

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.332.5

Г.В. КУЛИКОВ

ДИНАМИКА ГИДРОГЕОДЕФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ НА ЭТАПАХ РАЗЛИЧНОЙ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Рассмотрены особенности структурного перестроения гидрогеодеформационного (ГГД) поля Земли на этапах различной сейсмотектонической активности. Определены пути дальнейшего повышения эффективности ГГД-мониторинга для оперативного слежения за изменением напряженного состояния земной коры и оценки сейсмической опасности.

ГГД-мониторинг, выполняемый организацией Министерства природных ресурсов РФ, основан на постоянном слежении за аномальными изменениями режима подземных вод в верхних водонапорных горизонтах — реакцией подземной гидросферы на развитие процессов подготовки и проявление землетрясений.

Реакция подземных вод на сейсмотектонические процессы относится к категории давно известных явлений. В то же время физическая сущность и механизм структурной перестройки ГГД-поля, природа которого заключается в пульсационном перераспределении флюидных составляющих литосферы, вызванном сменой напряжений в ее твердой части на этапах различной сейсмотектонической активности, еще слабо изучены. Аналитические решения, основанные на представлениях о природе этого явления, часто вступают в противоречие с фактическим материалом и не могут объяснить расхождений между расчетными данными и результатами натурных наблюдений.

Вместе с тем результаты многолетних наблюдений за режимом подземных вод в сейсмоопасных регионах и анализа структурной перестройки ГГД-поля позволили разработать методы оценки изменений напряженного состояния горных пород (сжатие—растяжение) и прогнозирования землетрясений. Время сильных землетрясений на основании наблюдений за аномальными изменениями гидродинамического режима подземных вод может прогнозироваться в краткосрочном режиме достаточно уверенно за 3—15 сут. до сейсмического события. *Проблематичным остается прогноз места сильного землетрясения.* В региональной динамике структурной перестройки ГГД-поля просматривается лишь некоторая предположительная ориента-

ция на регион, в котором может произойти землетрясение.

ГГД-поле представляется широким разнообразием короткоживущих (дни, месяцы), возникающих и разрушающих структур деформаций, отражающих происходящие изменения напряженного состояния недр. В спокойные, асейсмические, периоды ГГД-поле характеризуется хаотичным быстро сменяющимся распределением деформационных структур. При развитии процессов подготовки сильных землетрясений ГГД-поле реконструируется, начинают формироваться устойчивые в пространстве структуры сжатия—растяжения. После землетрясения, даже очень удаленного от региона, в котором размещена наблюдательная сеть, длительно существовавшие структуры сжатия—растяжения обычно разрушаются, если происшедшая разрядка сейсмической энергии проявилась и в наблюдаемом регионе. Асейсмические периоды и развивающиеся процессы подготовки сильных землетрясений отчетливо отражаются во времени на графиках $De(t)$ — относительного сжатия—растяжения: резким спадом или подъемом кривых $De(t)$; пересечением этих кривых, характеризующих разнонаправленное изменение напряженного состояния земной коры в пределах смежных районов.

Для прогнозирования места землетрясения, как показывают результаты ГГД-мониторинга, должна быть создана более информативная наблюдательная сеть (адекватная этой цели) и разработан комплекс новых показателей для оценки изменения напряженного состояния земной коры по особенностям структурной перестройки ГГД-поля. Изменение напряженного состояния земной коры является одним из основных критериев, указывающим на подготовку землетрясения. С напряженным состояни-

ем функционально связаны основные упруго-деформационные модули массивов горных пород.

ГГД-поле обладает, несомненно, обширной информацией о развивающихся сейсмотектонических процессах. Сведения, которые в настоящее время удается получить при анализе динамики его структурной перестройки, составляют из-за ряда нерешенных научно-методических вопросов и ограниченной информативности наблюдательной сети ГГД-мониторинга лишь часть этой информации.

Сеть наблюдательных пунктов дает возможность регистрировать только региональные изменения напряжений в земной коре, указывающие на вовлечение огромных массивов земной коры в процесс повышенного тектонического деформирования, сопровождающегося, как правило, серией крупных сейсмических событий, рассредоточенных в пространстве и сконцентрированных во времени.

Согласно теории И.П. Добровольского [6], перед сильным землетрясением литосфера находится в напряженном состоянии на довольно обширной территории, и чем выше магнитуда землетрясения, тем на большей площади проявляются аномальные свойства среды.

