

ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Рассмотрена возможность и целесообразность использования для краткосрочного прогноза землетрясений результатов наблюдений за уровнем подземных вод в скважинах, дебитом скважин и родников, изменением температуры, химического и газового состава подземных вод в увязке с данными о сейсмической активности (гидрогеосейсмологический метод). Гидрогеосейсмологический метод позволяет повысить точность и оперативность краткосрочного прогноза сейсмических событий. Актуальность такого прогноза увеличивается в связи со строительством новых крупных терминалов СПГ, магистральных нефтепроводов и газопроводов в районах с высокой сейсмической опасностью и, помимо обеспечения безопасности населения, позволяет оперативно принимать управленческие решения по эксплуатации предприятий в режиме реального времени.

Ключевые слова: краткосрочный прогноз землетрясений, уровень подземных вод, дебит скважин и родников, химический и газовый состав, сеть сейсмического мониторинга, Российская Федерация.



Сентяков А.В.
ЗАО «ИННЦ»
эксперт
AVSentjakov@udn.rosneft.ru



Санкло М.М.
ЗАО «ИННЦ»
ведущий инженер
MMSanklo@udn.rosneft.ru

Актуальность краткосрочного прогноза землетрясений очевидна, поскольку позволяет принять оперативные меры по обеспечению безопасности населения. В данной статье к краткосрочному прогнозу мы будем относить выполненную на основе гидрогеосейсмологического метода оценку вероятности крупного сейсмического события в срок от нескольких часов до 1-2 недель до его наступления, что позволит принять оперативные меры по уменьшению разрушительных последствий такого события.

Под гидрогеосейсмологическим методом понимаются наблюдения за уровнем подземных вод на ярусных узлах скважин, дебитом

скважин и родников, изменением температуры, химического и газового состава подземных вод, тесно увязанные с данными сейсмостанций о энергетической характеристике землетрясения в пункте наблюдения, расстоянии до эпицентра землетрясения, протяженности очага землетрясения и его энергетическом классе (Рис. 1).

При длительном и правильно организованном ряде наблюдений можно получить высокие корреляционные зависимости для каждой из тектонических зон с созданием цифровых моделей, позволяющих выдавать краткосрочные прогнозы с заданной точностью.

Подразделениями РАН ведутся наблюдения за величиной сейсмических событий, определяется местоположение очага землетрясения в плане и по глубине, в том числе приуроченность к тектоническим зонам.

Основным средством изучения сейсмических явлений на территории РФ является развернутая сеть сейсмостанций геофизической службы РАН. По данным Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) [1], на конец 2021 г. в РФ функционировали 490 сейсмостанций ФИЦ ЕГС РАН и других организаций, работающих в тесном контакте с ФИЦ ЕГС РАН и использующих сходные технологии регистрации и обработки. Схематически их расположение показано на рис.2. По состоянию на 2023 г. количество действующих станций практически не изменилось (489 станций, работающих в составе 19 сетей).

С 60-х годов прошлого века на отдельных полигонах (участках) выполнялись также исследования по выявлению зависимостей между сейсмической активностью и поведением уровня подземных вод, изменением их химического и газового состава.

Описание проявлений гидродинамических предвестников землетрясений, отмеченных даже на значительном удалении от эпицентра, приводится:

- по району Байкала – в работах Киссина И.Г. [2,3], Семенова Р.М. [4,5];

- по району Камчатки – в работе Копыловой Г.Н. и Болдиной С.В. [6].

Гидрогеохимические предвестники землетрясений (ГХП) на примере районов полуострова Камчатка и Республики Узбекистан рассмотрены в совместной работе Копыловой Г.Н., Юсупова Ш.С. и др. [7]. Доказано, что при подготовке землетрясений с Mw=6,5-7,8 (4-6 баллов по шкале MSK-64) ГХП проявляются на эпицентральных расстояниях de=100-310 км. Длительность развития ГХП и заблаговременность их проявления составляют 1-9 месяцев.

В настоящее время гидрогеодеформационный мониторинг (мониторинг ГГД-поля) ведется подразделениями ФГБУ «Гидроспецгеология» Управления государственного мониторинга состояния недр и региональных работ Федерального агентства по недропользованию по Северо-Кавказскому, Байкальскому, Алтае-Саянскому, Дальневосточному сейсмоактивным регионам [8].

