массива удалось достаточно удачно оценить границу отражения упругих волн. В результате была получена удовлетворительная сходимость модельных и фактических прослоев деградации пород массива по глубине.

Для более полного понимания роли волновых процессов важны результаты исследования рудообразования [Богацкий, 1986; Наумов, 2007; Нестеренко, Чиков, 1992 и др.].

Формирование рудных месторождений в тектонически активных участках в упомянутых и других работах рассматривается не как одноактный мощный процесс, а как система низкоамплитудных сейсмовибрационных влияний, которые предопределяют перераспределение рудного вещества в значительном пространстве и концентрацию его в определенном относительно ограниченном объеме.

Энергетическое волновое воздействие на породы, которое может осуществляться периодически, но в течение длительного геологического времени, вызывает многочисленные эффекты виброползучести, виброрелаксации (снижение напряжения в геосистеме), виброусталости (снижение нагрузки при разрушении пород), вибромеханохимии (ускорение химических реакций, растворения, распада и синтеза соединений и т.д.). Г.Б. Наумов [Наумов, 2007] подчеркивает, что в таких условиях образуются регулярная параллельная слоистость, оvoidные структуры, квазислоистые концентрации тяжелых (в том числе рудных) зерен. В структуре зон дислокаций могут возникать локальные и микроскопические «сейсмофокальные зоны», которые фокусируют волновую энергию. Их развитие происходит в импульсном режиме по сценарию длительного накопления энергии, которая поступает из внешней системы. Все это осуществляется в процессе многочисленных сейсмических возмущений, которые разделены во времени, но сконцентрированы в пространстве.

Такая вибрация способствует ускорению процессов диффузии и самоочистки минеральных зерен. По данным [Епиколомпиан, 1989], в условиях не сцементированной размельченной среды реакционная активность локального взаимодействия повышается на порядки даже в сравнении с жидкой средой. Согласно результатам экспериментов, переносчик волновой энергии ультразвук воздействует на дегидратацию и литификацию осадочных пород, что связано с перераспределением химических элементов в системе.

Результаты этих исследований конкретизируются в работах с четкой прикладной направленностью [Селюков, Стигнеева,

2010 и др.]. Наблюдения на магистральных газопроводах свидетельствуют о том, что в течение года происходит 15–20 тыс. и более циклов сжатия – растяжения в соответствии с динамикой движения земной поверхности. Вследствие этих малоамплитудных, но многочисленных пульсаций давления и агрессивной среды происходят коррозионное растрескивание и разъедание металла труб. Определяющими в зарождении трещин являются дефекты в металле. Но такая же ситуация существует и в породах: импульсные вибрационные нагрузки и агрессивная среда предопределяют зарождение микротрещин, приуроченных к дефектам в минеральных зернах сыпучих пород либо в минеральных неоднородностях и дефектах скальных и полускальных пород. В микротрещинах, наряду с обычным химическим взаимодействием, происходят гидролиз продуктов коррозии, подкисление и химическая активизация среды. В зависимости от химического и минерального состава пород, наличия различных типов дефектов в микрообъектах среды образуются весьма пестрые условия химических взаимодействий в системе «твердые разновидности вещества – жидкость – газ». Выявлены также механизмы возникновения микротрещин и дальнейшего разрушения твердого вещества под влиянием бикарбонатной среды, которая воздействует на катоднополяризованные участки (металлические включения) пород.

Обобщая приведенные и другие результаты исследований, приходим к выводу, что вибрационно-волновая активность планеты и ее частей от различных источников и на разных уровнях приводит к возникновению и развитию сложного комплекса воздействий на геологическую среду. Среди них можно выделить следующие:

- периодическое механическое сжатие, разуплотнение, трение частиц несцементированных пород или микро- и макроблоков скальных и полускальных пород с частотой десятки тысяч циклов колебаний в год на протяжении многих тысячелетий и миллионов лет, при этом нарастающее максимальное воздействие реализуется прежде всего на границах неоднородности пород, проявленной под влиянием комплекса вибрационных процессов;

– газохимическое воздействие, обусловленное повышенным выходом газов и агрессивных жидких компонентов при механической деструкции пород;

– радиоактивное влияние, обусловленное возрастанием концентрации радона и торона в активных геодинамических зонах, которые вследствие облучения вещества пород и воды также способствуют их изменению;

– усиление электрического воздействия на компоненты геологической среды в аномальных геодинамических зонах по сравнению с фоновыми участками.

Дегазация Земли и аномальные западинные структуры

Весьма важным процессом, определяющим начальный и, вероятно, последующие этапы формирования аномальных зон, является глубинная дегазация Земли. Рассмотрим этот процесс прежде всего на примере формирования западин в морских условиях. Впервые эти западины (на английском языке – *rockmarks*) были изучены у берегов Канады в 60-х годах XX ст. Позднее они были выявлены в очень больших количествах в Атлантическом океане у берегов Западной Африки, Испании, а также в Средиземном, Норвежском, Баренцевом, Чукотском морях, у берегов Китая и на многих других участках Мирового океана. Во многих случаях при небольших уклонах дна размещение западин имеет хаотический вид. На некоторых участках просматривается их линейная приуроченность. С увеличением уклонов дна их размещение становится более определенным. Они образуют квазилинейные цепочки, которые вытянуты в направлении уклона дна. На снимках прослеживается их эволюция во времени – они постепенно сливаются, образуя вытянутые балки, которые не связаны с процессом переноса обломочного материала с суши (отсутствуют конусы выноса).

На некоторых участках было выполнено сейсмическое профилирование. Его результаты очень показательны. На одном из таких участков установлено, что западины расположены на расстоянии 200–600 м от разлома. Но подзападинные каналы подходят по не нарушенным породам к разлому под

уклоном. То есть их корневая связь с разломами в таких случаях зафиксирована.

