GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2011 VOLUME 2 ISSUE 2 PAGES 194–207 ISSN 2078-502X

EARTHQUAKE PREDICTION BASED ON THE HYDRO-GEO-DEFORMATION FIELD MONITORING DATA

G. V. Kulikov, A. A. Ryzhov

All-Russian Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology,
142452, Zeleny Village, Noginsk District, Moscow Region, Russia

Abstract: The paper discusses further ways to improve the geodynamic informativity of the hydro-geo-deformation field (HGD field) monitoring. New methods for efficient assessment of the stress-strain state of the geological environment and seismic hazard are proposed. There are described the methods of monitoring data processing, distinguishing of HGD cycles, and construction of «forecasting» contours along extremums of these cycles. It is revealed that responses of the HGD field to development of planetary-scale endogenic geodynamic processes of earthquake preparation (with M>7) are simultaneously manifested in all seismically active regions of Russia which are remote from each other. Such responses occur from one to three months prior to such seismic events. The mechanism of this phenomenon can be disputed. The authors support the «planetary pulsation» concept which is up for the most recent debates. As evidenced by the HGD field monitoring data, strong earthquakes are a consequence of this phenomenon.

Key words: field of hydro-geo-deformations (HGD), seismic hazard, earthquake, prediction of seismic hazard, stress field.

Recommended by E.V. Sklyarov 19 May 2011

Citation: *Kulikov G.V., Ryzhov A.A.* Earthquake prediction based on the hydro-geo-deformation field monitoring data // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2. № 2. P. 194–207.

ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА ГИДРОГЕОДЕФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ

Г. В. Куликов, А. А. Рыжов

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии,
142452, п. Зеленый, Ногинский район, Московская область, Россия

Аннотация: Рассмотрены пути дальнейшего повышения геодинамической информативности мониторинга гидрогеодеформационного (ГГД) поля, разработаны новые методы оперативной оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды и сейсмической опасности. В статье изложены способы обработки данных мониторинга, выделения ГГД циклов и проведения «прогнозных» линий по экстремумам этих циклов. Обнаружена одновременная реакция ГГД поля во всех сейсмоактивных регионах России, значительно удаленных друг от друга, на развитие планетарных эндогенных геодинамических процессов подготовки сильных землетрясений (магнитудой более 7) за 1–3 месяца до их проявления. Механизм этого обнаруженного явления вызывает дискуссии. Авторы в этом вопросе склонны придерживаться обсуждаемой в последнее время гипотезы «планетарной пульсации». Следствие такого явления, как показывают результаты мониторинга ГГД поля, – сильные землетрясения.

Ключевые слова: гидрогеодеформационное (ГГД) поле, сейсмическая опасность, землетрясение, прогноз сейсмической опасности, поле напряжений.

1. Введение

Результаты многолетнего мониторинга гидрогеодеформационного поля и выполненного нами анализа показали, что подземная гидросфера обладает высокой чувствительностью к проявлению геодинамических процессов в земной коре. Установлено, что уровень подземных вод, при непрерывных наблюдениях за гидрогеодинамическим режимом водонапорных горизонтов, является высокочувствительным инструментом оценки изменений напряженного состояния геологической среды.

Понятие о ГГД поле приводится в работе [*Вартанян, Куликов, 1982*] и в методических указаниях по ведению ГГД мониторинга [*Методические указания…, 2000*]. ГГД поле содержит обширную информацию о геодинамических процессах в земной коре на различных стадиях сейсмотектонической активизации и, главное, в период подготовки землетрясения.

Анализ условий формирования и эволюции ГГД поля позволил принципиально по-новому понять процессы, протекающие в подземной гидросфере. Вся информация о ГГД поле рассматривается в некотором временном аспекте, то есть как переменный параметр, в значительной мере являющийся функцией напряженно-деформированного состояния недр. Гидрогеологическими наблюдениями выявлены существенные различия в динамике структурной перестройки ГГД поля на стадии подготовки землетрясения в регионах с разным геодинамическим режимом (коллизионным на Северном Кавказе, рифтовым в Байкальском регионе, субдукционным на Камчатке и Курильских островах и др.). Масштаб этих различий определяется особенностями геологического строения, гидрогеологических условий и геотектонической активностью территорий.

Многолетние наблюдения за гидродинамическим режимом подземных вод сейсмоактивных районов показали, что ГГД поле отражает реальное во времени и пространстве перераспределение давлений в водонапорных горизонтах под действием смены геодинамических напряжений в земной коре и представляет возможность оперативного слежения за изменениями геодинамической обстановки как в региональном плане, так и в пределах отдельных геологических структур.

Мониторинг ГГД поля обеспечивается:

- наличием региональной наблюдательной сети, адекватной поставленным целям;
- достоверностью первичной геодинамической информации по измеряемым параметрам ГГД поля в наблюдательных пунктах;
- оперативной, с помощью средств телеметрии (с использованием мобильной и спутниковой связи), передачей информационных потоков с наблюдательных пунктов в центры их обработки и анализа;
- автоматизированной обработкой гидрогеодинамической информации, компьютерным построением аналитической картографической основы с использованием ГИС-технологий для оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды и сейсмической опасности;
- комплексным анализом результатов мониторинга ГГД поля и геофизических полей, а также метеорологической и аэрокосмической информации.

Несмотря на то, что ГГД поле содержит обширную геодинамическую информацию, практическое ее использование для оперативной оценки происходящих изменений геодинамических напряжений в земной коре оставалось ограниченным. До последнего времени использовалась лишь часть геодинамической информации ГГД поля. Значительная информация из-за отсутствия разработанных методов ее геодинамической интерпретации оставалась недоступной.

Для более полного использования геодинамической информации ГГД мониторинга, более достоверной и оперативной оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды разработаны методы построения аналитических карт и графиков по энергетическим параметрам ГГД поля [*Куликов и др., 2010*].

Разработанные методы в значительной мере повысили геодинамическую информативность мониторинга ГГД поля. Дальнейшее совершенствование методики оперативной оценки геодинамической обстановки и сейсмической опасности, как показали результаты наших исследований, может быть успешно осуществлено на основе анализа данных мониторинга ГГД поля с привлечением универсальных методов теории катастроф при исследовании скачкообразных изменений напряжений в земной коре. В статье использованы основные положения этой теории – понятия аттрактора, точек бифуркации и способы анализа динамических систем [*Арнольд, 2009*].

2. Методика исследований

Методика включает:

1) оценку чувствительности уровня подземных вод (УПВ) к деформациям пород и соответствующим им напряжениям на основе анализа реакции подземных вод на изменение гравитационного поля Земли под воздействием Луны и Солнца;

2) анализ изменения фазового состояния уровня подземных вод (H) и атмосферного давления (P) по каждой наблюдательной скважине региональной сети ГГД мониторинга сейсмоактивного региона с целью оценки состояния геодинамической обстановки в каждом структурном блоке в режиме реального времени;

3) обработку данных мониторинга ГГД поля, позволяющую оценить время наступления сейсмически опасного события, путем выделения с помощью высокочастотных фильтров значений УПВ, содержащих закономерные гидрогеодинамические циклы;

4) построение линий (аттракторов) по экстремумам гидродинамических циклов для определения времени