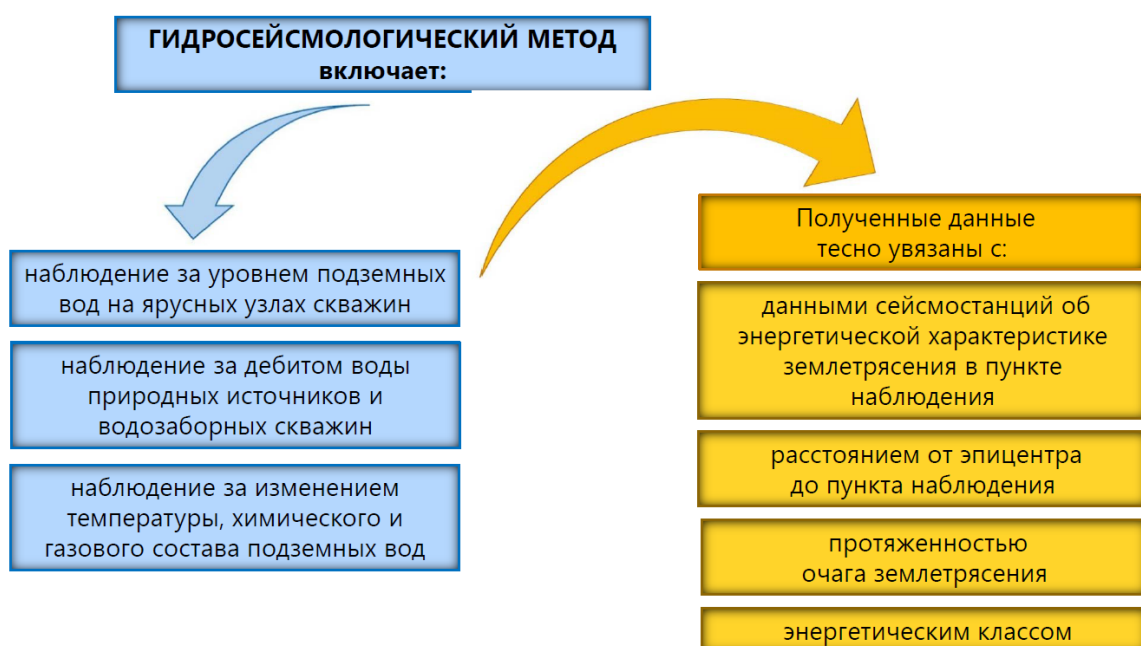


Рис. 1. Схема гидросейсмологического метода.

На территории РФ гидрогеосейсмологическая сеть наиболее развита на Кавказе. Регион характеризуется достаточно высокой гидрогеологической изученностью [9,10]. Гидрогеодеформационный мониторинг здесь осуществляется с 1986 г. по сети скважин. Интерпретация ГГД-данных основывается на представлении о линейной зависимости между величиной напряжения и изменением давления флюида (гидравлическим давлением), т.е. система «скважина-пласт», по сути, является пьезометром.

В пределах Краснодарского края Северного Кавказа работы по изучению ГГД поля Земли с целью прогноза сильных землетрясений были начаты в 1987 г. В процессе работ привлекались также материалы государственной гидрогеологической сети, наблюдения по которой ведутся в Краснодарском крае с 1958 года.

В отчете по организации и ведению мониторинга гидрогеодеформационного поля и ряда геофизических полей в Северо-Кавказском регионе за 1991-1993 гг., на основании анализа изменений уровней подземных вод при землетрясениях с $M > 5$ приводится вывод о том, что гидрогеодеформационное поле Земли динамично и мозаично, его аномальные изменения охватывают большие площади и наиболее контрастно

проявляются за несколько суток - часов до землетрясения. Наличие реакции уровня подземных вод (УПВ) на влияние приливно-отливных сил свидетельствует о возможности фиксации по изменениям УПВ в наблюдательных скважинах напряжений, связанных с деформациями порядка 10^{-8} (1/кгс/см²).

Сотрудниками ГУП «Кубаньгеология» в результате собственных исследований выделены следующие особенности и закономерности ГГД поля в пределах Краснодарского края: структура ГГД поля соответствует тектоническому плану региона; в структуре ГГД поля периодически наблюдается перестройка, фиксирующая схему геодинамической активности вдоль разломных зон различного заложения; с 1958 г. наибольшие возмущения наблюдались в 1963, 1976-78 и 1988 годах. Изменения, произошедшие в 1976-78 годах, характеризуют смену геодинамического режима в регионе, которая сопровождалась катастрофическими землетрясениями на сопредельных с Кавказом территориях и началом подъема уровня Каспийского моря.