Существуют различные модели возникновения морских западин. Наиболее вероятной является модель газового генезиса. Она подтверждается результатами сейсмического профилирования в различных регионах и непосредственными наблюдениями. В частности, у берегов западной Африки, в Норвежском море и в других местах было выявлено, что под западинами находятся вертикальные газопроводящие каналы (трубы), которые прослеживаются в ряде случаев на большую глубину. В работе [Cathles et al., 2010] описан вероятный механизм образования подзападинного канала и западины. Согласно этому механизму, поступающий снизу газ встречает на своем пути барьеры различного генезиса с низкой проницаемостью и накапливается под ними. После накопления дополнительного давления, достаточного для разрыва барьеров, газ прорывается вверх, нарушая целостность зерновых контактов в осадочных породах, отжимая и вовлекая за собой воду и некоторую часть зерен пород в виде суспензии. В результате образуется своеобразная газоводонасыщенная труба (*gas chimney*), которая по своим параметрам проницаемости и структуре твердого вещества существенно отличается от окружающего массива пород (фона). Применение технологии 3D сейсмических исследований позволяет уверенно обнаруживать подобные трубы (каналы) (рис. 1).

Наблюдениями установлено, что рыхлые отложения выносятся водно-газовой смесью на поверхность дна и транспортируются придонными течениями. В ряде случаев фиксируется эрозия донных грунтов вытекающими из глубин водно-газовыми струями, которые разуплотняют, суспензируют донные отложения и поднимают их в придонные течения. Важно то, что во многих случаях наблюдениями зафиксирован выход газа непосредственно из западин.

Детальные исследования результатов сейсмического изучения морских склонов у берегов Намибии [Moss, 2010] позволили установить, что часть каналов возникла в результате взрывного прорыва отложений водно-газовой смесью с весьма высоким избыточным давлением. Другая часть кана-

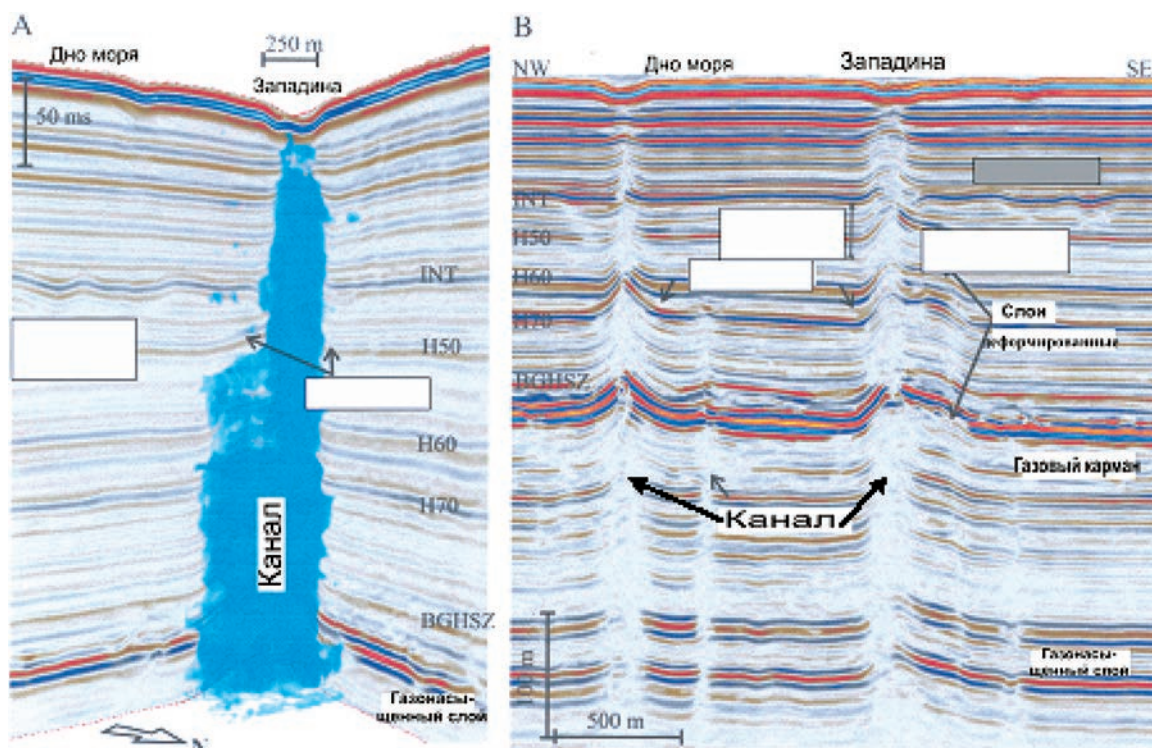


Рис. 1. Сейсмический разрез с преобразованием интервальных скоростей, выявляющий наличие подзападинных и слепых каналов дегазации [Plaza-Feverola Andreia et al., 2011]

Fig. 1. Seismic section with interval velocities transformation, detecting degassing channels beneath the depression floors as well as blind degassing channels [Plaza-Feverola Andreia et al., 2011]

лов формировалась при более умеренных избыточных давлениях и более спокойных режимах восходящего проникновения водно-газовой смеси. Установлены значительная длительность функционирования каналов (до 10 млн лет в неогене), наличие перерывов с фиксированными погребенными западинами. Во многих случаях обнаруживается возобновление активности водно-газового выноса из каналов в плейстоцене. Наличие в молодых отложениях большого количества органики, постепенное уплотнение и диагенетические процессы, результаты изотопных определений углерода в газовых компонентах восходящих флюидов свидетельствуют о том, что углеводородный газ (преимущественно метан) имеет два источника – органику осадочных отложений и глубинные абиотические очаги образования. Глубинность восходящих газов во многих случаях подтверждается наличием в смеси водорода и гелия.

При изучении механизмов образования выходов газа из газонасыщенных коллекто-

ров, находящихся под слоями глин, были выполнены эксперименты [Harrington, Hofsmann, 1999], которые показали, что растрескивание глин вызывается высоким давлением газа. На больших глубинах, где породы в значительной мере литифицированы и дополнительно упрочнены, разрыв сплошности слабопроницаемых пород (так называемый «гидроразрыв пласта») происходит при относительно высоких давлениях (нередко это «газоразрыв»).