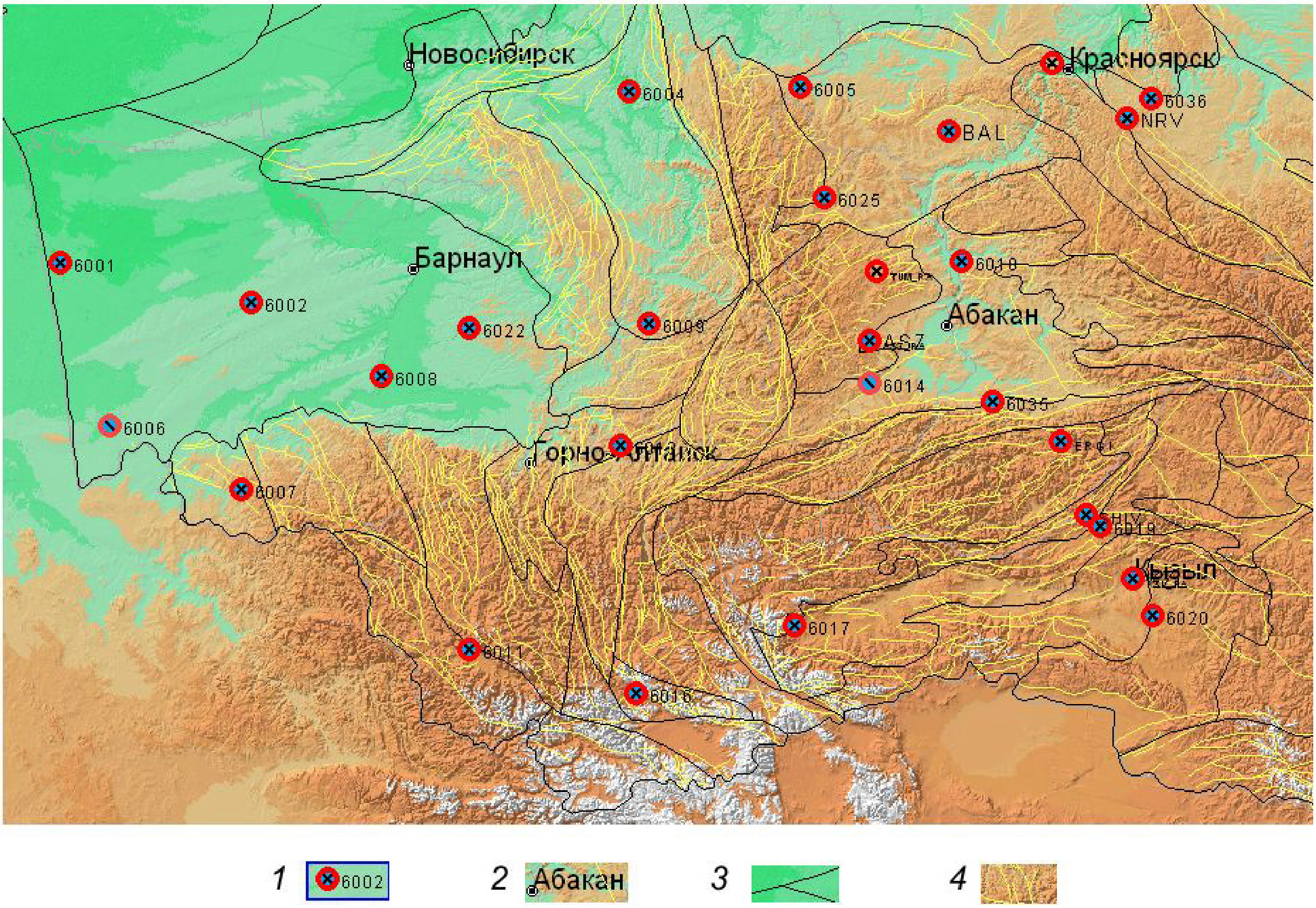

Рис. 1. Расположение наблюдательных пунктов ГГД мониторинга в Алтае-Саянском регионе. *1* – наблюдательный пункт и его номер; *2* – населенный пункт; *3* – границы тектонических структур; *4* – разрывные нарушения.

Fig. 1. Locations of observation points for HGD monitoring in the Altai-Sayan region. *1* – observation point and its number; *2* – settlement; *3* – boundaries of tectonic structure; *4* – faults.

проявления ожидаемого землетрясения;

5) построение карт высокочастотной части ГГД поля, характеризующих геодинамическую обстановку в режиме реального времени.

Мониторинг ГГД поля для целей оперативной оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды выполняется в наиболее сейсмоопасных регионах России.

Для этого создана региональная сеть наблюдательных пунктов, оборудованных автоматизированными средствами измерений и передачи данных по сотовой и космической связи в центр их обработки и анализа. Для примера на рис. 1 приведена схема размещения наблюдательных пунктов в Алтае-Саянском регионе, совмещенная с картой тектонического районирования.

Все основные структурные элементы этой области охвачены, как видно, пунктами мониторинга ГГД поля и геофизическими пунктами (сейсмические станции, станции слежения за естественным электрическим полем Земли на Тывинском полигоне). Такая же наблюдательная сеть ГГД мониторинга создана на Северном Кавказе (28 наблюдательных пунктов), в Байкальском регионе (26 наблюдательных пунктов), на Дальнем Востоке (17 пунктов), на Камчатке, Сахалине и Курильских островах (14 пунктов).

Таким образом, все наиболее сейсмоопасные регионы России охвачены мониторингом ГГД поля, что дает возможность, во-первых, фиксировать изменения напряженно-деформированного состояния земной коры в пределах этих регионов, а во-вторых, наблюдать за развитием глобальных геодинамических процессов, приводящих к катастрофическим событиям, таким, как Суматранское (12.09.2007 г., *M*=8.5), Чилийское (27.02.2010 г.; *M*=8.8), Японское (11.03.2011 г., *M*=9.0) и другие сильные землетрясения.

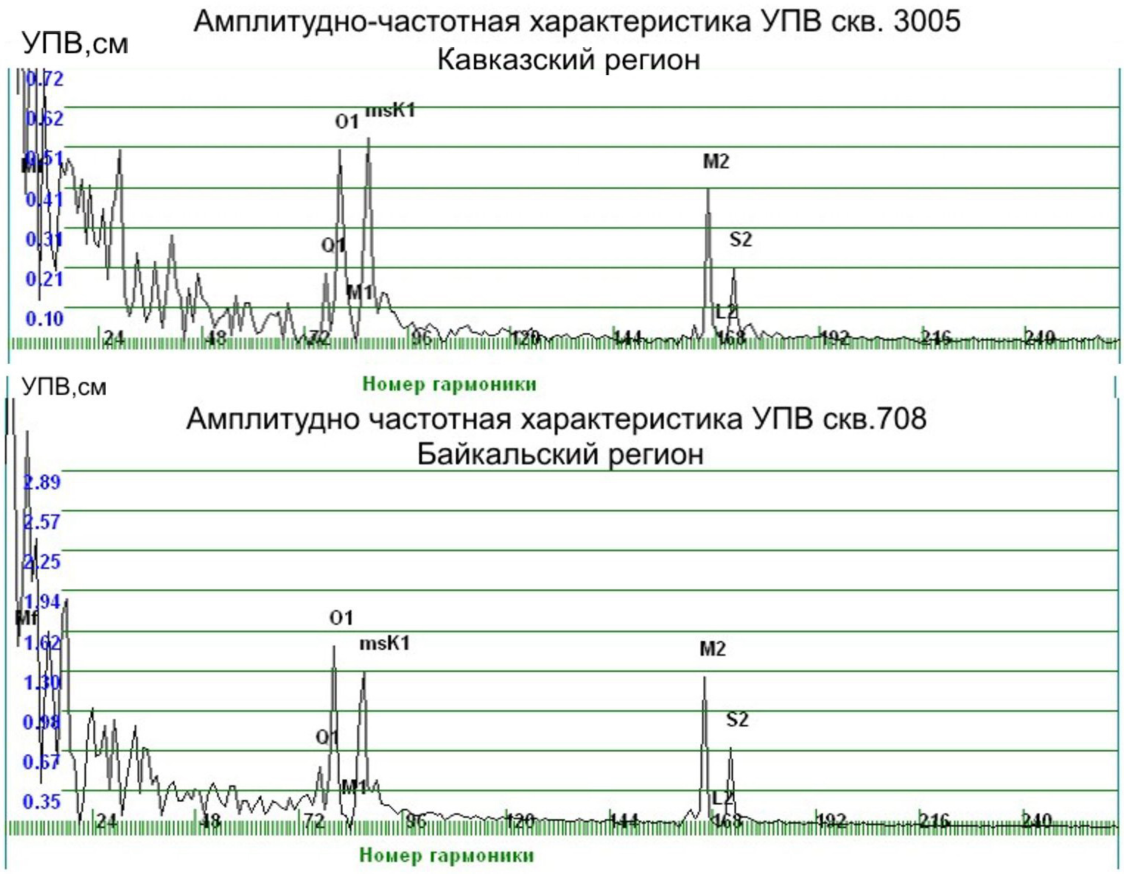

Рис. 2. Чувствительность уровня подземных вод к гравитационному полю Луны и Солнца.