Характер изменения ГГД поля в период подготовки землетрясений с $M = 4,5-5,5$, эпицентры которых расположены в пределах территории Западного Кавказа, контрастно отличается от его

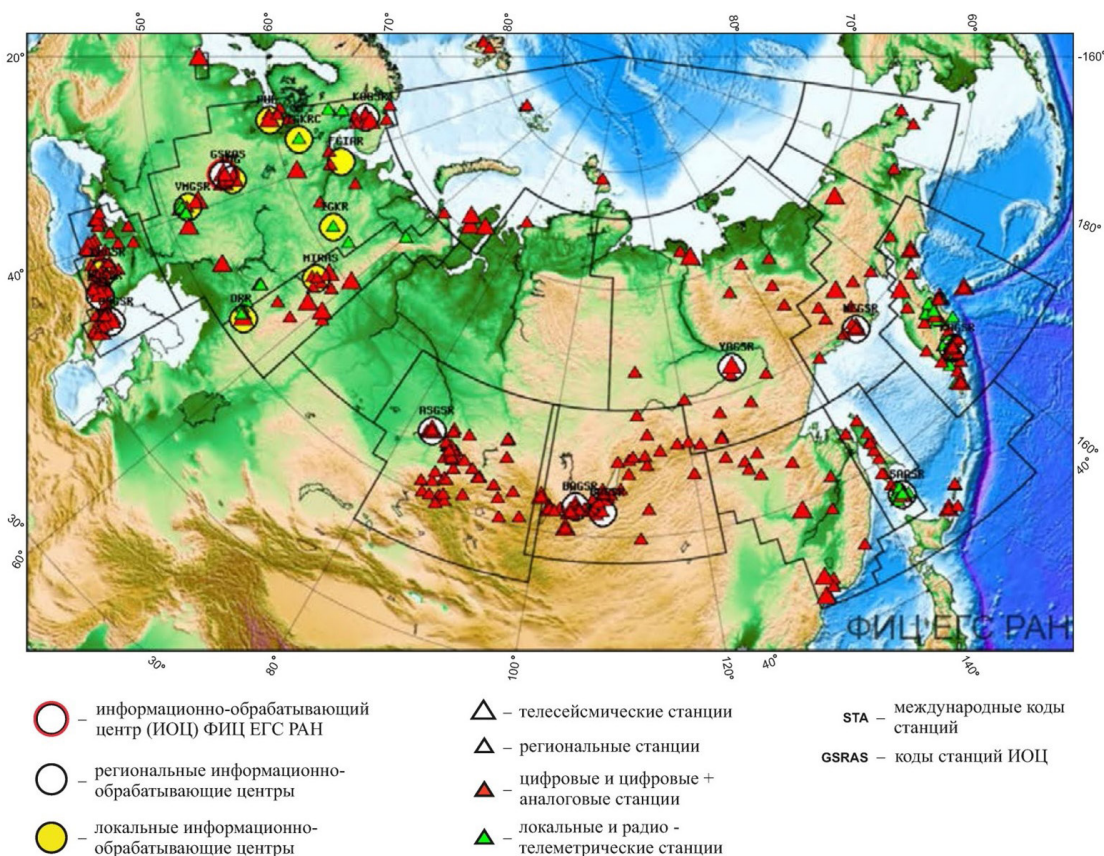


Рис. 2. Схема расположения сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН (источник: база данных «Землетрясения России»).

образов при подготовке крупных ($M > 6,5$) дальних (500-1000 км) землетрясений; колебания УПВ при подготовке крупных землетрясений в отдельных пунктах превышают десятки метров; наблюдаются четкие связи в перестройке структур ГГД поля и грязевулканической активности на Таманском полуострове; наблюдается связь изменений уровней, температуры и электропроводимости подземных вод и пр.

В 1994, 1998, 1999 гг. за 3-5 суток были спрогнозированы землетрясения в Краснодарском крае с $M=4,2-5,5$.

Таким образом, в процессе многолетних исследований сейсмоактивных районов Северного Кавказа была всесторонне изучена реакция УПВ на подготовку и разрядку землетрясений, установлены гидрогеологические эффекты сейсотектонических движений; проведена их типизация, выделены предвестниковые особенности ГГД поля Северного Кавказа в связи с местными слабыми и сильными дальними землетрясениями.