Установлено, что для образования трещиноватости достаточно, чтобы давление газа достигло 75–90% литостатического давления [Moss, 2010]. Прочность на растяжение пород может изменяться от <2 до ≥ 15 мПа (от глин до магматических пород, соответственно). С учетом нарастания давления газа с глубиной сделаны предположения, что разрыв в литифицированных породах может происходить на глубинах более 500 м, в нелитифицированных алевритах – около 30 м, а в песках – уже в пределах первых нескольких метров.

При этом мы предполагаем, что, по-видимому, заложенная в кристаллическом основании и поддерживаемая циклическим глобальным и региональным изменением напряжения (сжатия – растяжения) трещиноватость проявляется в виде эпигенетически измененных зон в нелитифицированном либо слаболитифицированном осадочном чехле. Эти изменения, очевидно, касаются и неких скрытых аномалий уменьшения прочности и местами увеличения проницаемости осадочных пород. Именно они и выступают в качестве предпочтительных мест образования прорыва газов и формирования газовых труб.

Практические работы по изучению глин в акватории Северного моря показали наличие дискретных путей миграции в глинах под морскими западинами и выводными каналами сипов [Moss, 2010].

Лабораторные эксперименты, имитирующие образование западин [Woolsey et al., 1975], выявили, что в зависимости от природы и мощности отложений и энергии выделяющегося флюида могут образовываться «взрывные» западины, наполненные газом вздутия (купола), которые после истечения газа также превращались в западины, грязевые вулканы (при мощном слое перекрывающих глин). Наблюдения также показали, что важную роль в формировании западин могут играть землетрясения. На побережье северо-западной Англии во время землетрясения свидетели наблюдали выброс большой массы песка, воды и камня на высоту выше роста человека. На месте выброса образовались воронки диаметром более 500 м. Здесь же возникли многочисленные трещины общей длиной около 0,8 км, изливавшие воду [Moss, 2010].

Аналогичные события при крупном землетрясении произошли на одной из низменностей района Тохоку в Японии. Здесь образовались многочисленные песчаные вулканы и западины диаметром до 8 м и глубиной 1,5 м, которые извергали воду и песок [Tohno et Shamoto, 1983].

В Петрском заливе в Греции площадью 800 км² отложения в переходной зоне между плейстоценом и голоценом весьма газонасыщены. После землетрясения здесь

были обнаружены донные западины диаметром 25–150 м и глубиной до 15 м [Hasiotis et al., 1996]. В ряде мест зафиксированы участки с плотностью западин 80–150 штук на 1 км². Большинство из них активно дегазировали, а некоторые, по-видимому, выпускали смесь газа, воды и песчано-алевритистую смесь. Автоматический замер температуры морской воды над дном показал пульсирующее ее повышение перед землетрясением.

Пробы отобранного из донных западин газа фиксируют в основном такой состав (%): метан – 60–99; азот – до 20; углекислый газ – до 10; водород – до 2,5; гомологи метана – до 4,7; сероводород – сл.

Параметры донных западин отличаются от западин на суше. Статистическая обработка замеров по данным 57 публикаций показала логарифмическую зависимость между диаметром и глубиной донных западин. При этом средняя статистическая оценка диаметра составляет 128 м, а глубины – 9,6 м [Pilcher, Argent, 2007]. В этом случае средние глубины донных западин существенно превышают глубины западин на суше. Вероятно, это свидетельствует о повышенной газовой активности донных западин и различиях в экзогенных процессах формирования западин в море и на суше.

Рассмотрим теперь, действительно ли газовый фактор проявляется в условиях западин суши.

К сожалению, здесь такие обширные исследования, как в море, не велись. И все же некоторые результаты получены. По данным [Шестопалов и др., 2007; Шестопалов, Макаренко, 2013], геофизическими исследованиями выявлена подзападинная аномалия до глубины 50–60 м. Еще более однозначные результаты опубликованы в [Ларин и др., 2010]. Использование метода микросейсмического зондирования, который успешно применяли для поиска алмазных трубок взрыва, позволило выявить под одной из западин канал диаметром 350 м и глубиной более 7 км. Пористость пород в этом канале была аномальной. Замеры концентрации водорода дали результат 1,5–1,7%. С учетом потерь при отборе он мог достигать 2,5%, что коррелирует с данными по морским западинам. Следует отметить,

что система отбора газа была такой, чтобы исключить учет газа неглубинного происхождения. Более концентрированные выделения газа, которые привели к образованию гремучей его разновидности (смесь из более 4% водорода и воздуха) и довольно мощным взрывам, зафиксированы в Сасово Рязанской области (объемно-вакуумный взрыв мощностью около 30–50 т тротила, 1991 г.), около Курской АЭС в 1999 г. [Портнов, 2004], а также возле Марлен во Франции в 1967 г. В 2014 г. на Ямале и Таймыре в результате взрыва возникли глубокие воронки [Богоявленский, 2014]. В одной из них было установлено выделение газа метана аномальной концентрации. Взрывное образование западины и выброс из подзападинного канала зафиксированы на острове Родос (Греция) [Hanken et al., 1999]. Здесь вокруг центрального понижения обнаружены кольца обломков раздробленных пород.

Если предположить пульсационный режим выходов газа в море и на суше, то в периоды активизации в донных условиях под давлением выбрасывается водно-газовая смесь с захватом рыхлого материала. В условиях суши можно ожидать, что в связи с наличием зоны аэрации газ выходит на поверхность лишь с небольшой примесью парообразной влаги без капельно-жидкой и тем более без струеобразной водной компоненты. Механический вынос сыпучего материала может осуществляться лишь в редких случаях при взрывном выбросе газа.

Аномальный вынос газа, в составе которого водород имеет важное значение, приводит к активизации его взаимодействия с вмещающими породами. При этом водород, будучи весьма агрессивным восстановителем, вступает в реакцию с кислородсодержащими минералами и органическими соединениями [В.Н. Ларин, Н.В. Ларин, 2008], изменяет минеральный состав контактирующих пород и образует воду и метан. При этом пористость и проницаемость вмещающих пород увеличиваются, а возникшая вода и газ вовлекаются в общий массообмен. Учитывая, что этот процесс осуществляется по мере подъема водорода через толщу пород мощностью в многие десятки и сотни метров неравномерно, возник-

шающие неоднородности вторичной пористости при наличии вибрационного фона способствуют некоторой усадке пород и формированию отрицательных форм рельефа – западин. При этом аномальность пористости в этих каналах продолжает сохраняться и поддерживаться последующей подпиткой и воздействием водорода. Эти процессы взаимодействия водорода и вмещающих пород происходят в подзападинных каналах и под дном моря, и на суше.