Fig. 2. Sensitivity of the underground water level to the gravity field of the Moon and the Sun.

3. Результаты исследований

3.1. Оценка чувствительности уровня подземных вод

Деформация порово-трещинного пространства отдельных блоков возникает в результате действия внешних и внутренних сил. Внешними силами, изменяющими объем порово-трещинного пространства, являются силы, связанные с гравитационным полем Луны и Солнца, а также с вариациями атмосферного давления на земную поверхность и непосредственно на столб воды в скважине. Внутренними силами, изменяющими объем порового пространства и, соответственно, уровень подземных вод, являются геодинамические силы, обусловленные взаимодействием структурных блоков земной коры. На рис. 2 показаны типичные амплитудно-частотные характеристики уровня подземных вод в различных регионах Российской Федерации, отражающие высокую чувствительность подземных вод к изменению гравитационного поля во времени под действием Луны и Солнца. На рисунке видно, что как в Кавказском, так и в Байкальском регионе имеются однотипные волны – суточные O1, msk K1, Q1 и полусуточные M2, S2. Аналогичные волны наблюдаются в спектре изменяющегося во времени гравитационного поля, создаваемого на поверхности Земли Луной и Солнцем. Следует отметить, что УПВ является достаточно тонким инструментом, не уступающим по своей чувствительности современным гравиметрам.

Таким образом, уровень подземных вод способен регистрировать инфранизкочастотные упругие волны смещения. Регистрация волн смещения (деформаций) сейсмоприемниками представляет большую проблему, так как их передаточная характеристика существенно ограничена в нижней части частотного диапазона. Практически сейсмоприемник не способен регистрировать смещение почвы с частотой меньше 0.01 Гц. В то же время УПВ позволяет осуществить регистрацию упругих волн смещения в диапазоне меньше 0.01 Гц.

Из этого следует, что датчик уровня подземных вод способен регистрировать волны, связанные с деформацией пород.

Уровень подземных вод чувствителен также к изменениям атмосферного давления и к напряжениям, возникающим в горных породах при взаимодействии структурных блоков.

Уровень подземных вод (H) и атмосферное давление (P) образуют фазовое пространство, характеризующее состояние геодинамической системы. Пример двумерного фазового пространства H-P приведен на рис. 3. Как геологическая среда, так и ГГД поле являются динамическими системами, непрерывно изменяющимися во времени и пространстве. На рисунке показаны различные состояния ГГД поля, которые характеризуют квазиустойчивое (рис. 3, *А*) и неустойчивое (рис. 3, *Б*) состояние структурных блоков этой системы в районе скважины 1601. При квазиустойчивом состоянии структурные блоки не подвержены активным деформационным процессам, а при неустойчивом состоянии происходит активное взаимодействие блоков, приводящее к деформациям, которые могут завершаться землетрясениями. Фактически графики изменения УПВ в наблюдательной скважине 1601 и атмосферного давления (АД) в окрестностях скважины характеризуют взаимоотношение двух параметров геодинамической системы. Показанная корреляционная зависимость УПВ от АД определяет барометрический коэффициент (отношение УПВ/АД), а свободный член отражает влияние внутренних и внешних факторов, не связанных с атмосферным давлением. Разница между этими двумя состояниями состоит в том, что в Байкальском регионе для временного интервала, соответствующего рис. 3, *А*, зарегистрировано всего шесть землетрясений, наиболее сильное из которых имело магнитуду 4.1, а для состояния, отраженного на рис. 3, *Б*, зарегистрировано 11 землетрясений, из них одно с магнитудой 5.9, произошедшее в окрестностях скважины 1601. Энергия шести землетрясений со средней магнитудой 4 многократно ниже одного землетрясения с магнитудой 5.9. Это означает, что изучение поведения системы УПВ-АД дает возможность оценить геодинамическую активность блоков в районе исследования и тем самым оценить степень сейсмической опасности на данный момент времени.

Фактически на рис. 3 показаны фазовые диаграммы и графики, отражающие процессы взаимодействия различных блоков в земной коре. Это взаимодействие блоков различных размеров проявляется в изменении их напряженного состояния и, соответственно, появлении у геологической системы новых свойств в виде скачкообразных изменений траектории уровня и атмосферного давления на рис. 3, *Б*. Эти скачкообразные изменения есть ответ геологической среды на изменение внешних и внутренних условий. На рис. 3, *А*, фазовая траектория H–P характеризуется тем, что она хорошо аппроксимируется линейным трендом, определяемым формулой:

$$H=-0.2706 \cdot P-13.72,$$

где H – отклонение уровня подземных вод от среднемноголетнего значения, см; P – отклонение атмосферного давления от среднемноголетнего значения, кПа. Теснота связи H–P характеризуется эмпирическим коэффициентом корреляции, равным в данном случае 0.991. Фазовая траектория H–P в квазиустойчивом случае зависит только от изменения внешней силы, создаваемой атмосферным давлением.

При изменении внутренней силы, связанной с взаимодействием блоков, в них изменяется напряженное состояние, соответственно изменится пластовое давление по отношению к первоначальному. В результате действия внутренних сил фазовая траектория H–P постепенно займет новое положение, что и наблюдается на рис. 3, *Б*. Количество переходов траектории H–P и степень отклонения реальных траекторий от линейного тренда характеризует активность внутренних сил. Формально активность можно выразить через параметры линейного тренда – угол его наклона (в данном случае это барометрический коэффициент) и свободный член, а также коэффициент корреляции, характеризующий степень отклонения гидрогеодинамической системы от равновесного положения.

Для неустойчивого состояния системы (рис. 3, *Б*) тренд определяется формулой: $H=0.2422P+1.227$ при более низком коэффициенте корреляции, равном 0.204. При обработке данных ГГД поля, наблюдаемого в скважинах различных регионов Российской Федерации, было замечено, что коэффициент корреляции и барометрический коэффициент имеют положительные значения, если блоки, окружающие скважину, сейсмически активны. Таким образом, анализируя изменение фазового состояния H–P на каждой скважине данного региона, можно оценивать состояние геодинамической обстановки в режиме реального времени.

3.2. Выделение гидрогеодинамических циклов и построение аттракторов

В связи с тем, что ГГД поле имеет повсеместное распространение и содержит обширную оперативную информацию о геодинамическом состоянии геологической среды, были разработаны различные способы обработки данных наблюдений за этим полем, позволяющие оценить время наступления сейсмически опасного события. Для оценки времени наступления землетрясения данные, характеризующие изменение уровня подземных вод, предварительно обрабатывались. При обработке вычитался среднемноголетний уровень, затем с помощью полосового фильтра из рядов наблюдений выделялась высокочастотная компонента уровня подземных вод, не имеющая сезонных изменений. После такой обработки получались ряды, содержащие колебания высокочастотного уровня с периодом от 2 до 10 дней.