В Сибирском федеральном округе до 2009 года действовали две специализированные региональные наблюдательные сети ГГД мониторинга: Алтае-Саянская и Байкальская и несколько геодинамических полигонов – Тывинский, Красноярский и Байкальский, где на стационарных пунктах наблюдений выполнялся мониторинг геофизических и газогидрогеохимических полей.

Тывинский и Красноярский геодинамические полигоны были организованы в 2006-2008 гг. Пункты регистрации естественных импульсных электромагнитных полей Земли (ЕИЭМПЗ) и газогидрогеохимии были совмещены с пунктами сейсмических наблюдений.

В районе оз. Байкал работы по ведению геофизических наблюдений за состоянием геологической среды были начаты силами ФГБУ «Иркутскгеофизика» в 1981 году. Газогидрогеохимический мониторинг проводился на 2 пунктах, где измерялось содержание гелия и радона в воде.

В результате выполнения работ в 2009-2015 гг. ФГБУ «Гидроспецгеология» была создана объединённая наблюдательная сеть ГГД-мониторинга Сибирского федерального округа.

Были получены фактографические и картографические материалы (ряды наблюдений, таблицы, графики, разрезы, карты-схемы) гидрогеодеформационного поля, геофизических и газогидрогеохимических полей, обосновывающие оценку сейсмогеодинамического состояния геологической среды и степени сейсмической опасности территории Сибирского ФО.

На Дальнем Востоке высокой сейсмичностью характеризуются Курило-Камчатский регион и остров Сахалин. Менее активны в сейс-

мическом отношении Верхояно-Колымский регион, районы Приамурья, Приморья, Корякии и Чукотки, хотя и здесь возникают достаточно сильные землетрясения.

Камчатка является северным звеном Курило-Камчатской дуги, где сейсмичность достигает почти наивысшего на Земле уровня. Здесь находится один из крупных тектонических узлов мира – пересечение Курило-Камчатской, Алеутской островных дуг и сейсмического пояса, протягивающегося сюда через Якутию из Северного Ледовитого океана, и один из наиболее мощных магматических центров мира – Ключевская группа вулканов.

Сахалин представляет собой северное продолжение Сахалино-Японской островной дуги и трассирует границу Охотоморской и Евразийской плит. До катастрофического Нефтегорского землетрясения (1995г., $M=7,5$, $I_0=9-10$ баллов) сейсмичность острова представлялась умеренной, и до создания в 1991-1997 гг. нового комплекта карт общего сейсмического районирования территории России (ОСР-97) здесь ожидалось лишь землетрясения интенсивностью до 6-7 баллов. Нефтегорское землетрясение было самым разрушительным из известных за все время на территории Российской Федерации. Погибло более 2000 чел. Полностью ликвидирован рабочий поселок Нефтегорск (Рис. 3).

Приамурье и Приморье характеризуются умеренной сейсмичностью. Из известных здесь землетрясений пока только одно на севере Амурской области достигло магнитуды $M=7,0$ (1967 г., $I_0=9$ баллов). В будущем магнитуды потенциальных землетрясений на юге Хабаровского края также могут оказаться не менее $M=7,0$, а на севере Амурской области не исключены землетрясения с $M=7,5$ и выше. Наряду с внутрикоровыми, в Приморье ощущаются глубокофокусные землетрясения юго-западной части Курило-Камчатской зоны субдукции. Землетрясения на шельфе нередко сопровождаются цунами.



Рис. 3. Последствия землетрясения в Нефтегорске (фото из архива журналиста Виталия Анькова).

На территории Дальневосточного округа специализированная региональная сеть для целей прогноза сильных землетрясений была организована в 1987 году. В девяностых годах, из-за недостаточного финансирования работ, дальнейшее развитие ГГД-мониторинг не получил. Развитие этой сети продолжилось с 2002 г.

До создания новых пунктов гидрогеодеформационного мониторинга в 2006-2014 гг. предполагалось использовать существующий фонд гидрогеологических скважин. В выбранных скважинах проводилось обследование их технического состояния. Информативность выбранного объекта с целью наблюдения за геодинамическими процессами оценивалась по реакции уровня подземных вод на возмущения, вызываемые лунно-солнечными приливами. Данные результатов обследования направлялись во ВСЕГИНГЕО для получения заключения о включении пункта наблюдения в специализированную региональную сеть для проведения наблюдений с целью сейсмопрогноза. После признания объекта наблюдения пригодным для организации режимных наблюдений, пункт оборудовался защитным сооружением и средством измерения.