В периоды затухания выноса газов, в условиях морского дна и наличия тесной гидравлической связи морской воды с подземной в придонной гидрогеологической системе, массообмен между ними будет определяться соотношением фаз напорного режима каждой из упомянутых сред и иметь в основном малоградиентный характер.

В условиях суши в этот период происходят аномальный водный перенос материала из окружающего поверхностного водосбора в западину, его частичная переработка и активный нисходящий массоперенос [Шестопапов и др., 2007], в основном определяющий темпы и направленность дальнейшего развития западин и их параметров.

Минимальная дегазация в этот период может играть лишь вспомогательную роль в процессах дальнейшего формирования западин и их подзападинных каналов.

Таким образом, донные западины формируются в основном в результате выброса водно-газового и твердого материала в морскую среду. А западины суши, кроме начальной фазы, предопределяющей газовое зарождение западин, и в периоды существенной газовой активизации, продолжают формироваться в результате нисходящего массопереноса (экзогенные процессы) и переработки поглощаемого материала в их аномальной зоне.

Взаимосвязь линейных трещинных и западинных систем

С учетом изложенного выше рассмотрим взаимосвязь и развитие линейных и округлых (блюдцеобразных) геодинамических зон аномальной фильтрации и миграции. Прежде всего из приведенных выше данных следует, что возникшая под влиянием рота-

ционных сил трещиноватость и вмещающие ее скальные и полускальные породы претерпевают комплекс последующих изменений под воздействием вибрационных механических сил, газохимического и других видов воздействия. При этом упомянутые трещины выполняют роль отражающих поверхностей и концентрируют вокруг себя стоячие волны, которые усиливают импульсное воздействие на смежные с трещинами породы. В результате изменяется околотрещинная проницаемость пород, возникают гидро- и газохимические микроаномалии, которые влияют на изменение состава околотрещинного флюида и соответственно на дальнейшие изменения состава и параметров притрещинных пород. Натурные наблюдения показывают, что в выходящем на поверхность массиве скальных пород околотрещинная среда может находиться на разных стадиях переработки и деградации от практически визуально не измененных пород до образования мелких вывалов измельченных до размеров дресвы обломков (чаще всего в местах пересечения трещин). Но по мере перекрытия скальных пород осадочными рыхлыми и слабосцементированными породами в условиях равнинных территорий проявление упомянутой выше трещиноватости постепенно ослабевает и частично замещается округлыми (продолговато-округлыми и другими замкнутыми) понижениями – западинами. В результате выполненного анализа космоснимков территорий различных континентов были отмечены тенденции связи возникновения и развития западин с трещиноватостью. Прежде всего выявлено, что западины, за редкими исключениями, не развиваются в пределах территорий с расчлененным рельефом. Далее, в большинстве случаев четко прослеживается приуроченность и, следовательно, подчиненность западин трещинным системам. В частности, были выявлены следующие соотношения трещин и западин:

1. Линейные трещинные системы (без заметной вторичной трансформации пород вдоль трещин), которые образовались в скальных или полускальных породах, выходящих на дневную поверхность или залегающих на небольшой глубине (первые метры).

2. Линейные трещинные системы, образовавшиеся в скальных или полускальных породах, залегающие на небольшой глубине и подвергшиеся начальной трансформации с отдельными слабо выраженными западинноподобными образованиями в системе трещин (рис. 2).

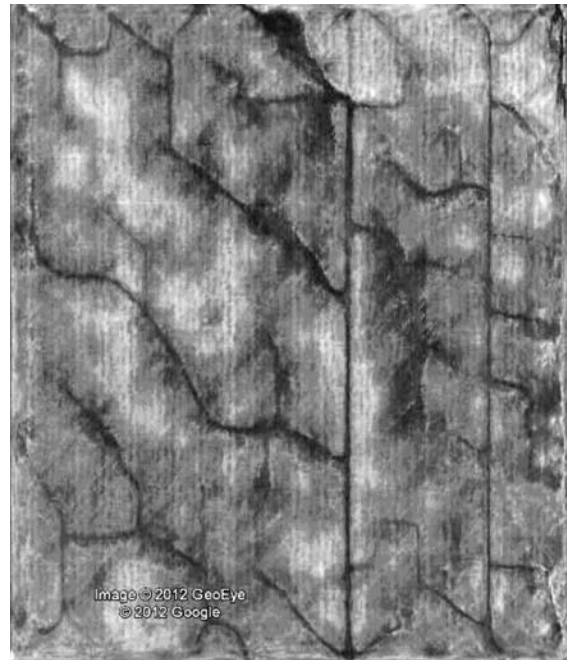


Рис. 2. Линейные трещинные системы со слабо выраженными западинно-подзападинными образованиями

Fig. 2. Linear fracture systems involving weakly expressed forms in depressions and beneath depression floor

3. Частично выраженные линейные трещины, возникшие в скальных и полускальных породах, перекрытых толщей нелигифицированных пород (мощностью примерно десятки метров) с более выраженными западинноподобными формами, которые четко связаны с трещиноватостью (рис. 3).

4. Западинные системы, связь которых с трещинами подтверждается линейной вытянутостью отдельных скоплений западин (мощность рыхлых и слабосвязанных покровных отложений достигает сотен метров в пределах относительно стабильных платформ или тысяч метров в пределах структур геодинамической активизации) (рис. 4).

