

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.834.556

В.О. ВОЛЕЙШО, Г.В. КУЛИКОВ

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ ГИДРОГЕОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Рассмотрены возможности оценки изменения напряженно-деформированного состояния земной коры по особенностям реакции гидродинамического режима подземных вод на вариации атмосферного давления и лунно-солнечные притяжения. Выявлены гидрогеодинамические показатели: асейсмической спокойной геодинамической обстановки; нарушения сбалансированности геодинамических напряжений в земной коре под воздействием главным образом тектонических напряжений (сжатия или растяжения) в период сейсмотектонической активизации; формирования критических тектонических напряжений, под воздействием которых могут развиваться упругие, пластические и разрывные деформации, сопровождающиеся сейсмическими процессами.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) геологической среды — ведущий фактор, определяющий структуру и динамику геофизических полей [19]. Гидродинамические давления водонапорных горизонтов, регистрируемые в режиме реального времени, являются высокоинформативными геофизическими характеристиками, позволяющими следить за изменениями НДС недр и развитием процессов подготовки сейсмических событий. На формирование режима подземных вод оказывают влияние экзогенные и эндогенные факторы различной природы, вызванные главным образом массо- (сезонные изменения условий питания, транзита и разгрузки подземных вод) или энергообменом (вариации атмосферного давления, лунно-солнечные приливы, геодинамические процессы).

При решении задач, вызванных оценкой НДС геологической среды, нами вводятся понятия «о геодинамическом режиме подземных вод, формирующегося только под воздействием геодинамических (тектонических) процессов в земной коре». Но, как показали результаты многолетнего ведения гидрогеодеформационного (ГГД) мониторинга, информативным для наблюдений за изменениями НДС недр является не только геодинамический режим подземных вод, но и составляющие гидрогеодинамического режима, обусловленные влиянием атмосферного давления и лунно-солнечных приливов — отливов. [2, 7, 8].

Изучению влияния приливных вариаций и атмосферного давления на гидрогеодинамический режим посвящен

ряд специальных исследований. [1, 2, 7, 8, 12, 14—16, 20—25].

Исследования отклика уровня подземных вод на изменения атмосферного давления и лунно-солнечные притяжения стали традиционными в сейсмологической гидрогеологии [4, 8, 20, 21].

При изучении изменчивости отклика подземной гидросферы на вариации атмосферного давления установлено, что выявленные различия определяются изменениями состояния и блоковой неоднородностью строения земной коры в районе расположения наблюдательной скважины [8, 14]. Следует отметить, что во многих исследованиях, посвященных изучению реакции подземных вод на изменения барометрического давления, не затронуты вопросы, связанные с изменчивостью такой реакции на различных стадиях сейсмотектонической активизации. Наблюдениями за гидродинамическим режимом установлено, что в период сейсмотектонической активизации и непосредственно перед землетрясениями, как правило, происходят резкие изменения в «отклике» уровня подземных вод на вариации атмосферного давления.

В асейсмические периоды, как показывает статистика многолетних наблюдений [8], уровни подземных вод в наблюдательных скважинах с открытым устьем и барометрическое давление изменяются в противофазе. В герметически закрытых скважинах, как показали исследования, проведенные в Таджикистане в 1976 г., изменения уровня подземных вод происходят синфазно с вариациями барометрического давления [7]. Синфазные «аномальные» из-

менения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах с открытым устьем могут отмечаться только в периоды сейсмотектонической активизации [8, 19, 20].

В 1981 г. сотрудниками ИФЗ РАН в скважине «Ким» (Ферганская долина) впервые обнаружено «аномальное» поведение уровня подземных вод, связанное с резким изменением знака коэффициента барометрической эффективности, что сопровождалось синфазным колебанием уровня подземных вод и атмосферного давления [12].