Методические принципы оценки структурных изменений ГГД-поля основаны на современных представлениях о преобладающем вертикальном движении подземных вод в глубоких горизонтах. Обусловлено оно энергетически более выгодным преодолением фильтрационного сопротивления вышележающих слабопроницаемых пород, по сравнению с латеральным движением в направлении возрастающего сопротивления по погружению водоносного горизонта. На основе сопоставления вертикальных и горизонтальных фильтрационных сопротивлений и градиентов напора (пластовых давлений) с учетом структурно-тектонических условий и гидрогеологического значения разрывной тектоники установлено, что дальность латеральной миграции подземных вод в глубоких горизонтах артезианских бассейнов не превышает нескольких десятков километров от областей инфильтрационного питания.

Гидрогеологическими наблюдениями при ведении ГГД-мониторинга выявлена существенная в региональном плане неоднородность поля давлений в водонапорных горизонтах. Масштаб неоднородности определяется особенностями геологического строения, гидрогеологических условий и сейсмической активностью территорий.

Роль элизионных процессов в формировании полей различных гидродинамических давлений представляется обычно очень незначительной. В.А. Всеволожский и В.И. Дюнин [3, 7] аргументируют это тем, что скорости перераспределения давлений в уплотняющихся осадках много больше скоростей приращения горного давления. Элизионными процессами, по их мнению, невозможно объяснить наличие сверхвысоких пластовых давлений и неравномерность их распределения в вертикальном разрезе.

Однако элизионные процессы связаны не только с медленно увеличивающейся литостатической

нагрузкой. Горные породы в земной коре находятся в напряженном состоянии под действием двух силовых полей — гравитационного и тектонического. Данные ГГД-мониторинга указывают, что аномальные изменения режима подземных вод напорных горизонтов происходят под влиянием именно геодинамических напряжений. Тектонические волны, сопровождающиеся сжатием или расширением горных пород, приводят к образованию полей с различными поровыми давлениями, созданию гидродинамических градиентов и миграции водных флюидов из зон сжатия в зоны растяжения. При развитии процессов дилатации горных пород (образование микротрещин, увеличение объема пустот) и фазовых переходах воды поровое давление понижается. Усиливается одновременно гидравлическая связь между водоносными горизонтами. Все это отражается в режиме подземных вод верхних водонапорных горизонтов и регистрируется структурной перестройкой ГГД-поля.

Очевидно, что реконструкции ГГД-поля могут наблюдаться лишь в том случае, если изменения тектонических напряжений и соответствующие деформации в массивах горных пород происходят значительно быстрее, чем релаксация образующихся аномалий гидродинамических давлений.

Очень важную роль в формировании аномально высоких гидродинамических давлений в глубинных зонах земной коры играют метаморфические процессы дегидратации пород. А.А. Карцевым [8] выделен эксфильтрационный тип движения водных растворов, включающий элизионный и термодегидратационный виды водообмена, при которых источником движения является внутренняя энергия Земли.

Известно, что основная часть поровых вод, находящаяся в осадочных породах, удаляется в результате их уплотнения при погружении на несколько тысяч метров [11]. В более глубоких горизонтах пористость и проницаемость осадочных пород становятся очень незначительными, давление водных флюидов приближается к литостатическому. В условиях дальнейшего погружения и уплотнения пород высвобождается почти вся поровая вода. Может сохраняться в незначительных количествах лишь та вода, которая адсорбируется на поверхности минеральных зерен в виде тончайшего слоя и прочно удерживается благодаря наличию ненасыщенных валентных связей. При уплотнении пород не утрачивается вода, которая входит в кристаллическую решетку минералов. Для ее удаления необходимы не только глубокое погружение горных пород, но и их прогрев.

Химические реакции метаморфического преобразования пород, направленные к достижению термодинамического равновесия в системе, сопровождаются генерацией значительного количества воды. Новообразованные минералы (при прогрессивном метаморфизме) являются более плотными и занимают соответственно меньший объем. Однако суммарный объем новообразованного минерала и выделившейся при этом воды, оказывается больше объема исходного минерала. Это неминуемо

приводит к формированию очень высокого давления водного флюида. В результате развития процессов тектонического сжатия давление водного флюида еще более возрастает, приводя к возникновению значительных дифференциальных напряжений в пределах локальных участков проявления метаморфических реакций и образованию трещин гидравлических разрывов. Такие зоны *гидрогенного разуплотнения пород* (трещины гидравлических разрывов), образованные в результате метаморфических реакций, выявлены при бурении Кольской сверхглубокой скважины [1].