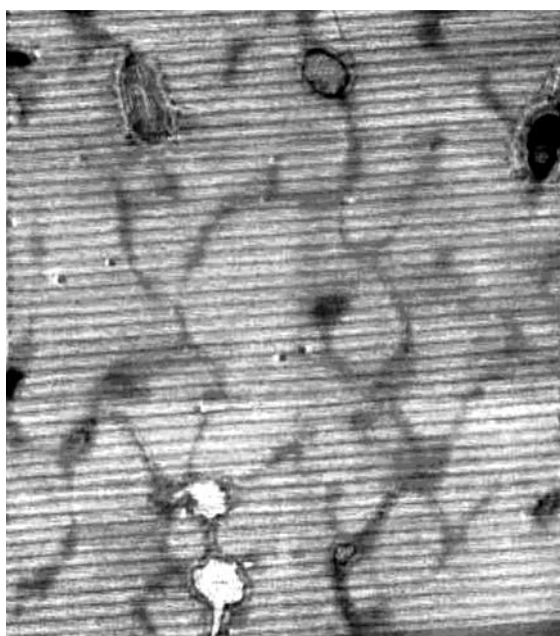


Рис. 3. Частично выраженные линейные трещины с западинно-подзападинными формами

Fig. 3. Partially expressed linear fractures involving forms in depressions and beneath depression floor



Рис. 4. Проявление линейной вытянутости отдельных групп западин

Fig. 4. Linear elongation of certain depression groups

5. Западинные системы, связь которых с трещиноватостью либо не прослеживается, либо проявляется при использовании специального анализа. Перекрытость трещинных систем в скальных или полускальных породах достигает многих сотен или тысяч метров в пределах относительно стабильных геологических структур.

Судя по приведенной типизации соотношения линейных и западинных форм, основной причиной постепенного замещения проявлений первых вторыми и уменьшения признаков их видимой связи являются увеличение мощности перекрывающих рыхлых и слабосвязных пород и, по-видимому, особенности соотношения их литологического состава. Вероятно, барьерные свойства этих пород постепенно уменьшают возможности линейной разгрузки вещества (прежде всего газов) и энергии на поверхность Земли. В результате происходит все большая их концентрация в отдельных ослабленных узлах, которые нередко образуются на пересечении трещин.

Концентрация в этих узлах относительно более активного переноса флюидов (в основном газов), образующих каналы, впоследствии поддается воздействию волновой энергии, электрическим процессам, локальной дальнейшей циркуляции флюидов и их химическим аномальным взаимодействиям с вмещающими породами. Все эти процессы, взаимодействуя друг с другом, в комплексе создают единую локальную систему «газовый очаг – восходящий канал – западина», которая проявляется на поверхности Земли локальным понижением, а в приповерхностных слоях – комплексом изменений литологии, структуры отложений, геохимическими и параметрическими особенностями, отличающими их от фоновых образований.

Размеры западин и плотность их размещения зависят от комплекса процессов и факторов – интенсивности и частоты циклов дегазации, барьерных свойств покровных литифицированных и нелитифицированных образований, конфигурации и особенностей трещиноватости скальных и полускальных пород. Последние влияют как на интенсивность массопереноса, так и на особенности волновых процессов в осадоч-

ной толще, взаимодействие жидких флюидов (подземных вод) в многоэтажной системе проницаемых и слабопроницаемых пластов осадочных пород, интенсивность экзогенных процессов и др.

Следует особо отметить, что линейные проявления трещинных систем скальных пород фундамента не исчезают полностью при увеличении мощности осадочных отложений до многих сотен и тысяч метров. Они очень хорошо препарируются при рельефообразовании в условиях поднятия массива пород (понижения базиса эрозии) и, соответственно, активизации эрозионных процессов. Унаследованность элементов эрозионной системы (отрезков долин рек, ручьев, оврагов, балок) с глубинной трещиноватостью прослеживается повсюду. Но в этих условиях образование западин не происходит вообще или встречается крайне редко.

Очевидно, что эрозионные процессы обуславливают разуплотнение осадочной толщи отложений, вызывая улучшение связи в зонах эрозии между флюидами трещинной системы нижележащих скальных пород и разуплотненных образований покровной толщи. Осуществляется это прежде всего в результате разгрузки горного массива от веса эродированных пород, активизации вертикальных газообменных, гидродинамических и гидрохимических процессов, а также, вероятно, нарастающих вибрационно-механических воздействий. Таким образом, вследствие линейной активизации эрозионных и сопутствующих им процессов массопереноса и вибрационно-волновых происходит линейное рассредоточение их воздействий, и потребность в узловой концентрации этих процессов в развитии западинно-канальных систем постепенно исчезает.

Многие специалисты увязывают генезис западин лишь с экзогенными процессами – суффозией, карстом, криогенезом и др. Такой подход к зарождению и развитию этих специфических структур вынуждает упомянутых авторов находить связь их расположения с геоморфологическими элементами районирования прежде всего с террасами и поймами рек и озер. Выше мы установили, что важным условием возник-

новения западин является равнинность территории. Речные и озерные террасы характеризуются, как правило, значительной равнинностью. Но изучение плотности распределения западин в пределах упомянутых геоморфологических подразделений показывает, что их сгущения расположены крайне неравномерно. Так, площадь западин в левобережной части террас Днепра от Киева и выше по течению реки колеблется от 1 до 3–4% общей территории. А южнее Киева на стыке Киевской, Черниговской, Полтавской и Черкасской областей площадь, занятая западинами, достигает 10%, а их количество на единице площади возрастает в несколько раз. Очевидно, что скопление этих западин никак не связано с геоморфологическими подразделениями. С учетом рассмотренной выше их привязки к глубинным трещинным системам можно предположить, что территория на стыке упомянутых четырех областей характеризуется повышенной активностью глубинной трещиноватости. Возможной причиной этого является глубинный плюм. Судя по повышенной плотности активных (развивающихся) западин, активизация плюма реализуется как через динамическое проявление трещиноватости, так и, по-видимому, через аномальную восходящую периодическую дегазацию. Аналогичные результаты получены по морским западинам. Например, в Средиземном море вблизи затопленной части дельты р. Нил обнаружено скопление западин (до 18 тыс. штук) в ограниченной по площади равнинной территории и редкое их нахождение либо отсутствие на смежных равнинных территориях [Moss, 2010].

Таким образом, равнинность территории для развития ореолов западин является условием необходимым, но недостаточным. Их возникновение следует увязывать прежде всего с глубинными структурами и процессами.