Графики режима подземных вод, построенные по данным мониторинга ГГД поля и обработанные по указанной методике, показаны на рис. 4, на котором видно, что отфильтрованные значения УПВ содержат

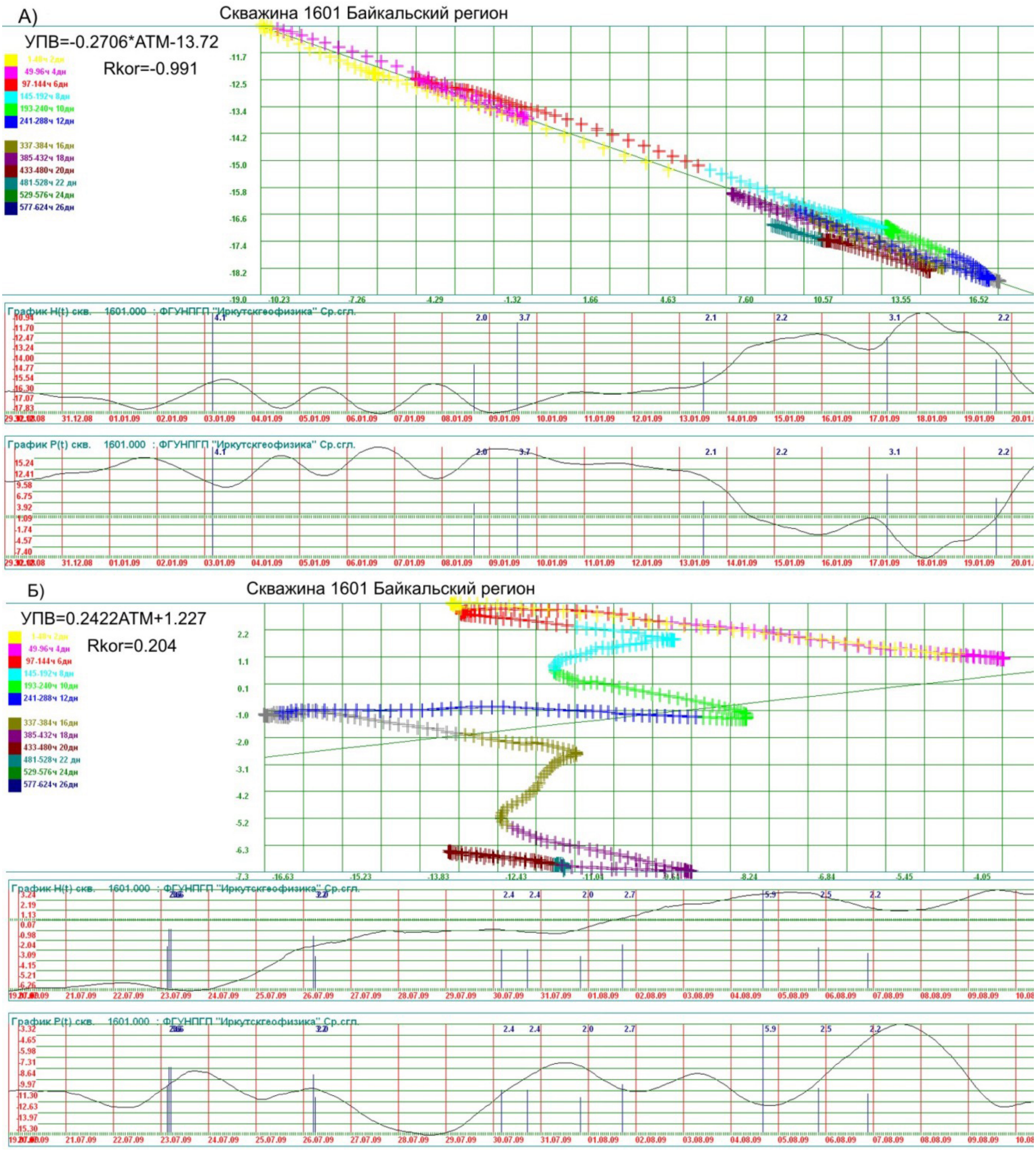

Рис. 3. Двумерное фазовое пространство УПВ-АД в периоды устойчивого (*А*) и неустойчивого (*Б*) состояния геодинамической системы в районе скважины 1601. Внизу под фазовой характеристикой показаны графики УПВ, атмосферного давления и магнитуды землетрясений в Байкальском регионе за периоды с 20 декабря 2008 г. по 20 января 2009 г. (*А*) и с 20 июня 2009 г. по 10 августа 2010 г. (*Б*).

Fig. 3. 2D phase medium of UWL-AP during the periods of the stable (*A*) and unstable (*Б*) state of the geodynamic system in the vicinity of Well 1601. Below the phase data, the UWL, atmospheric pressure and earthquake magnitudes curves are given for the Baikal region for the period from 20 December 2008 through 20 January 2009 (*A*), and from 20 June 2009 through 10 August 2010 (*Б*).

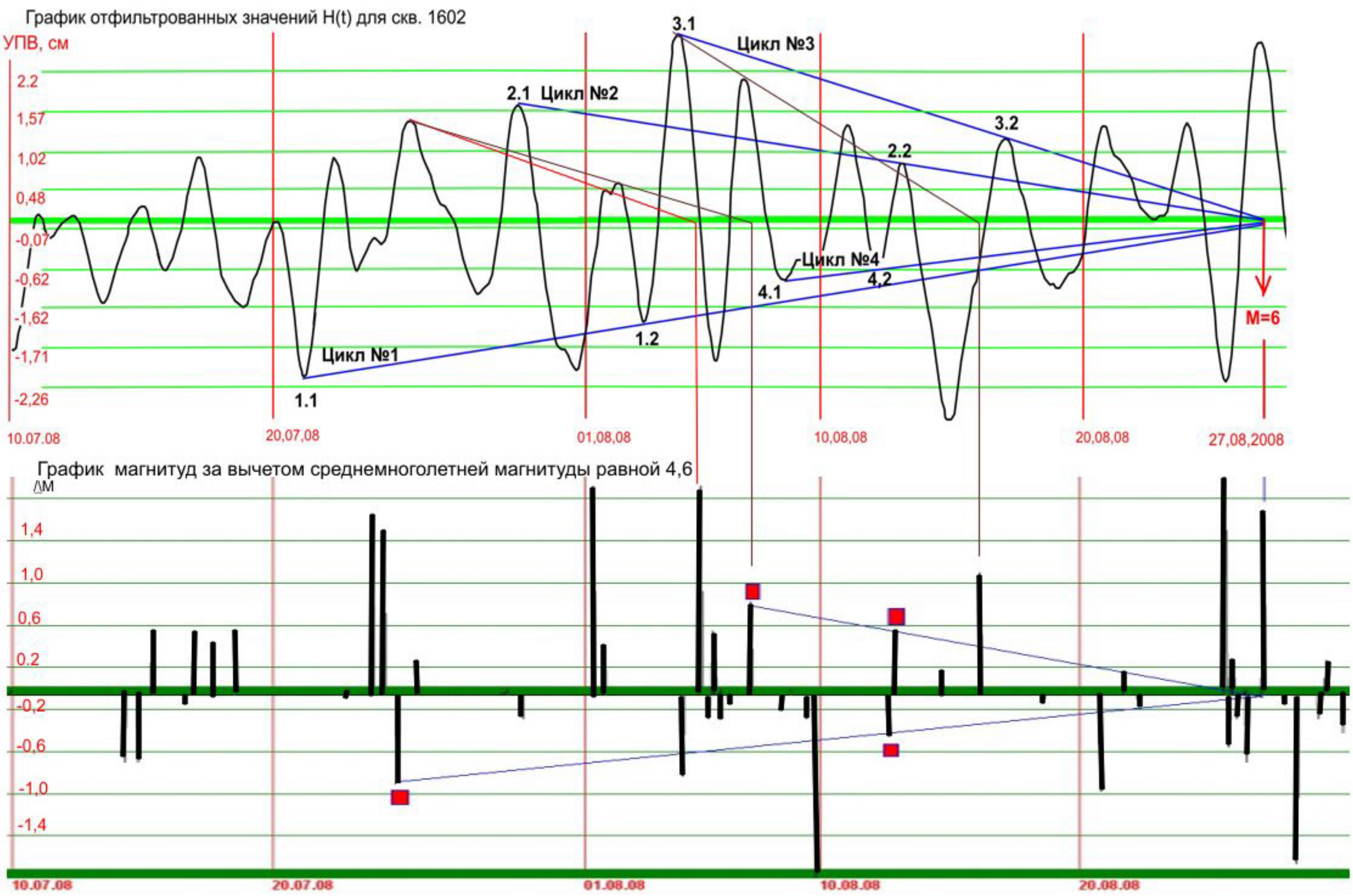

Рис. 4. Цикличность гидрогеодеформационных процессов, указывающая на будущее землетрясение 27 августа 2008 г. с M=6 в районе г. Слюдянка (Байкальский регион).

Fig. 4. Hydro-geo-deformation cyclic recurrence as an indication of a future earthquake. The earthquake of M=6 occurred in the Slyudyanka settlement (Baikal region) on 27 August 2008.