На основании анализа результатов ГГД-мониторинга по Северному Кавказу и Дальневосточному региону более чем за 20-летний период выявлен отрезок синфазных («аномальных») изменений уровня подземных вод и барометрического давления, которые наблюдались перед сильными и катастрофическими землетрясениями. Синфазные «аномальные» изменения проявлялись в течение нескольких месяцев в ряде наблюдательных скважин, находящихся в пределах различных структур на значительном удалении от очаговых зон [20]. Максимальные суточные изменения уровня подземных вод отмечались за 3—4 дня до землетрясения. В некоторых случаях изменения уровня подземных вод опережали подобные изменения атмосферного давления. Отмечено, что в ряде наблюдательных скважин перед землетрясением уровень подземных вод не реагировал на изменения атмосферного давления и лунно-солнечные притяжения [4, 7, 20]. Информативность гидродинамического предвестника землетрясения выражалась отчетливой «предсейсмической площадкой», когда уровень подземных вод не изменялся никакими внешними факторами [4, 7, 20].

Камчатским региональным центром мониторинга состояния недр в ежегодном отчете за 2005 г. приводятся данные об «аномальных» изменениях гидродинамического режима подземных вод в период подготовки землетрясений. На графиках гидродинамических параметров ГГД-поля наглядно отражается смена хода кривых в период подготовки сейсмического события. Так, в течение 10 дней (с 14 августа по 24 августа) до землетрясения наблюдались «аномальные» (синфазные) изменения уровня подземных вод и атмосферного давления. Также, за 15 дней до землетрясения (29.09.2005 г., магнитуда 4.2) по наблюдательному пункту №1303 и за 10 дней по наблюдательному пункту №1311 регистрировался синхронный и синфазный ход кривых уровня подземных вод и атмосферного давления.

Относительная стабилизация уровня подземных вод отмечалась по наблюдательному пункту № 1311, без реакции на изменения атмосферного давления лунно-солнечного притяжения с 14 ноября по 25 ноября, завершившаяся 27 ноября землетрясением в Кроноцком заливе.

Явления потери чувствительности подземных вод к изменениям атмосферного давления и лунно-солнечным приливным возмущениям, или периоды синфазных изменений в режиме подземных вод и вариациях атмосферного давления перед землетрясениями, представляют большой научный интерес и практическое значение. Очевидно, что такие события определяются эндогенными факторами. Только влиянием более мощного по силе воздействия на режим подземных вод тектонического фактора можно объяснить проявление в определенные периоды «аномальности» в гидродинамическом режиме подземных вод.

Механизм воздействия атмосферного давления и лунно-солнечных приливов на гидродинамический режим подземных вод на различных стадиях сейсмотектонической активизации проявляется следующим образом. Изменение атмосферного давления ($\Delta P_{\text{атм}}$) и гидродинамического ($\Delta P_{\text{гд}}$) давления в противофазе, т. е. в «нормальном» режиме, — прямой показатель сбалансированности геодинамических напряжений в земной коре в данный (асейсмический) период времени. Изменения $P_{\text{гд}}$ происходят в таких условиях в основном под воздействием $P_{\text{атм}}$. Влияние эндогенных факторов на гидродинамический режим подземных вод в этот период отсутствует. Увеличение или снижение гидродинамического давления в водоносном горизонте при изменении $P_{\text{атм}}$ происходит обычно относительно медленно, равномерно распределяясь по обширной площади, поэтому не вызывает изменения скорости фильтрационного потока, а приводят лишь к колебаниям уровня подземных вод. Установлено, что под действием вариации атмосферного давления ($P_{\text{атм}}$) значения гидродинамического давления ($P_{\text{гд}}$) в водонапорном горизонте и в скважине, вскрывшей этот горизонт, различаются. Изменение давления в скважине, согласно закону Паскаля, будет равно величине перепада барометрического давления ($\Delta P_{\text{атм}}$), а в водоносном горизонте на изменение гидродинамического давления будет воздействовать только часть перепада атмосферного давления ($n^{-1} \Delta P_{\text{атм}}$) [8]. Другая его часть воспринимается минеральным скелетом водовмещающих пород, изменяя их эффективное напряжение и деформацию. Поровое или гидродинамическое давление в водонапорном горизонте окажется меньше, чем гидродинамическое давление в скважине. Возникающий в результате этого градиент давления в системе скважина—водоносный горизонт вызовет фильтрацию жидкости из скважины в водоносный горизонт. Но такой локальный фильтрационный поток ограничен практически призабойной зоной скважины. Равновесие системы внешние—внутренние силы, нарушенное в водоносном горизонте вариациями $P_{\text{атм}}$ будет соблюдено при условии: $\Delta P_{\text{атм}} = \Delta P_{\text{инт}} + \Delta P_{\text{пор}}$ [8] (изменения: $\Delta P_{\text{инт}}$ — интергранулярного давления, $\Delta P_{\text{пор}}$ — порового давления после приложения дополнительной нагрузки).