Возникает вопрос: а могут ли быть безкорневые (безканальные) западины? Безусловно, могут. Но выяснить это смогут только те, кто для этого изучает газы, применяет соответствующие методы геофизики, специальные методы исследования эпигенетических изменений пород, особенности группировки западин и др.

Выводы

Выполненные многочисленные исследования в морских акваториях и на суше позволяют выделить весьма распространенный тип западин, характеризующихся общностью закономерностей их развития. При этом подразумеваются те западины, которые имеют подзападинные каналы.

Формирование структур западина / подзападинный канал можно представить как сложный комплексный процесс, развивающийся под влиянием различных факторов (сил) в следующей основной последовательности.

1. Формирование глобальной трещиноватости земной коры под влиянием вибрационно-волновых напряжений различного генезиса (неравномерное вращение Земли на орбите, сейсмические, штормовые, блочные поступательно-вращательные и другие движения).

2. Формирование линейной дегазации Земли из недр.

3. Возникновение и наращивание нелигитифицированного (слаболитифицированного) чехла с постепенным возрастанием его мощности в отдельных структурах, увеличивающей сопротивление линейной трещинной дегазации.

4. Под влиянием активизации пульсирующей дегазации образование энергетически более эффективных локальных (округлых, эллипсовидных, кольцевых и т.п.) прорывных каналов дегазации с выходом в пористо-проницаемые пласты либо с прорывом на поверхность.

5. В ряде случаев обогащения осадочных пород биогенной органикой биогенные газы могут формировать локальные системы «западина – канал» с менее глубокими корнями либо вовлекаются в формирование глубинных систем.

6. Выход газопроводящего канала на поверхность с выносом жидкого и сыпучего материала, с переработкой минерального состава вмещающих пород сопровождается существенным увеличением проницаемости пород в канале вплоть до образования карстовых пустот и трещин и последующим оседанием осадочного чехла в виде западин, блюдец, воронок и т.п.

7. Наличие водорода в восходящем флюиде предопределяет дополнительное возникновение воды в результате его взаимодействия с кислородсодержащими минералами вмещающих пород (образование рассредоточенных внутренних источников питания подземных вод).

8. После этапа формирования систем «западины – каналы» в результате активизации дегазации (одно- или многоимпульсного) наступает период относительного затухания (частичного или полного) дегазации и превалирования процессов перераспределения вещества в результате фильтрации влаги с поверхности, электрических воздействий в системе «атмосфера – геологическая среда», вибрационно-волновых процессов переноса и мобилизации энергии. На значительных глубинах существование таких вертикальных систем способствует локальному взаимодействию этажно залегающих гидродинамических и гидрогеохимических зон. В морской среде наиболее важны гидромеханические и геохимические воздействия в системе «морская вода – подземная вода – вмещающие породы» и, по-видимому, вибрационно-волновые процессы.

9. При полном затухании дегазации западины перекрываются более молодым осадочным материалом, который может впоследствии прорываться на новом этапе дегазации. На суше отмечаются процессы затягивания западин сносимым материалом.

10. Становится все более ясным, что широко встречающиеся на равнинных территориях системы «западина – подзападинный канал» – это сложные, длительно существующие микроструктуры, имеющие в большинстве случаев глубинное заложение и достаточно длительную (тысячи – миллионы лет) историю формирования на основе пульсирующих процессов взаимодействия глубинного вещества и энергии с приповерхностными системами.

11. Учитывая весьма широкое распространение этих систем на освоенных человеком территориях, риски, связанные с их активными фазами формирования и развития, вызывают необходимость тщательного и всестороннего изучения этих весьма специфических образований.

12. Поэтому на фоне возможного генетического разнообразия западин перво-степенной задачей является выявление и изучение распространенности и степени активности западин с глубинными корнями. Но выполнить эту важнейшую задачу можно лишь на основе комплекса современных методов изучения, включающих

сейсмические исследования, газовую съемку, специальное изучение эпигенетических изменений пород западин, выявление территориальных группировок западин, особенностей их конфигурации, обусловленной глубинными геодинамическими процессами и флюидной восходящей миграцией и др.

Список литературы / References

1. Анохин В.М. Характеристика глобальной сети планетарной трещиноватости / В.М. Анохин, И.А. Одесский // Геотектоника. – 2001. – № 5. – С. 3–9.

Anokhin V.M., Odesskiy I.A., 2001. Characterization of global network for planetary fracturing. Geotektonika, № 5, p. 3-9 (in Russian).

2. Богацкий В.В. Механизм образования структуры рудных полей / В.В. Богацкий. – М.: Недра, 1986. – 86 с.

Bogatskiy V.V., 1986. Mechanism of formation of the ore field structures. Moscow: Nedra, 86 p. (in Russian).

3. Богоявленский В.Ц. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Ч. 1. Ч. 2 / В.Ц. Богоявленский // Бурение и нефть. – 2014. – № 9. – С. 13–18; № 10. – С. 4–8.

Bogoyavlenskiy V.Ts., 2014. Threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic permafrost zone. Cones at Yamal and Taimyr. Part 1. Part 2. Burenie i neft', № 9, p. 13-18; № 10, p. 4-8 (in Russian).

4. Вартамян Г.С. ГГД мониторинг как ключевая технология системы краткосрочного оперативного прогноза сильных землетрясений / Г.С. Вартамян // Материалы конф. «Опыт комплексного изучения геофизических полей для целей сейсмопрогноза», 13–15 мая 1998 г. – М., 1998. – С. 10–13.

Vartanyan G.S., 1998. HGD monitoring as a key technology for short-term operative forecast of strong earthquakes. Proc. of Conference "Experience of complex studying the geophysical fields for seismographic forecasting", May 13-15, 1998. Moscow, p. 10-13 (in Russian).

5. Епиколопян Н.С. Сверхбыстрые химические реакции в твердых телах / Н.С. Епиколопян // Журн. физ. химии. – 1998. – № 9. – С. 2289–2298.

EpiKolopyan N.S., 1989. Super-fast chemical reactions in solid bodies. Zhurnal Fizicheskoy Himii, vol. 63, № 9, p. 2289-2298 (in Russian).