некоторые закономерности, которые мы назвали гидродинамическими циклами. Эти циклы зарождаются, угасают и снова восстанавливаются. Например, после того как цикл № 1, представленный точками 1.1 и 1.2, угас, зарождается новый цикл – № 2, а после его угасания зарождается цикл № 3 и так далее, то есть геологическая система находится в апериодическом автоколебательном режиме. Момент угасания сейсмической активности на графиках, представленных на рис. 4, идентифицируется по точке пересечения линии 1.1–1.2, проведенной через экстремумы высокочастотных колебаний уровня подземных вод, с осью абсцисс (шкала времени). Этот момент характеризуется неустойчивым равновесием системы (геологической среды). Такое неустойчивое равновесие быстро разрушается, в результате чего происходит землетрясение. Есть и другие циклы, например цикл № 3. Линия, представленная точками 3.1 и 3.2, определяет состояние геологической среды, так же как и линии, представленные циклами № 2 и № 1. Общее между этими тремя циклами то, что линии, проведенные через соответствующие циклам экстремумы, заканчиваются в одно и то же время – в данном случае 27 августа 2008 г., в момент Култукского землетрясения, которое произошло вблизи г. Слюдянка. Подобные циклы, указывающие на одну и ту же дату, были выделены на 16 скважинах, расположенных в Байкальском регионе.

Таким образом, для определения времени проявления землетрясения нужно соединить как минимум два (и более) экстремума на графиках, изображенных на рис. 4, каждый своей линией (например, экстремум 1.1 с экстремумом 1.2), и продолжить эту линию до пересечения с осью времени (ось абсцисс); точка пересечения – это время наступления землетрясения. Эти линии, соединяющие экстремумы колебаний УПВ, являются, по существу, аттракторами в соответствии с тео-

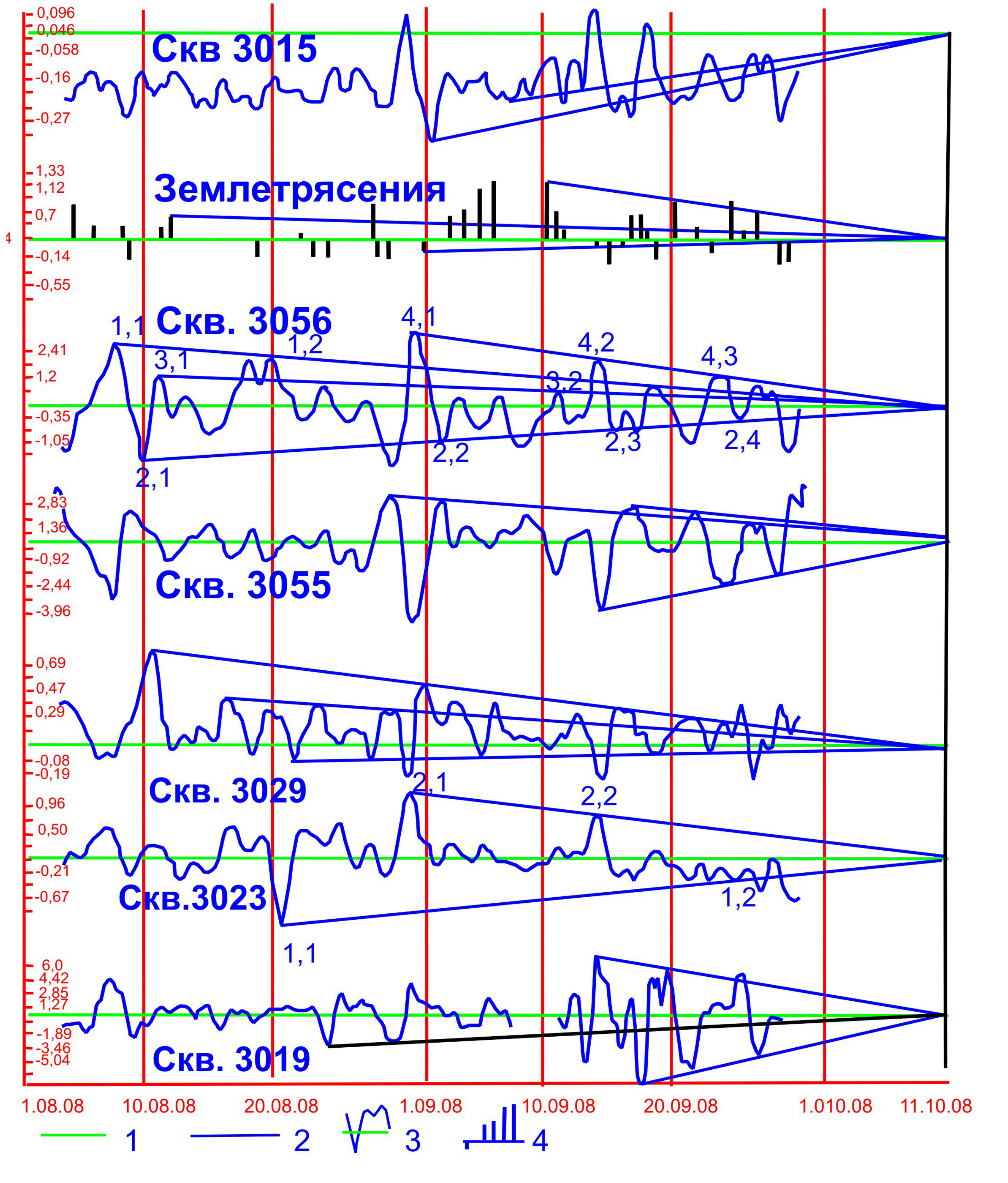

Рис. 5. Реакция некоторых скважин, установленных в Северо-Кавказском регионе, на Чеченское землетрясение: 10 ноября 2008 г., *M*=5.7, H=10 км. *1* – среднемноголетние значения УПВ; *2* – аттракторы; *3* – изменение УПВ относительно его многолетнего значения; *4* – отклонение магнитуды землетрясений от среднемноголетнего значения.

Fig. 5. Responses of water wells to the Chechnya earthquake in the Northern Caucasus. *1* – average long-term values of underground water head; *2* – attractors; *3* – deviation of underground water head from its long-term value; *4* – deviation of magnitudes from long-term seismic intensity values.

рией катастроф.

Циклы № 1, № 2 и № 3, как было отмечено ранее, завершаются землетрясением с магнитудой 6, произошедшим 27 августа 2008 г. в Байкальском регионе. Эта не случайное совпадение. Например, на рис. 4, есть и другие циклы, которые также указывают на время проявления других землетрясений.

В указанный на графике временной период наблюдались и другие землетрясения, которые имеют аналогичные циклы, но эти циклы зарождались значительно раньше и на графике не отображены.

Наши наблюдения показывают, что схождение линий (аттракторов) к одному и тому же времени, связанному с проявлением землетрясений, закономерно, а прогноз сейсмического события, которое произошло 27 августа 2008 г. в районе озера Байкал, не был случайным.

Еще менее случайным событием является прогноз, который сделан с привлечением данных по шести скважинам Кавказского региона (рис. 5). Обработка данных по этим скважинам была проведена по этой же методике, которая дала с ошибкой 1–2 дня прогноз землетрясения в районе Чеченской Республики.

В нашем представлении каждый из циклов дестабилизации гидродинамического режима подземных вод отражает проявление деформации земной коры на одном из ее участков, формируя очаг землетрясения.

Впервые анализ тренда точек бифуркаций (и анализ аттракторов), наблюдаемых при обработке временных рядов землетрясений, был проведен в ГПКК «Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья» [*Сибгатулин, Перетокин, 2006*]. Основная идея метода, разработанного В.Г. Сибгатулиным, состоит в том, что вначале строится график магнитуд как функция времени, а затем соединяются экстремумы магнитуд линией, пересекающей ось времен в точке будущего землетрясения (см. рис. 4).

Аналогичный анализ аттракторов, наблюдаемых при обработке данных мониторинга ГГД поля, проводится нами во ВСЕГИНГЕО. По методу В.Г. Сибгатулина и по методу ВСЕГИНГЕО получаются однозначные результаты прогноза времени проявления сейсмического события (см. рис. 4).