При увеличении пластового давления и температуры в процессе роста упругих напряжений в породах повышается химическая агрессивность вод, их растворяющая способность, в результате создаются дополнительные трещины и поры, породы становятся менее прочными.

Последующие гидравлические прорывы высоконапорных водных флюидов из трещин гидравлических разрывов осуществляются по тектоническим ослабленным структурам, т. е. через существующие или вновь образованные разломы — каналы разгрузки. Зоны разломов, обладающие более высокой проницаемостью по сравнению с ненарушенными или менее нарушенными участками земной коры, обеспечивают разгрузку водных флюидов с наименьшими затратами энергии. Тектонические разломы как региональные дренирующие системы стягивают водные флюиды из трещин гидравлических разрывов и поровые воды, отжимающиеся из осадочных пород в процессе их уплотнения. Таким образом, основная миграция водных флюидов из глубинных зон земной коры контролируется тектоническими разломами. Трещинные зоны в земной коре, образующиеся в результате дегидратации горных пород, могут быть выявлены геофизическими методами исследований. В связи с этим представляется возможным получить достоверную информацию как о сформировавшихся зонах гидрогенного разуплотнения горных пород, так и об основных участках гидравлического прорыва глубинных водных флюидов, их путях миграции и разгрузки.

Влиянию водных флюидов на развитие сейсмо-тектонических процессов придается в последнее время все большее значение. Современные тектонические движения, как считают многие геофизики, обусловлены в значительной степени динамикой флюидов, обладающих достаточно большой подвижностью. О.Л. Кузнецов и Э.М. Симкин [10] считают, что вода, проникая в трещины и смачивая их поверхности, снижает истинный предел прочности вследствие эффекта Ребиндера. Поровое давление, распирая трещины изнутри, снижает эффективный предел прочности. При проникновении в зону очага водные флюиды создают так называемый триггерный эффект, т. е. провоцируют сейсмические подвижки. В рассмотренном этими учеными механизме периодичности землетрясений основными элементами являются процессы фильтрации флюидов и вязкой консолидации скелета горных пород, которые еще не исследованы. Как

отмечают О.Л. Кузнецов и Э.М. Симкин [10], многие прямые и косвенные данные свидетельствуют о том, что в геологических масштабах времени и на достаточно больших глубинах породы деформируются, как сильно вязкая жидкость. Подтверждение деформации горных пород в вязком режиме — почти повсеместное существование на глубинах около 4 км аномально высоких пластовых давлений, консолидация пород осадочного бассейна с необратимым сжатием скелета горных пород и направленная вверх миграция флюидов. Выполненные достаточно тонкие петрологические исследования свидетельствуют, что в глубоких ненарушенных слоях земной коры флюиды, покинув поровое пространство пород, обратно в него не возвращаются и двигаются преимущественно вверх. Этот механизм может действовать в различных геофизических ситуациях, сохраняя лишь ряд общих черт, и описываться некоторым классом сеймотектонических моделей.

В [5] предложен механизм образования сильных землетрясений: вода вступает в бурную экзотермическую химическую реакцию с «первородным» веществом, в результате которой прогревается эпицентральная часть будущего землетрясения. Эта реакция с участием воды, по мнению авторов [5], подобна реакциям возникновения элементов в земной коре. Ссылаясь на исследования Н.Н. Воллодичева, Б.М. Кужевского и др. [2], при проведении которых зарегистрированы потоки нейтронов, излучаемых из земной коры, полагают, что такие нейтроны могут образовываться в результате синтеза воды и «первородного» вещества в очаге будущего землетрясения.

И.Г. Киссин [9] также считает, что геодинамические процессы в земной коре развиваются при активном участии флюидов. Основные факторы воздействия — объемные и тепловые эффекты при метаморфизме, гранитизации, плавлении и других преобразованиях; снижение прочности пород. Происходящие изменения объема твердых и жидких продуктов метаморфической дегидратации могут приводить к развитию высоких касательных напряжений и формированию очагов землетрясений.

Взаимодействие флюидов с упруго деформируемым скелетом горных пород изучено в механике грунтов [4]. Важная роль флюидов в изменении напряженного состояния горных пород давно доказана (эффект Терцаги). Большое значение водным флюидам придается в дилатационной модели сейсмического очага.