Синфазное изменение $P_{\text{атм}}$ и $P_{\text{гд}}$ начинает проявляться только при нарушении сбалансированности геодинамических напряжений в земной коре под воздействием главным образом тектонических напряжений. Напряжения сжатия или растяжения в земной коре в период сейсмотектонической активизации и лунно-солнечных приливов оказывают определяющее воздействие на $P_{\text{гд}}$. Таким образом, синфазные изменения $P_{\text{атм}}$ и $P_{\text{гд}}$ — прямой показатель сейсмотектонической активизации. Установлено, что связь между лито- и ионосферой (ионизированной частью атмосферы) заметно усиливается при активизации сейсмического процесса [10]. Проявляется подобная связь, в частности, и в метеорологических эффектах. Поэтому в период тектонической активизации $P_{\text{атм}}$ изменяется под воздействием развивающихся эндогенных процессов в литосфере [10].

Тектонические силы и лунно-солнечные приливы непосредственно воздействуют на водоносный горизонт и оказывают влияние на $P_{\text{гд}}$. Если $P_{\text{атм}}$ в асейсмический период оказывает прямое влияние на $P_{\text{гд}}$ в наблюдательной скважине и в пласте, то под воздействием тектонических

напряжений давление водяного столба в скважине формируется в основном за счет геодинамического давления на водоносный горизонт.

Периоды, когда $P_{гд}$ не реагирует на изменения внешних факторов, связаны с формированием критических тектонических напряжений ($P_{гто}$), под воздействием которых могут развиваться упругие, пластические и разрывные деформации, сопровождающиеся сейсмическими процессами. Под компенсирующим воздействием разнонаправленных процессов повышения и снижения $P_{гд}$ может формироваться практически стабильный гидродинамический режим, и влияние экзогенных сил в этот период не проявляется. Величины воздействия экзогенных и эндогенных сил становятся сопоставимы. В результате образуется своеобразная «предсейсмическая площадка», которая сохраняется в течение нескольких дней. Непосредственно перед землетрясением в зависимости от развития и реализации тех или иных деформаций происходит резкий подъем или спад $P_{гд}$, а после землетрясения, как правило, восстанавливается отклик подземной гидросферы на вариации атмосферного давления и лунно-солнечного притяжения.

Влияние Луны состоит в ритмичном изменении веса тел, находящихся на поверхности Земли и в ее недрах. Колебания, которые возбуждаются в литосфере при лунно-солнечном гравитационном взаимодействии «расшатывают» земную кору, особенно в местах с наиболее неоднородным геологическим строением. Приливные вариации порового давления и его градиентов существенно зависят от механических свойств геологической среды: проницаемости, пористости, упругих свойств, вязкости жидкости, а также от рельефа местности [1, 9].

В скважинах, расположенных в пределах различных геологических структур, уровни подземных вод под воздействием лунно-солнечных приливов изменяются также на различную величину (от несколько миллиметров до нескольких сантиметров). В зонах тектонических разломов амплитуды земноприливных волн оказываются в отдельных случаях вдвое больше, чем теоретически рассчитанные. Это указывает на концентрацию напряжений в зонах тектонических разломов [11]. Высказываются предположения, что приливообразующие силы в особые фазы Луны создают в меж-блоковых структурах Земли «курковый» эффект. Под влиянием лунно-солнечных приливных сил возникают напряжения, с которыми могут быть связаны деформации (10^{-8}). Напряжения от прилива, равные примерно 30 ГПа при скорости изменения приливных напряжений (0,5 ГПа/ч), могут быть сравнимы со скоростью накопления напряжений при подготовке землетрясения [19]. А.С. Беляков обоснованно считает, что лунно-солнечные приливы играют, хотя и в значительно меньшей мере, такую же роль в активизации разрушительных процессов в земной коре, как и относительное движение плит [3].