Для прогноза землетрясений по указанной выше методике во ВСЕГИНГЕО разработана программа, которая в автоматическом режиме позволяет осуществлять прогноз наступления сейсмического события, используя указанные выше приемы построения линий-аттракторов. Эти линии можно также назвать «прогнозными линиями».

Методика построения таких линий иллюстрируется рисунками, из которых следует, что «прогнозная линия» – это всего лишь линия, проведенная через экстремумы графиков высокочастотных колебаний уровня подземных вод. Точка пересечения любой такой линии с осью времен (ось абсцисс) и есть время ожидаемого сейсмического события. Достоверность определения дат по такой методике иллюстрируется таблицами 1 и 2. Этот простой прием оценки даты (времени) ожидаемого события реализован в виде программы для компьютера, независимо от человека вычисляющего параметры «прогнозных линий», которых много на выделенной базе, и затем точку пересечения с осью времен. После вычисления всех точек пересечения на заданной базе анализа высокочастотных колебаний компьютер формирует таблицу прогнозных времен и распечатывает ее.

3.3. Реакция подземных вод на планетарные геодинамические процессы

Интересная геодинамическая информация была получена в результате ретроспективного анализа данных мониторинга ГГД поля. Обнаружено, что реакция подземной гидросферы (на предстоящие сильнейшие землетрясения с магнитудой 7 и выше) проявляется согласованно по времени (конгруэнтно) на Северном Кавказе, в Байкальском, в Алтае-Саянском регионах, в южных районах Дальнего Востока, на Камчатке, Сахалине и Курильских островах, то есть во всех регионах, охваченных наблюдательной сетью ГГД мониторинга в РФ. Ошибки в определении времени проявления сильнейших землетрясений по аттракторам различных регионов не превышали одного, реже двух дней. При этом указанные регионы находились на удалении в несколько тысяч километров как от очагов предстоящих сильных землетрясений, так и на значительных расстояниях друг от друга. Этот глобальный геодинамический процесс может быть, видимо, объяснен явлением синхронизации геофизических процессов в сейсмоактивной зоне на больших расстояниях [*Sobolev et al., 2008*].

На рис. 6 приведен пример прогноза сильных землетрясений с магнитудами больше 7. На рисунке изображена область А, представленная интервалом времен, который был использован для построения аттракторов по указанной выше методике, и область Б – интервал времен, на который дан прогноз. Видно, что для построения аттракторов использовались данные, полученные с 1 ноября 2008 г. по 11 января 2009 г. С использованием этих данных и построенных для них аттракторов был осуществлен прогноз трех мощных землетрясений – в районе Курильских островов, в островном регионе Кермадек, в регионе Тонга.

Первое землетрясение с магнитудой 7.4 состоялось 15 января 2009 г. в районе Курильских островов. Второе, с магнитудой 7.0, зарегистрировано 18 февраля в районе Кермадек и третье, с магнитудой 7.6, наблюдалось 19 марта 2009 г. в регионе Тонга. Эпицентры землетрясений указаны в табл. 2. Каждое из этих землетрясений подтверждено тремя и более аттракторами (показаны различным цветом), что указывает на надежность прогноза землетрясений по данным ГГД по-

Т а б л и ц а 1. Сопоставление дат реально случившихся землетрясений с предсказанными компьютером по данным ГГД поля

T a b l e 1. Actual earthquake dates versus computer forecast dating based on the HGD field data

База для построения аттракторов: 01.07.09–20.09.09\						
Район	Магнитуда	Дата реального события	Широта, град.	Долгота, град	Прогноз события	Примечание
Япония	4.5	29.09.2009	43.5	144.78	26.09.2009	
Самоа	**8.1**	**29.09.2009**	**–15.51**	**–172.03**	**28.9.2009**	**Сильное удаленное**
Япония	4.9	29.09.2009	41.58	141.98	30.9.2009	
Вануату	**7.7**	**07.10.2009**	**–13**	**166.51**	**06.10.2009**	**Сильное удаленное**
Япония	5.2	10.10.2009	41.84	142.1	09.10.2009	
Япония	4.6	18.10.2009	40.24	141.1	16.10.2009	
Япония	4.6	18.10.2009	40.24	141.1	16.10.2009	
Япония	4.6	18.10.2009	40.21	141.2	19.10.2009	
Охотское море	5.2	26.10.2009	47.79	145	23.10.2009	
Фиджи	**7.3**	**09.11.2009**	**–17.21**	**178.41**	**08.11.2009**	**Сильное удаленное**
Япония	4.5	20.11.2009	42.3	142.94	20.11.2009	
Сахалин	4.4	28.11.2009	46.07	143.38	26.11.2009	
Охотское море	6.3	10.12.2009	53.46	152.68	10.12.2009	
Курильские острова	5.1	14.12.2009	46.19	153.07	14.12.2009	
Япония	5.4	18.12.2009	33.57	141.08	19.12.2009	
Побережье Китая	4.8	20.12.2009	44.45	126.06	22.12.2009	
Побережье России	6.3	24.12.2009	42.21	134.79	23.12.2009	
Япония	5.2	29.12.2009	41.93	142.07	29.12.2009	
Соломоновы острова	**7.1**	**03.01.2010**	**–8.799**	**157.35**	**3.1.2010**	**Сильное удаленное**
Сахалин	1.9	07.02.2010	46.97	141.71	07.2.2010	
Райукю острова	**7.0**	**26.02.2010**	**25.95**	**128.4**	**25.2.2010**	**Сильное удаленное**
Сахалин	4.5	12.03.2010	46.94	141.7	14.3.2010	
Сахалин	5.0	16.03.2010	52.2	142.15	14.3.2010	
Сахалин	2.0	27.03.2010	46.67	141.59	27.3.2010	
Японское море	6.0	30.03.2010	43.3	138.38	30.3.2010	

ля. На рисунке расстояния даны в километрах от соответствующих землетрясений до пунктов наблюдений. Для проверки реакции ГГД поля на эти землетрясения нами было использованы все наблюдательные пункты, расположенные в сейсмоактивных регионах России и практически во всех регионах, по разработанной методике прогнозировались одни те же даты указанных землетрясений.

Следует отметить, что, в отличие от сильнейших землетрясений, реакция подземной гидросферы на подготовку значительно меньших по энергии землетрясений проявлялась только в пределах того региона, в котором произошло землетрясение, а в других регионах реакция подземной гидросферы на слабые землетрясения не проявлялась. Например, в Щелковском районе Чеченской Республики (10.11.2008 г., M=5.7, H=10 км) и вблизи города Слюдянка, расположенного на оз. Байкал (27.08.2008 г., M=6), реакция гидросферы была локальной, только в регионе, в котором произошло землетрясение.

Таким образом, сильные геодинамические возмущения могут быть обнаружены на значительных территориях, удаленных от места проявления будущего землетрясения.

Корреляция возмущений при регистрации деформаций на удаленных друг от друга наблюдательных станциях с землетрясениями, подобными Суматранскому (26.12.2004 г., M=9.1), предполагает существование крупномасштабного глобального тектонического механизма. Зоны накопления огромной энергии таких землетрясений простираются на сотни и тысячи километров. Их размеры слишком велики, чтобы концентрироваться в одном тектоническом регионе. Областью группирования таких зон является, по существу, вся Земля [*Латынина и др., 2006, 2007*]. При Суматранском землетрясении на дне Индийского океана образовался разлом длиной около 1100 км, одна из тектонических плит опустилась почти на 10 м, а остров Суматра сдвинулся на 30 м к юго-западу. Это землетрясение отчетливо проявилось в гидрохимическом режиме подземных вод на территории Азербайджана [*Гасанов, Керамова, 2006*].