Наиболее разработанными гипотезами, объясняющими механизм подготовки землетрясения, являются модели лавинонеустойчивого трещинообразования и дилатантно-диффузионная с наличием воды в очаговой зоне. Выделяют три стадии, в процессе которых происходят дилатансионное расширение среды, насыщение ее водой и, как следствие, катастрофический срыв.

Высвобождается упругая энергия в результате движения по разлому, обладающему пористой структурой и насыщенному флюидами. О.Л. Кузнецов и Э.М. Симкин [10] полагают, что *вода, про-*

никая из верхних водонасыщенных слоев в очаговую зону, провоцирует разрушение среды разлома. Экспериментальным доказательством перемещения флюида служит возникновение разности потенциалов между различными точками среды, наблюдаемое при распространении сейсмических волн.

На поступление воды из верхних горизонтов в очаговые зоны указывают и другие исследователи. Так, М.А. Гусейнов, Л.Н. Солодилов, И.Д. Ахундов [5] считают, что вода с поверхности континентов и из Мирового океана, проникая вглубь Земли, достигает аномалии первородного вещества, вступающего с водой в реакцию.

Инфильтрационное проникновение воды с поверхности на значительную глубину по тектоническим разломам трудно себе представить, даже учитывая возможность проявления термодинамических процессов водообмена. В земной коре на глубинах 15—20 км существование открытых пор или трещин становится невозможным. Породы полностью литифицированы, а наличие в них минерализованных трещин, различных вторичных изменений свидетельствует, что породы подвергались вторичной флюидизации за счет высоконапорных и высокоминерализованных водных растворов, поступающих из более глубоких зон земной коры. Поэтому наиболее вероятно, что вода в зону очага поступает из трещин гидравлических разрывов (зон гидрогенного разуплотнения пород), образованных при метаморфизме.

Таким образом, важный аспект в познании механизма упругой и пластической деформации горных пород — дальнейшее изучение условий формирования гидродинамических и гидрохимических полей, отражающих участие подземных вод в этом процессе. Установлена тесная взаимосвязь напряженного состояния массивов горных пород и протекающих в них разнообразных физико-химических и термодинамических процессов. Изменение любого физического или химического параметра в естественном режиме подземных вод — один из возможных эффектов, наблюдаемых при ведении ГГД-мониторинга. Все процессы, формирующие физико-химический состав и свойства подземных вод, имеют одну причину и общую физическую основу. Наиболее значительно (по многим гидродинамическим, гидрохимическим и гидротермическим показателям) режим подземных вод в верхних горизонтах перед и во время сейсмического события изменяется в пределах активных разломов, с которыми связано подавляющее большинство землетрясений. Поэтому можно полагать, что наблюдения за аномальными изменениями режима подземных вод в непосредственной близости от сейсмоактивных разломов могут выявить характерные особенности деформации горных пород в очаговой области, ее объем, протяженность и другие показатели. Физическое и химическое воздействие порово-трещинных вод на горные породы вызывает не только ослабление их прочности, развитие макро- и микротрещин, нарушающих сплошность массива, уменьшение трения при подвижках, но взаимодействие с породами приводит

и к изменению химического состава самих подземных вод. В условиях высоких напряжений увеличивается минерализация вод и содержание в них различных микроэлементов. Может повышаться количество растворенных в воде газов, в том числе и радиогенных, за счет расширения и открытия новых трещин. Данные наблюдений за изменением гидродинамического и гидрохимического режимов подземных вод уже использовались при прогнозе отдельных землетрясений. Поэтому наблюдательная сеть ГГД-мониторинга для прогноза времени и места сильного землетрясения кроме слежения за региональными изменениями напряженного состояния недр должна иметь пункты локальных наблюдений за гидродинамическим, гидрохимическим и гидротермическим режимами подземных вод непосредственно в сейсмоактивных зонах. Это даст возможность получить более полную информацию о процессах взаимодействия подземных вод с горными породами при их деформации на различных этапах сейсмической активности и о роли водных флюидов в развитии геодинамических процессов. ГГД-мониторинг по региональной сети и пунктам локальных наблюдений будет, несомненно, более информативным. Окажется возможным на основе анализа особенностей структурного перестроения ГГД-поля выйти на прогноз места сильных землетрясений.