Наблюдаемые изменения «ритма» приливных вариаций гидродинамических напоров в сейсмоактивных регионах, могут служить прогнозными признаками землетрясений [4, 15]. Установлено, что по данным мониторинга за приливными вариациями геодинамических давлений можно оценивать изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды [5, 6].

На основании длительных (с 1987 г.) наблюдений за изменениями геодинамического режима на Северном Кавказе, удалось изучить и выделить наиболее характерные нарушения реакции подземной гидросферы на приливные деформации, связанные с активизацией сейсмотектонических процессов. Они наглядно проявляются в изменениях геодинамического режима, которые отражаются в усилении приливо-отливного эффекта или его нивелировании, деформировании приливной волны геодинамического напора, часто осложненного мгновенными аномалиями. Нарушения нормальной реакции геодинамического режима на лунно-солнечные приливы, как правило, краткосрочные — от нескольких дней до нескольких часов, редко бывают длительными — до нескольких месяцев. Аномальные изменения заключались в потере за несколько месяцев до землетрясения чувствительности уровня подземных вод на лунно-солнечные приливы и атмосферное давление. Чувствительность возобновлялась за 3—4 ч до первого наиболее сильного сейсмического толчка или после землетрясения [4, 21].

На Сахалине наблюдались только краткосрочные периоды (от нескольких часов до 3—5 суток) «аномальной» реакции подземных вод на лунно-солнечные приливы.

Многие исследователи [5, 15, 19] отмечают, что неоднородности геологического строения земной коры, геологических условий, упругих свойств горных пород и некоторые другие особенности определяют мозаичность распределения как зон различного НДС, так и зон развития сейсмической активизации. Таким образом, периоды усиления приливного эффекта и его нивелирования, деформирования приливной волны геодинамического напора, осложненного мгновенными аномалиями, могут проявляться в тех или иных блоках земной коры различно и быть связаны с соответствующими изменениями состояния геологической среды в результате активизации тектонических процессов.

Под воздействием вертикальных приливообразующих сил происходят вертикальные смещения тектонических блоков, а под воздействием горизонтальных создаются условия поступательного движения. Вертикальная приливообразующая сила вычитается из силы земного притяжения и образует гравитационный максимум, что приводит к уменьшению силы тяжести и, как следствие, вызывает повышение уровней земли (на 0,36 м) и водной поверхности в морях и океанах. Так, на оз. Байкал выявлены регулярные вариации уровня водной поверхности с периодом 13,5 суток, связанные с лунным приливом. Лунно-солнечный прилив, оказывая сильное воздействие на геологическую среду, может даже создавать возможность выхода накопившейся энергии.

В.В. Ламакин, изучая периодичность байкальских землетрясений, установил, что все землетрясения «северо-западного» геологического ряда в Байкальском регионе приурочены к периодам крутых наклонов плоскости лунной орбиты относительно земного экватора, а землетрясения «юго-восточного» геологического ряда — к периодам низкого склонения Луны. Нутационные периоды колебаний наклона орбиты, равные 18,6 лет, соответствуют периодам байкальских землетрясений каждого из двух геологических рядов, а промежутки времени, разделяющие высокие и низкие склонения Луны, равные 9,3 года, — чередованию землетрясений одного геологического ряда с

другим. Представляется, что причина такой периодичности байкальских землетрясений, заключается в нутационном неравенстве приливов в земной коре [13]. И хотя напряжения, создаваемые приливами чрезвычайно малы, но там, где земная кора выведена из геодинамического равновесия, действуя продолжительное время, они могут способствовать возникновению разрывов и смещений в земной коре.