Наиболее сильные землетрясения происходят на неоднородностях геофизической среды и, в частности, на границах геосфер. Катастрофичность таких землетрясений определяется огромным выделением энергии в локальных зонах. Так, выделившаяся энергия (1.6×10^{19} Дж) сильнейшего землетрясения в Чили в мае 1960 г. на два порядка выше средней ежегодной энергии (примерно 4×10^{17} Дж), высвобождаемой за счет всех землетрясений [*Зецер, 2009*]. Данные сейсмотомографии Земли показали, что активные процес-

Т а б л и ц а 2. Прогноз удаленных землетрясений с магнитудой больше 7

T a b l e 2. Forecasted remote earthquakes with M>7

Регион	Магнитуда	Дата реального события	Широта	Долгота	Вероятность прогноза
Охотское море	7.7	05.07.2008	53°55′	152° 53′	0.85
Индонезия (Папуа)	7.7	03.01.2009	0°27′	132° 53′	0.84
Курильские острова	7.4	15.01.2009	46°49′	155° 08′	0.94
Индонезия	7.2	11.02.2009	3°55′	126° 22′	0.79
Кермадек	7.0	18.02.2009	27°26′	176° 21′	0.87
Регион Тонга	7.6	19.03.2009	23°04′	174° 40′	0.71
Побережье Гондураса	7.3	28.05.2009	16°42′	86° 13′	0.87
Новая Зеландия	7.3	15.07.2009	45°44′	166° 34′	0.71
Япония	7.1	09.08.2009	33°10′	137° 55′	0.92
Индийский регион	7.5	10.08.2009	14°06′	92° 53′	0.73
Индонезия	7.0	02.09.2009	7°46′	107° 18′	0.56
Самоа	8.1	29.09.2009	15°3′1	172° 08′	0.86
Индонезия	7.5	30.09.2009	0°44′	99° 52′	0.86
Вануату	7.7	07.10.2009	13°01′	166° 30′	0.75
Острова Санта Круус	7.3	07.10.2009	12°26′	166° 21′	0.75
Вануату	7.4	07.10.2009	13°07′	166° 30′	0.75
Фиджи	7.3	09.11.2009	17°12′	178° 18′	0.72
Соломоновы острова	7.1	03.01.2010	8°52′	157° 21′	0.86
Регион Гаити	7.0	12.01.2010	18°26′	72° 35′	0.92
Чили	8.8	27.02.2010	36°08′	72° 53′	0.84
Мексика	7.2	04.04.2010	32°10′	115° 17′	0.71

сы, приводящие к изменениям структуры земной коры и рельефа, зарождаются в мантии и даже в жидком ядре [*Хаин, Халилов, 2009*]. Ю.М. Пущаровский, в частности, отмечает, что ядро может участвовать в геодинамических процессах на поверхности Земли [*Пущаровский, 2005*], и это признают многие геологи.

Таким образом, сильнейшие землетрясения многие исследователи рассматривают как процессы планетарного масштаба. Полученные ими данные позволяют предположить, что волны миграции сейсмической активности есть, по сути, проявление в различных геофизических полях более общего тектонического волнового планетарного процесса [*Викулин, 2008*]. В этой монографии отмечено, что А.С. Маламудом и В.Н. Николаевским в 1989 г. были получены прямые признаки крупномасштабных волновых движений в мантии, которые подтвердили тем самым гипотезу о существовании тектонических волн на контакте литосфера–астеносфера.

Для прогноза опасных сейсмических событий (землетрясений) необходимо построить аттракторы по методике, показанной схематически на рис. 4–5. Построение аттракторов вручную – операция трудоемкая и до некоторой степени субъективная.

Для устранения субъективности и ускорения процесса прогноза разработана программа для компьютера, которая в табличной форме распечатывает даты опасных сейсмических событий. Прогноз, сделанный компьютером, приведен в табл. 1, в которой показаны как местные для Дальневосточного региона, так и удаленные землетрясения, имеющие магнитуду больше 7 (отмечены жирным шрифтом).

При прогнозе дат опасных сейсмических событий (землетрясений) с помощью разработанной программы вначале выбирается «база для построения аттракторов». По этой базе компьютер определяет начальный и конечный интервал времени, на котором анализируется поле ГГД. Обработка и анализ данных компьютером происходят в три этапа. На первом этапе из данных вычитается среднемноголетнее значение уровня подземных вод и производится в скользящем временном окне высокочастотная фильтрация, в результате получаются временные ряды УПВ, представленные в ОЗУ компьютера в числовой форме (рис. 4–6). На втором этапе компьютер аппроксимирует «аттрактор» прямой линией

$$Y=kX+b$$

и по найденным значениям коэффициентов k и b определяет точку пересечения аттрактора с осью времен. Так перебираются в автоматическом режиме все возможные для выбранной базы аттракторы. На третьем этапе строится таблица, в которой указаны даты ожидаемых землетрясений.

В таблице 1 в качестве такой базы выбран интервал 1 июля – 20 сентября 2009 г., то есть база составляет 2 месяца и 20 дней. Согласно шестому столбцу таблицы первое землетрясение должно состояться 26 сентября 2009 г., реально землетрясение состоялось 29 сентября

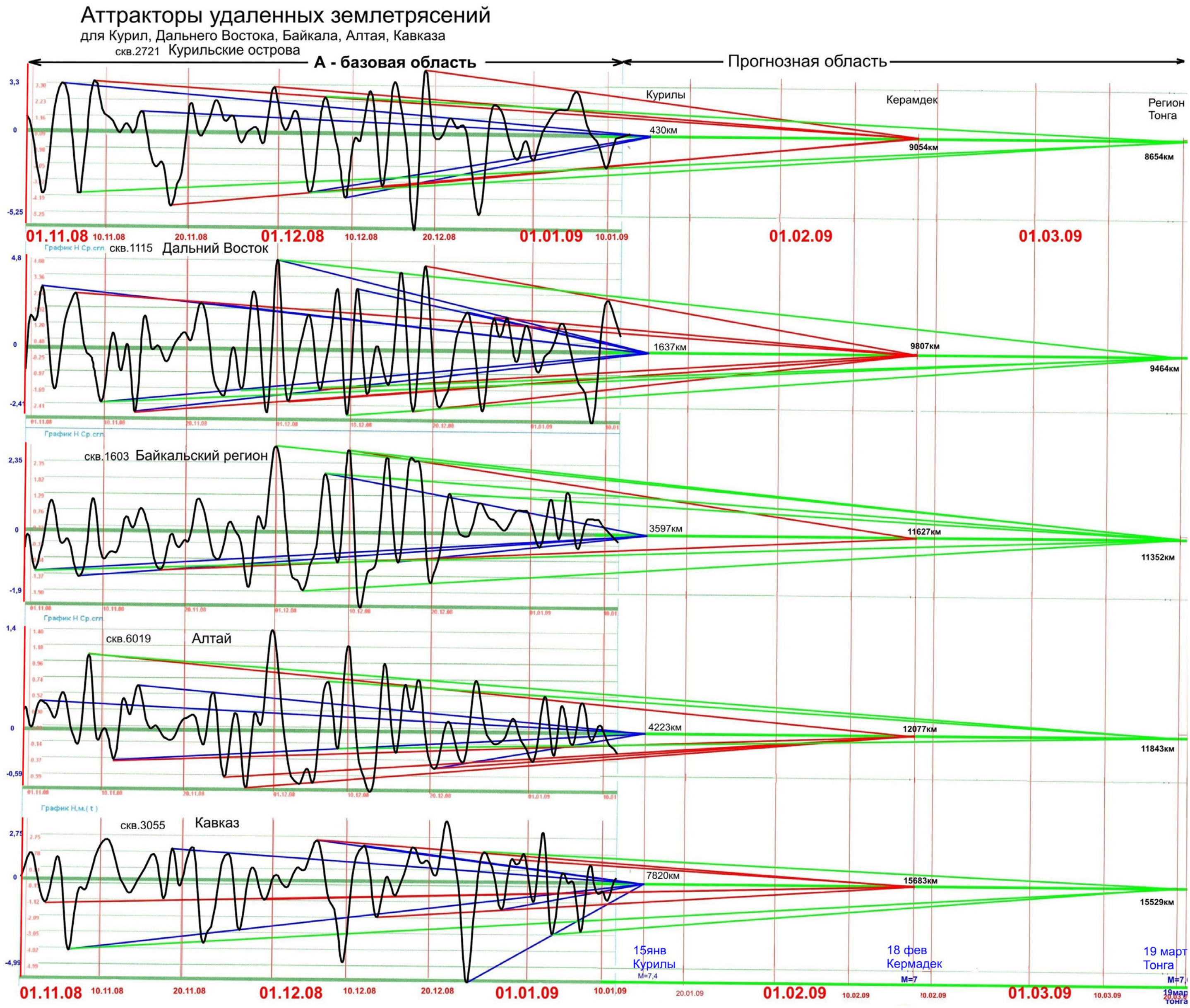

Рис. 6. Прогноз удаленных землетрясений по данным мониторинга ГГД поля.