Геодинамические полигоны (геофизический и газогидрогеохимический мониторинг) для оценки и прогноза изменений состояния геологической среды на территории с высокими сейсмическими рисками в районах городов Петропавловск-Камчатский и Южно-Сахалинск были созданы и введены в эксплуатацию в 2006-2008 гг. Для изучения физических, тектонических и геодинамических процессов, являющихся предвестниками землетрясений, здесь используются также режимные наблюдения за содержанием радона и гелия в водных источниках.

В 2014 г. организован геофизический полигон на территории г. Хабаровска. Хотя данный район и менее активен в сейсмическом отношении, но и здесь возникают достаточно сильные землетрясения (в будущем магнитуды потенциальных землетрясений на юге Хабаровского края также могут оказаться не менее $M=7,0$).

Для организации наблюдений за изменениями глубинной составляющей содержания радона и гелия выбирались наблюдательные скважины с ненарушенным режимом.

На основании анализа состояния федеральной и территориальной сети гидрогеосейсмологического мониторинга можно сделать вывод о том, что плотность гидрогеосейсмологической сети даже на Северном Кавказе недостаточна для краткосрочных прогнозов и калибровки моделей по землетрясениям магнитудой от 2,5 до 4,0. Сеть наблюдательных скважин и сеть сейсмостанций разрознены, что вносит дополнитель-

ную неопределенность в наблюдения, особенно при краткосрочных процессах и краткосрочном прогнозе. Используется ограниченный спектр определяемых газов, тогда как появление ряда углеводородных газов, углекислого газа и других может служить индикатором и краткосрочным предвестником землетрясения наряду с резким увеличением потока гелия и радона.

Дальнейшее развитие в области краткосрочных прогнозов землетрясений должно происходить на основе наблюдений за энергетическим классом землетрясений и магнитудой землетрясений, с созданием гидрогеосейсмологических центров, состоящих из сейсмостанции и ярусного узла из 2-3 наблюдательных скважин, при соотношении глубин скважин в логарифмическом масштабе. Скважины должны быть оборудованы автоматическими системами для замеров уровней, газоанализаторами и системой телеметрии для оперативной передачи данных в обрабатывающие центры, в том числе и обрабатывающие данные по дистанционным методам мониторинга. Для учета сезонных факторов должны создаваться геофильтрационные и геомиграционные модели с целью исключения естественных колебаний уровня подземных вод, их химического состава и газонасыщенности, не связанных с сейсмической активностью. С учетом того, что основной объем землетрясений приходится на события с магнитудой от 2 до 4 баллов, расстояние между центрами не должно превышать 50 км, при их размещении должно учитываться тектоническое строение территории.

В настоящее время технология ГГД мониторинга, как основа слежения за развитием геодинамической обстановки на региональном уровне, признана патентными службами России, США, Италии, Греции, Ирана, Турции, а также патентным ведомством Европейского Союза. Вместе с тем по опыту работ установлено, что краткосрочное развитие сейсмотектонического процесса наиболее успешно контролируется лишь по комплексу параметров: оперативной диагностике аномальных изменений газогидрохимических параметров, напряженности гидрогеодеформационного (ГГД) поля и импульсного электромагнитного поля Земли (ЭМИ).

Выход крупных нефтяных компаний на объекты в Восточной Сибири, Дальнего Востока, строительство новых крупных терминалов СПГ, нефтяных терминалов, магистральных нефтепроводов и газопроводов в районах с высокой сейсмической опасностью требует современной организации гидрогеосейсмологического мониторинга и сети пунктов наблюдений в сейсмоопасных районах.

Решение этой задачи невозможно без привлечения внешних инвесторов, которыми могут являться крупные нефтяные и газовые компании, компании, эксплуатирующие опасные производственные объекты, магистральные трубопроводы и т.д., которым краткосрочный прогноз необходим для принятия управленческих решений по эксплуатации предприятий в режиме реального времени.