6. Ильченко В.Л. О вариантах плотности и анизотропии упругих свойств архейских пород в приповерхностном залегании (на примере Цен-

трально-Кольского мегаблока, Балтийский щит) / В.Л. Ильченко // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2000. – № 1. – С. 73–75.

Ilchenko V.L., 2000. On the variations of density and anisotropy of the elastic properties for the Archaean rocks in case of near-surface occurrence (on example of the Central Kola megablock, the Baltic Shield). Geoecologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya, № 1, p. 73-75 (in Russian).

7. Ларин В.Н. Водородная дегазация на Русской платформе, ее плюсы и минусы / В.Н. Ларин, Н.В. Ларин – 2008. – [Электронный ресурс]. <http://hydrogen-future.com/page-id-18.html>.

Larin V.N., Larin N.V., 2008. Hydrogen degassing in the Russian platform, its pros and cons. Available at: <http://hydrogen-future.com/page-id-18.html>.

8. Ларин В.Н. Кольцевые структуры, обусловленные глубинными потоками водорода // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь / В.Н. Ларин, Н.В. Ларин, А.В. Горбатиков // Материалы Всерос. конф. с международ. участием, посвященной 100-летию со дня рождения акад. П.Н. Кропоткина, 18–22 окт. 2010 г. – М.: ГЕОС, 2010. – 712 с.

Larin V.N., Larin N.V., Gorbaticov A.V., 2010. Ring structures caused by the deep f hydrogen fluxes. In: Earth's degassing: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and the life: Proc. of All-Russian and International Conference, devoted to the 100-anniversary of Acad. P.N. Kropotkin birth. October 18-22, 2010. Moscow: GEOS, 712 p. (in Russian).

9. Мартынова Г.И. Природа и закономерности размещения планетарной трещиноватости земной коры / Г.И. Мартынова // Геологическое строение СССР. Т. 5. – М.: Недра, 1969. – С. 178–188.

Martynova G.I., 1969. Nature and regularities of planetary fractures distribution in the Earth crust. In: Geologicheskie strukturi SSSR. Moscow: Nedra, vol. 5, p. 178-188 (in Russian).

10. *Наумов Г.Б.* Энергетика процессов рудообразования / Г.Б. Наумов // Гос. геол. музей им. В.И. Вернадского. Москва: РАН, 2007. – [Электронный ресурс]. <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/5311/03-Naumov.pdf?sequence=1>; http://geo.web.ru/conf/SGS_2007/pdf/naumov.pdf.

Naumov G.B., 2007. Ore formation energy. Vernadsky State Geol. Museum of RAS, Moscow. Available at: <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/5311/03-Naumov.pdf?sequence=1>; http://geo.web.ru/conf/SGS_2007/pdf/naumov.pdf.

11. *Нестеренко В.Ф.* Механизмы перераспределения и концентрации элементов при импульсном нагружении / В.Ф. Нестеренко, Б.М. Чиков // Сдвиговый метаморфизм и рудоконтролирующие парагенезы. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1992. – С. 36–37.

Nesterenko V.F., Chikov B.M., 1992. Mechanisms of redistribution and concentration of elements under impulse loading // In shear metamorphism and ore-controlling parageneses. Novosibirsk: Izdatelstvo OIGGM SO RAN, p. 36-37 (in Russian).

12. *Портнов А.М.* Опасные дыры Земли / А.М. Портнов // Природа. – 2014. – № 11. – С. 94–96.

Portnov A.M., 2014. Dangerous holes in Earth. *Priroda*, № 11, p. 94-96 (in Russian).

13. *Ротационные процессы в геологии и физике* / отв. ред. Е.Е. Милановский. – М.: Ком-книга, 2007. – 528 с.

Rotation processes in geology and physics, 2007. (Ed. E.E. Milanovsky). Moscow: Komkniga, 528 p. (in Russian).

14. *Рудаков В.П.* О роли геодвижений волновой структуры в активизации геодинамических процессов в асейсмических регионах (на примере геодинамических явлений Русской платформы) / В.П. Рудаков // Докл. РАН. – 1993. – Т. 332, № 4. – С. 509–511.

Rudakov V.P., 1993. About a role of geomovements of wave structure in activation of geodynamic processes in aseismic regions (on an example of the geodynamic phenomena of Russian platform). *Doklady RAN*, vol. 332, № 4, p. 509-511 (in Russian).

15. *Селюков Е.И.* Краткие очерки практической микрогеодинамики / Е.И. Селюков, Л.Т. Стигнева. – СПб.: Изд. дом «Питер», 2010. – 176 с.

Selyukov E.I., Stigneyeva L.T., 2010. Brief essays of practical micro-geodynamics. St. Petersburg: Izdatelskiy dom «Piter», 176 p. (in Russian).

16. *Собственные колебания Земли* / ред. В.Н. Жарков. – М.: Мир, 1964. – 315 с.

Natural oscillations of the Earth, 1964. (Ed. V.N. Zharkov). Moscow: Mir, 315 p. (in Russian).

17. *Тяпкин К.Ф.* Новая ротационная гипотеза структурообразования и ее геолого-математическое обоснование / К.Ф. Тяпкин, М.М. Довбнич. – Донецк: Ноулидж, 2009. – 342 с.

Tyapkin K.F., Dovbnich M.M., 2009. New rotational hypothesis of structure formation and its geological-mathematical substantiation. Donetsk, Noulidzh, 342 p. (in Russian).

18. *Учитель И.Л.* Основы неогеодинамики. Сети газопроводов как элемент деформационного мониторинга / И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, И.И. Гладких, Б.Б. Капочкин. – Одесса: Астропринт, 2000. – 144 с.

Uchitel I.L., Yaroshenko V.N., Gladkih I.I., Kapochkin B.B., 2000. Fundamentals of neo-geodynamics. Gas pipeline network as deformation monitoring element. Odessa: Astroprint, 144 p. (in Russian).

19. *Чиков Б.М.* Короткопериодические колебания в геологических процессах литосферы / Б.М. Чиков // Литосфера. – 2005. – № 2. – С. 3-20.

Chikov B.M., 2005. Short-period fluctuations in geological processes of the lithosphere. *Litosfera*, № 2, p. 3-20 (in Russian).