При движении Луны и Солнца частота встречаемости осей приливного сжатия и растяжения в различных телесных углах неодинакова [19]. Величина суточного неравенства приливов зависит от географической широты места. Кроме того, суточное неравенство изменяется периодически в одном и том же месте под влиянием колебаний наклонов лунной орбиты. Поэтому приливные волны то захватывают Байкальскую впадину, то почти не касаются ее.

Наблюдается также связь байкальских землетрясений с параллактическими неравенствами. Приливообразующая сила в ново- и полнолуния в 2,7 раз больше, чем в квадратурах. Сизигийные приливы еще более увеличиваются в период нахождения Луны в перигее. В это время ее приливообразующая сила на 40% больше, чем в апогее. В зависимости от фазы приливные силы могут оказывать иницилирующее или подавляющее воздействие на развитие геодинамического процесса.

Отмечено, что периодичность землетрясений в смежных регионах (Становое нагорье, Селенгинское Забайкалье, Северная Монголия, Восточные Саяны), имеющих иное структурно-геологическое строение, заметно отличается от периодичности байкальских землетрясений.

Возможное влияние всех этих факторов должно учитываться при интерпретации наблюдаемых реакций геодинамического режима подземных вод. Прежде всего необходимо учитывать, что геологические структуры обладают

различными степенями адекватности реакции на внешние воздействия.

Одним из основных и наиболее информативным индикатором (предвестником) землетрясения является «предсейсмическая площадка», когда уровень подземных вод не реагирует на изменения атмосферного давления и лунно-солнечные приливные воздействия.

Надежный показатель периода асейсмического состояния земной коры — гидродинамический режим, при котором уровни подземных вод в наблюдательных скважинах и барометрические давления изменяются в противофазе.

Показателем нарушения сбалансированности геодинамических напряжений в земной коре, существовавшей в асейсмический период, и развития тектонических напряжений являются синфазные изменения уровня подземных вод и атмосферного давления.

Указанные гидродинамические показатели изменения НДС недр — надежные критерии кратко- и среднесрочного прогнозов времени проявления сильных сейсмических событий. Для краткосрочного прогноза времени землетрясения необходимо, чтобы такие предвестники проявлялись одновременно в нескольких наблюдательных пунктах, не менее чем в трех.

Основой мониторинга состояния геодинамической обстановки и прогноза сильных землетрясений по изменению гидродинамического режима подземных вод и данным структурных перестроений ГГД-поля в сейсмоопасных регионах России является единая организационно-технологическая структура. Подобная структура ГГД-мониторинга, функционирующая, как целостный комплекс, должна действовать на общих научно-методических и технологических принципах.