Следует отметить, что до настоящего времени многие изменения в режиме подземных вод и структурные перестроения ГГД-поля в период развития сейсмотектонических процессов остаются слабо изученными и часто необъяснимыми. По данным локальных наблюдений за режимом подземных вод в пределах различных участков сейсмоопасных регионов, отличающихся особенностями геолого-тектонического строения, гидрогеологических условий и сейсмической активностью, реакция подземной гидросферы на геодинамические процессы проявляется по-разному. Так, гидродинамический режим подземных вод на Камчатке и Сахалине в асейсмический период, как и в других регионах, четко отражает вариации атмосферного давления и воздействие лунно-солнечного притяжения. Но, в отличие от других сейсмоопасных регионов, здесь за 3—5 сут. до сейсмического события самописцы регистрировали незначительное падение, а затем застывший на одной отметке уровень подземных вод. Такое поведение уровня перед землетрясением наблюдалось в восьми скважинах на островах Кунашир, Шикотан, Итуруп, Сахалин. По этому признаку предсказывалось землетрясение. Не оправдавшихся предсказаний оказалось 3 из 23, т. е. достоверность прогнозов составила 78 %. Также отмечено, что если после землетрясения не поднимался уровень, то следовало ожидать повторного землетрясения. Установлено, что характер гидродинамических предвестников землетрясений на Сахалине и Курилах сохраняется одним и тем же перед любым землетрясением: независимо от его места, глубины очага и силы.

В других регионах сейсмическая активизация отражается в гидродинамическом или гидрохими-

ческом режиме подземных вод иначе. Для более детальной оценки напряженного состояния земной коры, развития процессов подготовки землетрясения и прогноза места его проявления необходимы более информативные показатели (критерии оценки) структурного перестроения ГГД-поля.

Новые критерии оценки динамики ГГД-поля и методика прогноза места сильного землетрясения, могут быть разработаны на основе математического моделирования процессов, развивающихся в подземной гидросфере в различных сейсмических

ситуациях. Подземная гидросфера, отражающая развитие сейсмических процессов в земной коре, при моделировании должна рассматриваться как *открытая система*. Разработка методики численного моделирования системы в условиях упруго-пластической деформации горных пород и выявление на этой основе новых более четких показателей реакции подземной гидросферы на сейсмические процессы — первоочередная задача в дальнейшем повышении эффективности ГГД-мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Л.В., Вартамян Г.С., Куликов Г.В. Гидрогеологический очерк // Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984. С. 240—254.
2. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М. и др. Закономерности изменения интенсивности нейтронов от земной коры в сейсмоактивных районах во время новолуний и полнолуний // Бюлл. ВАК РФ. 1996. № 6. 25 с.
3. Всеволожский В.А., Дюнин В.И. О направлении миграции поровых вод в уплотняющихся осадках // Взаимодействие поверхностного и подземного стока. В. 1. М., 1973. С. 186—198.
4. Грунтоведение / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1983. 392 с.
5. Гусейнов М.А., Солодилов Л.Н., Ахундов И.Д. Механизм образования землетрясений и стратегия прогноза // Третьи геофизические чтения им. В.В. Федынского. М.: Центр ГЕОН, 2001. С. 146—148.
6. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ, 1991.
7. Дюнин В.И. Теоретические вопросы гидрогеологии глубоких горизонтов // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1986. Т. 61. В. 1. С. 81—92.
8. Карцев А.А. Стадийность литогенеза и гидрогеологические процессы // Изв. АН СССР. Сер. геолог. 1982. № 2. С. 107—112.
9. Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры как фактор формирования геофизических неоднородностей и развития геодинамических процессов. Тез. докл // Пятые геофизические чтения имени В.В. Федынского. М.: Центр ГЕОН, 2003. С. 22.
10. Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере. М.: Недра, 1990. 269 с.
11. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 437 с.

ВСЕГИНГЕО

Рецензент — В.М. Швец

Журнал «Известия вузов. Геология и разведка» публикует рекламные объявления. В качестве рекламодателей могут выступать предприятия, организации, фирмы, акционерные общества и отдельные граждане, рекламирующие печатные издания, различные изделия, разработки, технологии, имеющие отношение к геологии, разведке и горному делу.

Публикация рекламных объявлений платная. Стоимость рекламы устанавливается по договоренности. По желанию заказчика реклама может публиковаться несколько раз.

Контактные телефоны

Б.М. Ребрик 433-62-66 доб. 1149
О.С. Брюховецкий 433-64-55 т/ф