20. *Шаблинская Н.В.* Новые данные о глобальной сетке разломов на платформах / Н.В. Шаблинская // Докл. АН СССР. Сер. геол. – 1977. – Т. 237, № 5. – С. 1159–1169.

Shablinskaya N.B., 1977. New data on the global network of fractures on the platforms. *Doklady AN SSSR. Ser. Geol.*, vol. 237, № 5, p. 1159-1169 (in Russian).

21. *Шестопалов В.М.* Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции / В.М. Шестопалов, А.С. Богуславский, В.Н. Бублясь. – Киев: НИЦ РПИ НАН Украины, 2007. – 118 с.

Shestopalov V.M., Bohuslavsky A.S., Bubliasy V.N., 2007. Groundwater protectability and vulnerability assessment with account of fast migration zones. Kiev: Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine, 118 p. (in Russian).

22. *Шестопалов В.М.* О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И. Вернадского о «газовом дыхании» Земли. Ст. 1. Поверхностные и приповерхностные проявления аномалий дегазации / В.М. Шестопалов, А.Н. Макаренко // Геол. журн. – 2013. – № 3 (344). – С. 7-25.

Shestopalov V.M., Makarenko A.N., 2013. On same research results developing the idea of V.I. Vernadsky about the Earth's "gas brearthing". Paper 1. Surface and near-surface manifestations of anomaleus degassing. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (344), p. 7-25 (in Russian).

23. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость / С.С. Шульц // Планетарная трещиноватость. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. – С. 5-37
- Schultz S.S., 1973. Planetary fracturing. In: *Planetary fracturing*. – Leningrad: Izdatelstvo LGU, p. 5-37 (in Russian).
24. Bostrom R.C. Tectonic consequences of the Earth rotation / R.C. Bostrom. – Oxford University Press., 2000. – 266 p.
- Bostrom R.C., 2000. Tectonic consequences of the Earth rotation. Oxford University Press., 266 p. (in English).
25. Cathles L.M. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implication for assessment of seafloor hazards end gas sequestration / L.M. Cathles, Sub Zheng, Chen Duofu // *Marine and petroleum Geology*. – 2010. – Vol. 27, iss.1. – P. 82-91.
- Cathles L.M., Sub Zheng, Chen Duofu, 2010. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implication for assessment of seafloor hazards end gas sequestration. *Marine and petroleum Geology*, vol. 27, iss. 1, p. 82-91 (in English).
26. Hanken, N. Dannels en av „Slow-aut pipes“ basert pa studier av Plio-Pleistocene sedimenter pa Rhoclos (Abstract in Norwegian), Norwegian Geological Union, Vintermte / Hanken, N., Renholt, G., and Hovland, M. // *Conference Proceedings: Stavanger, Norway, Jan. 6-8, 1999*. – P. 52.
- Hanken, N., Renholt, G., and Hovland, M., 1999. Dannels en av „Slow-aut pipes“ basert pa studier av Plio-Pleistocene sedimenter pa Rhoclos (Abstract in Norwegian), Norwegian Geological Union, Vintermte. *Conference Proceedings: Stavanger, Norway, Jan. 6-8, p. 52* (in Norwegian).
27. Harrington, J.F. Gas transport properties of clays and mudrocks. In: Alpin, Fleet, A.I., and Macguaker, I.H.S. (eds.), *Muds and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties* / J.F. Harrington and S.T. Hersman // *Geological Society of London*. – 2010 – Spec. Publ. 158. – P.107-124.
- Harrington, J.F., and Hersman, S.T., 2010. Gas transport properties of clays and mudrocks. In: Alpin, Fleet, A.I., and Macguaker, I.H.S. (eds.), *Muds and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties. Geological Society of London, Spec. Publ. 158*, p. 107–124 (in English).
28. Hasiotis. A pockmark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14.7.93 seismic event / Hasiotis, Papatheodorou, G., Kastanos, N., and Ferention, G. // *Marine Geology*. – 1996. – Vol. 130. – P. 333-344.
- Hasiotis, Papatheodorou, G., Kastanos, N., and Ferention, G., 1996. A pockmark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14.7.93 seismic event. *Marine Geology*, vol. 130, p. 333-344 (in English).
29. Moody I.D. Wrench fault tectonics / I.D. Moody, M.I. Hill // *Geol. Soc. Amer.* – 1956. – Bull. 67. – P. 1207-1246.
- Moody I.D. and Hill M.I., 1956. Wrench fault tectonics. *Geol. Soc. Amer.*, bull. 67, p. 1207-1246 (in English).
30. Moss I.L. The spatial and Temporal distribution of pipe and pockmark formation PhD. Thesis / I.L. Moss. – Cardiff University, December 2010. – 314 p.
- Moss I.L., 2010. The spatial and Temporal distribution of pipe and pockmark formation PhD. Thesis. *Cardiff University*, December, 314 p. (in English).
31. Tohno, I., 1983. Liquefaction damage to the ground during the 1983 / I. Tohno, and Y. Shamoto // Nihonkai – Chubu (Japan Sea) earthquake in Aomori prefecture. Tohoku, Japan // *Natural Disaster Science*, 8. – P. 85-116.
- Tohno, I., and Shamoto. Y., Liquefaction damage to the ground during the 1983. Nihonkai – Chubu (Japan Sea) earthquake in Aomori prefecture. Tohoku, Japan. *Natural Disaster Science*, 8, p. 85-116 (in English).
32. Plaza-Ferola Andreia. Repeted fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles / Plaza-Ferola Andreia, Bunz Stefan, Mienert Jurgen // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – Vol. 305. – P. 297-308.
- Plaza-Ferola Andreia, Bunz Stefan, Mienert Jurgen, 2011. Repeted fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 305, p. 297-308 (in English).
33. Woolsey, T.C. Modelling of diatrema emplacement by fluidization / T.S. Woolsey, M.E. McCallum, and S.A. Suumm // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 1975. – № 9. – P. 29-42.
- Woolsey, T.S., McCallum, M.E., and Suumm, S.A., 1975. Modelling of diatrema emplacement by fluidization. *Physics and Chemistry of the Earth*, № 9, p. 29-42 (in English).

Статья поступила
02.02.2016