Fig. 6. Forecasting of remote earthquakes from HGD monitoring data.

2009 г. в Японии – см. столбец №3. Ошибка прогноза составила три дня – это неплохое совпадение дат прогноза и реального события. Проанализировав таблицу 1, можно убедиться, что в основном ошибка прогноза составляет 1–2 дня. Интервал времен прогноза вычисляется программой и составляет семь месяцев.

Вероятность прогноза землетрясений, осуществленных компьютером, приведена в табл. 2.

Числа в столбце «Прогноз», например 0.85, означают, что из 100 скважин 85 дали дату предполагаемого землетрясения с ошибкой не более двух дней. Остальные 15 скважин (пунктов наблюдений) оказались непригодными для автоматической обработки по причине отсутствия наблюдений в базовом периоде, по которому выполнялся прогноз.

4. Выводы

К настоящему времени исследовано множество графиков изменения УПВ во времени, построенных для различных регионов РФ, на которых выявлена общая закономерность развития циклов автоколебательных процессов, характеризующих переход системы из устойчивого состояния в неустойчивое и завершающихся землетрясениями. Установлено, что зарождение нового цикла в момент проявления деформационных процессов в земной коре отчетливо отражается в гидрогеодинамическом режиме подземных вод.

На представленных графиках видно, что затухающий процесс колебания уровня подземных вод еще не завершился, как начался новый цикл колебательного процесса с более высокой амплитудой. Это указывает на то, что процесс деформации на одном участке сейсмоактивного разлома еще не завершился, как начался новый процесс деформации на другом, скорее всего смежном, участке. В последующем происходит слияние локальных участков деформаций с постепенным снижением прочности разлома в его более широкой зоне и с дальнейшим увеличением упругой энергии. Наблюдаемые деформационные процессы могут завершиться сдвигом структурных блоков по плоскости этого разлома и, соответственно, проявлением землетрясения.

В теории катастроф отмечается, что «после того как параметр прошел через бифуркационное значение, соответствующее рождению цикла, т.е. мягкому возникновению автоколебаний, система остается в окрестности потерявшего устойчивость состояния равновесия еще некоторое время, за которое параметр успевает измениться на конечную величину. И лишь затем система скачком переходит на родившийся в момент бифуркации автоколебательный режим, так что потеря устойчивости кажется жесткой» [*Арнольд, 2009*]. Это, по существу, и наблюдается в процессе подготовки и проявления землетрясений.

Разработанные методы оценки геодинамической обстановки и краткосрочного прогноза землетрясений по аттракторам колебательных процессов в гидродинамическом режиме подземных вод обеспечивают заблаговременный за 1.5–2.0 месяца (с точностью от одного до двух дней) прогноз времени проявления сейсмического события. При достаточной плотности наблюдательных пунктов мониторинга ГГД поля (при наличии наблюдательного пункта в каждом тектоническом блоке) в сейсмоактивном регионе представляется возможным определить место будущего землетрясения. Есть основание полагать, что в результате дальнейшего совершенствования этой методики удастся прогнозировать с достаточной достоверностью силу предстоящего землетрясения.

Результаты анализа данных мониторинга ГГД поля выявили глобальные возбуждения в подземной гидросфере в периоды, предшествующие проявлению землетрясений с магнитудой больше 7. Представляется, что эти возбуждения в верхних слоях земной коры обусловлены планетарными геодинамическими процессами в глубинных частях Земли – в мантии, которые и приводят к сильнейшим землетрясениям.

Землетрясения с магнитудой больше 7 регистрируются «одновременно» в гидрогеосфере различных регионов, находящихся на очень больших расстояниях друг от друга (несколько тысяч километров). Построенные по данным мониторинга ГГД поля аттракторы указывают достаточно точно на время проявления сильнейших землетрясений. Такие землетрясения приводят, как правило, к катастрофическим последствиям.

Задача прогноза места проявления такого землетрясения должна решаться на основе создания единой сети наблюдений, охватывающей все континенты, и анализа результатов мониторинга по единой методике.

5. Литература

Арнольд В.И. Теория катастроф. Изд. 5-е. М.: Едиториал УРСС, 2009. 136 с.

Вартанян Г.С., Куликов Г.В. Гидрогеодеформационное поле Земли // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 310–314.

Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.

Гасанов А.Г., Керамова Р.А. Отражение глобальных геодинамических процессов в сейсмогеохимическом режиме флюидов Азербайджана на примере катастрофического землетрясения в Индийском океане (26.12.2004; M_{LH}=8.9) // Геофизика XXI столетия: Сб. тр. 7-х геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный мир, 2006. С. 326–329.

Зецер Ю.И. Энергетика внутренних и внешних геосфер // Проблемы взаимодействующих геосфер: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 9–18.

Куликов Г.В., Рыжов А.А., Гарифулин В.А., Лыгин А.М. Оценка геодинамической обстановки и сейсмической опасности по энергетическим параметрам и векторам напряжений гидрогеодеформационного поля // Разведка и охрана недр. 2010. № 7. С. 19–24.

Латынина Л.А., Милюков В.К., И.М. Васильев И.М. О глобальных возмущениях деформаций земной коры перед сильными мировыми землетрясениями // Геофизика XXI столетия: Сб. тр. 7-х геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный мир, 2006. С. 206–212.

Латынина Л.А.. Милюков В.К., Васильев И.М., Миронов А.П. Максимальные смещения земной поверхности в районе Подмосковья при Суматранском землетрясении 26.12.2004 г. // Геофизика XXI столетия: Сб. тр. 9-х геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: «Герс», 2007. С. 114–120.

Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система R-STEPS) / Сост. Г.С. Вартанян, В.С. Гончаров, В.П. Кривошеев и др. М.: Геоинформ-марк, 2000.

Пущаровский Ю.М. Строение, энергетика и тектоника мантии Земли // Вестник РАН. 2005. Т. 75. № 12. С. 1115–1122.

Сибгатулин В.Г., Перетокин С.А. Синергетика процессов в сейсмических очагах и краткосрочный прогноз землетрясений. Международный семинар «Геодинамика и сейсмичность Средиземноморско-Черноморско-Каспийского региона»: Тезисы докладов. Геленджик: ККО ЕАГО, 2006. 90 с.

Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.

Sobolev G.A., Lyubushin A.A., Zakrzhevskaya N.A. Asymmetrical pulses, the periodicity and synchronization of low frequency microseisms // Journal of Volcanology and Seismology. 2008. V. 2. № 2. P. 118–134. doi:10.1134/S074204630802005X.

Куликов Геннадий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, в.н.с.
ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии (ФУГП ВСЕГИНГЕО)
142452, п. Зеленый, Ногинский район, Московская область, Россия
Тел.: 7(985)3314125; ✉ e-mail: gendvas@post.ru

Kulikov, Gennady V., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Lead Researcher
All-Russian Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology
142452, Zeleny Village, Noginsk District, Moscow Region, Russia
Tel.: 7(985)3314125; ✉ e-mail: gendvas@post.ru

Рыжов Альберт Алексеевич, канд. геол.-мин. наук, в.н.с.
ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии (ФУГП ВСЕГИНГЕО)
142452, п. Зеленый, Ногинский район, Московская область, Россия
Тел.: 8(903)9759663; e-mail: albert-ryjov@rambler.ru

Ryzhov, Albert A., Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
All-Russian Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology
142452, Zeleny Village, Noginsk District, Moscow Region, Russia
Tel.: 8(903)9759663; e-mail: albert-ryjov@rambler.ru