На основе анализа ранее выполненных работ можно сделать следующие выводы: поскольку основной объем землетрясений приходится на события с магнитудой от 2 до 4 баллов, размер ячейки сети пунктов наблюдений не должен превышать 50 x 50 км; сеть должна быть тектонически ориентированной. Чрезвычайно важными являются: создание узлов скважин для исключения влияния как макрофакторов (сезонное питание и разгрузка подземных вод), так и микрофакторов (колебание атмосферного давления, лунно-солнечные приливы и т.д.); конструкции наблюдательных скважин должны быть целевыми, их гидравлическое несовершенство минимальным. Необходимо отслеживать сезонные изменения газового и химического состава вод, при этом

спектр определяемого газового состава должен быть существенно расширен. Без этих данных выполнение краткосрочных прогнозов гидрогеосейсмологическим методом невозможно.

Объектная сеть наблюдательных скважин первоначально должна встраиваться в федеральную сеть сейсмостанций геофизической службы РАН. В дальнейшем гидрогеосейсмологические пункты объектного мониторинга могут создаваться предприятиями самостоятельно и встраиваться (интегрироваться) в сеть федерального мониторинга.

Заказчиками работ могут выступать подразделения РАН, эксплуатирующие сейсмостанции. Исполнителями работ могут являться организации, ведомственные институты, имеющие необходимые кадры гидрогеологов, IT-специалистов для разработки программного обеспечения и моделей, способные организовать весь цикл работ, начиная от проектирования наблюдательных скважин и до сооружения ярусных узлов, обеспечения работы системы автоматических замеров и передачи данных, обработки получаемой информации, создания фильтрационных и миграционных моделей участков с дальнейшим выходом на гидрогеосейсмологические модели, разработанные ФГБУ «Гидроспецгеология».

Литература

1. База данных «Землетрясения России». Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук, 2023 г. <http://eqru.gsras.ru>
2. Киссин И.Г. Новые данные о «Чувствительных зонах» земной коры и формирование предвестников землетрясений и постсейсмических эффектов. Геология и геофизика, 2007, т.48, №5, с. 548-565.
3. Киссин И.Г. Гидродинамические предвестники землетрясений: зарождение и основные этапы исследований. История наук о Земле. 2008. Т.1. №2. С. 61-68.
4. Землетрясение 27.08.2008 года на юге Байкала и его предвестники. Семенов Р.М. Геодинамика и тектонофизика 2010. V 1. № 4 стр. 441 – 447.
5. Поиск краткосрочных предвестников землетрясений в Южном Прибайкалье. Семенов Р.М., Лопатин М.Н. Серия «Науки о Земле» 2013. Т.6. №1. С. 183-189.
6. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Вулканология и Сейсмология, 2019, №2, с.3 – 20.
7. Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия, и Республики Узбекистан) Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. №4, Выпуск № 48. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-4-48-5-20
8. Информационный отчет ФГБУ «Гидроспецгеология», Управление ГМСН
9. Гибсатарова И.П., Королецки Л.Н., Селиванова Е.А., Артемова Е.В., Каменская О.П. Северный Кавказ // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.) – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 85 -95. doi: 10.35540/1818-6254/2019.22.07.
10. Фиолетов С. Геофизический мониторинг на Северном Кавказе. Наука в России №1, 2011.

UDC: 556.8.028

A.V. Sentyakov, CJSC «INNC», expert, AVSentyakov@udn.rosneft.ru
M.M. Sanklo, CJSC «INNC», Lead engineer, MMSanklo@udn.rosneft.ru

HYDROGEOSEISMOLOGICAL METHOD AS A BASIS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF SHORT-TERM FORECASTS OF DESTRUCTIVE EARTHQUAKES

Abstract: The possibility and expediency of using the results of observations of the groundwater level in wells, monitoring the flow rate of wells and springs, temperature changes, changes in the chemical and gas composition of groundwater in conjunction with data on seismic activity for short-term earthquake forecasting is considered (hydrogeoseismological method).

The hydrogeoseismological method makes it possible to increase the accuracy and efficiency of short-term forecasting of seismic events. The relevance of this forecast increases due to the construction of new large terminals of liquefied natural gas (LNG), main oil and gas pipelines in areas with high seismic hazard, and, in addition to ensuring the safety of the population, it allows you to make management decisions quickly on the operation of enterprises in real time.

Keywords: short-term earthquakes forecast, groundwater level, flow rate of wells and springs, chemical and gas composition, seismic monitoring network, Russian Federation.