Эффективность ГГД-мониторинга определяется возможностью получать, обрабатывать и анализировать исходную ГГД-информацию в режиме реального времени на основе функционирования автоматизированной информационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л. и др. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» // Изв. АН СССР. Серия «Физика Земли». 1989. № 11. С. 84–95.
2. Балашев Л.С., Куликов Г.В., Лебедев А.В. Изучение гидрогеологических предвестников землетрясений. // Совет. геология. 1982. № 9. С. 111–121.
3. Беляков А.С. Геоакустические исследования и прогноз землетрясений // Сейсмические приборы. В. 35. М., 2001. С. 3–18.
4. Вартанян Г.С., Волейшо В.О. Авторское свидетельство 1384043 СССР А01 9/00. Способ краткосрочного прогнозирования землетрясения // Бюлл. изоб. 1988. № 11. С. 81.
5. Вартанян Г.С., Волейшо В.О., Попов Е.А. Авторское свидетельство № 1303957 СССР, А1 01 9/00. Способ оценки пригодности гидрогеологического или геофизического объекта наблюдений для изучения геодинамических процессов // Бюлл. изоб. 1987. № 14. С. 122.
6. Вартанян Г.С., Волейшо В.О., Башмаков В.И. Гидрогеологическая реакция водоносного горизонта на изменение напряженно-состояния // Совет. геология. 1987. № 7, С. 54–58.
7. Волейшо В.О. О механизме взаимосвязи подземных вод с атмосферным давлением // Тез. всес. научно-тех. семинара «Методика и организация наблюдений за режимом подземных вод для прогноза землетрясений». М.: ВСЕГИНГЕО, 1983. С. 53.
8. Волейшо В.О. Гидрогеодинамическая реакция подземных вод на проявление внешних природных сил — атмосферного давления, океанических и земных приливов. М.: Изд-во ВИЭМС, 1984. 57 с.
9. Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. Мониторинг деформационных процессов посредством наблюдения вертикальной компоненты электрического тока // Очерки геофизических исследований. К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 250–256.
10. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 2. С. 95–108.
11. Кармалева Р.М., Боярский Э.А. Вариации величины амплитуды земноприливной волны M_2 в связи с активизацией карста // Седьмые геофизические чтения им. В.В. Федьнского. Тез. докл. М.: Центр ГЕОН им. В.В. Федьнского, 2005. С. 55–56.
12. Киссин И.Г., Барабанов В.Л., Гриневский А.О. и др. Первые результаты изучения гидрогеодинамических предвестников землетрясений в западной части Ферганской долины // Тез. всесоюз. научно-тех. семинара, М.: ВСЕГИНГЕО, 1983. С. 34.
13. Ламакин В.В. Периодичность Байкальских землетрясений // Докл. АН СССР. 1966. Т. 170. № 2. С. 410–413.
14. Любушкин А.А. (мл.), Малугин В.А. Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. 1993. № 12. С. 74–80.
15. Любушкин А.А., Малугин В.А., Казанцева О.С. Мониторинг приливных вариаций уровня подземных вод в группе водоносных горизонтов // Физика Земли. 1997. № 4. С. 52–64.
16. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
17. Мороз Ю.Ф., Мандельбаум М.М., Мороз Т.А. Аномальные эффекты в геофизических полях в связи с землетрясениями в Байкальской рифтовой зоне // Шестые геофизические чтения им. В.В. Федьнского. Тез. докл. М.: Центр ГЕОН им. В.В. Федьнского, 2004. С. 26.

18. Морозов В.А. Трехаспектный краткосрочный прогноз сильных ($M_w > 6,7$) катастрофических тектонических землетрясений. Геофизика XXI столетия: 2002 год // Сб. трудов четвертых геофизических чтений им. В.В. Федынского, М.: Научный мир, 2003. С. 294–301.
19. Николеев В.А. Метод реконструкции напряженного состояния литосферы на основе связи приливных напряжений и сейсмичности // Докл. РАН. 1997. Т. 354. № 3. С. 357–360.
20. Пруцкая Л.Д. Уникальные связи между атмосферными и геодинамическими процессами, обнаруженные в сейсмически активные периоды // Шестые геофизические чтения им. В.В. Федынского. Тез. докл. М.: Центр ГЕОН им. В.В. Федынского, 2004. С. 31–32.
21. Пруцкая Л.Д., Круткин О.Н. Земноприливные колебания уровня подземных вод и их изменения при подготовке землетрясений на Северном Кавказе // Шестые геофизические чтения им. В.В. Федынского. Тез. докл. М.: Центр ГЕОН им. В.В. Федынского, 2004. С. 74.
22. Родкин М.В. Изменчивость характера сейсмичности с глубиной: новые эмпирические соотношения и интерпретация // Седьмые геофизические чтения им. В.В. Федынского, Тез. докл. М.: Центр ГЕОН им. В.В. Федынского, 2005. С. 32.
23. Bredeh J.D. Response of well-aquifer system to earth tides // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. N 12. P. 3075–3087.
24. Igashii G., Wakita H. Tidal response and earthquake-related changes in the water level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. N 83. P. 4269–4278.
25. Rojstaczer S., Agnew D.C. The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 12403–12411.

УФГУ ВСЕГИНГЕО
Рецензент — В.М. Швец