

ДИНАМИКА МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА И ЕЕ СВЯЗЬ С ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПЕТРОПАВЛОВСК- КАМЧАТСКОМ ГЕО-ДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В 1999–2003 ГГ.

© 2005 г. П. П. Фирстов, В. А. Широков

*Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН,
683006, Петропавловск-Камчатский, бульв. Пуйна, 9; e-mail: firstov@kcs.iks.ru*
Поступила в редакцию 21.08.2003 г.

В 1999 г. на Камчатке впервые были организованы непрерывные наблюдения за вариациями молекулярного водорода в подпочвенном газе на основе использования отечественных датчиков, использующих эффект изменения электроемкости электронного перехода металл–диэлектрик–полупроводник под действием подпочвенного водорода. В период 1999–2003 гг. на фоне слабоменяющегося квазипостоянного сигнала, регистрируемого в зоне разлома, ориентированного вдоль простирания Курило-Камчатской геоструктурной дуги, были зарегистрированы 7 импульсных выбросов водорода длительностью от полутора до шести часов и амплитудой импульсов, превышающей фон в 2–14 раз. С уровнем доверия более 0.99 выявлена статистически значимая связь импульсов водорода с землетрясениями района южной Камчатки (магнитуда $M \geq 4.5$ и $M \geq 5.6$) и землетрясениями Земли с $M \geq 7.6$. Более 80% землетрясений района южной Камчатки с $M \geq 5.6$ оказались приурочены к интервалу за месяц до и в течение месяца после возникновения импульсов водорода. Показано, что с вероятностью 0.8 после появления импульсных выбросов водорода в течение месяца можно ожидать возникновение землетрясений с $M \geq 7$ в Курило-Камчатской зоне и с $M \geq 5.6$ в районе южной Камчатки. Природа возникновения выявленного краткосрочного предвестника землетрясений не ясна, так как возможны различные механизмы (подвижка по разлому, изменение путей миграции водорода и т.д.) генерации аномальных импульсов водорода. Обсуждаются эффекты взаимосвязи планетарной и региональной сейсмичности с аномальными импульсными выбросами подпочвенного водорода.

ВВЕДЕНИЕ

Камчатка является одним из наиболее простых по своему строению участков зоны субдукции Тихоокеанского сейсмического пояса, где сейсмичность достигает максимально известного на Земле уровня. Это позволяет считать ее перспективным полигоном для постановки и решения задач геодинамики, поиска предвестников сильных землетрясений и их прогноза. Исследования по прогнозу землетрясений на Камчатке проводятся уже более 30 лет [1–3]. За эти годы применительно к Камчатскому региону разработаны методы долгосрочного [2, 3] и находятся в стадии разработки методы среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений, которые успешно применяются на практике для текущей оценки сейсмической опасности в Камчатской области [3, 4]. На основе различных методов в последние годы сделан ряд успешных краткосрочных прогнозов времени, места и силы камчатских землетрясений в реальном времени. Для изучения природы и механизмов возникновения предвестниковых аномалий с разным временем упреждения необходимо комплексирование раз-

ных видов наблюдений. Данная работа посвящена выявлению связи динамики молекулярного водорода в подпочвенном газе по данным наблюдений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в 1999–2003 гг. с региональной и планетарной сейсмичностью, которые рассматриваются в качестве одних из показателей геодинамического процесса.

На протяжении всей геологической истории Земли из ее недр непрерывно выделяются потоки водно-газового флюида, которые заметно варьируют во времени и неравномерно распределены по поверхности нашей планеты, отражая ее геодинамический режим, блоковую структуру и размещение разломов [5–7]. Связь выделяющегося из земных недр молекулярного водорода с геодинамическими процессами впервые была выявлена для района Хибин (Россия) более 20 лет назад [8]. Полученные в последние годы данные наблюдений о вариациях концентрации молекулярного водорода в различных геоструктурных зонах Земли свидетельствуют о перспективности этого вида наблюдений для решения задач геодинамики и прогноза землетрясений. Показатель-

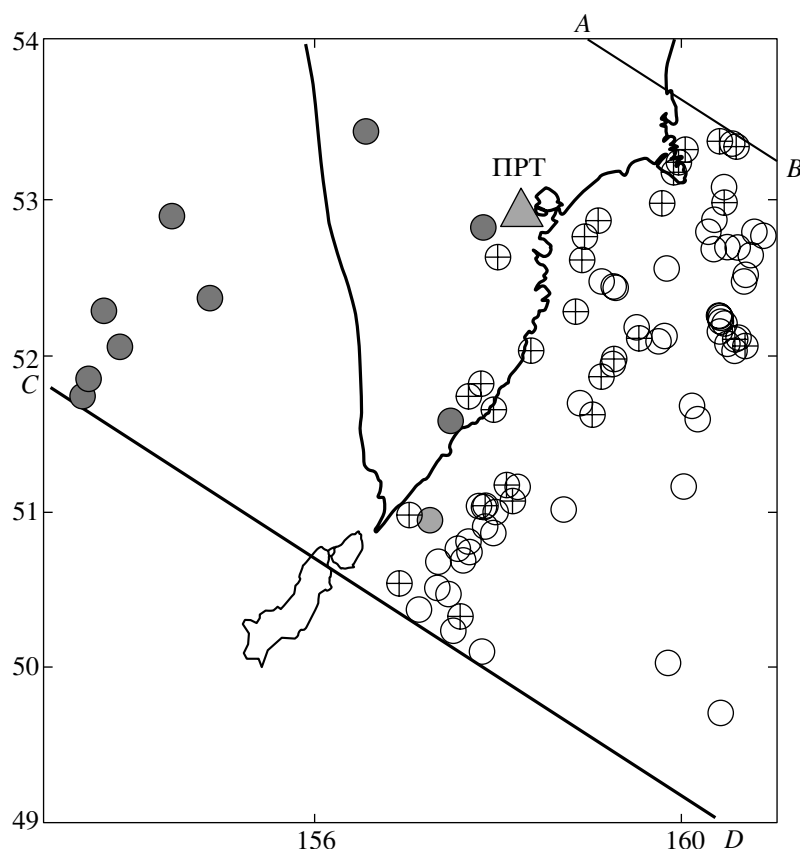


Рис. 1. Расположение пункта регистрации и карта эпицентров землетрясений с $M > 4.5$ южной Камчатки, произошедших в интервале от -120 до $+120$ суток от моментов возникновения импульсных выбросов водорода. Линиями АВ и CD показан сектор в котором рассматривалась сейсмичность. ПРТ – пункт наблюдения – Паратунка, ручей Коркино.

ным примером связи вариаций молекулярного водорода с сейсмичностью являются результаты наблюдений на двух станциях в Дагестане в 1998–2000 гг. [9]. В этот период вблизи от пунктов наблюдений на территории Дагестана и в акватории Каспийского моря произошло 2 сильных землетрясения: 1) 21 января 1999 г. с магнитудой $M = 6.5$; 2) 25 ноября 2000 г с $M = 6.2$. За 5 и 2.5 месяца до возникновения этих сейсмических событий начался устойчивый рост концентрации водорода от фоновых величин (2–3 единицы ppm) до 10 ppm перед землетрясением №1 и до 30 ppm перед землетрясением №2. В отдельные периоды времени продолжительностью от 0.5 до одного месяца рост концентрации водорода составлял в среднем около 0.5 ppm в сутки, что является неопровержимым свидетельством связи процессов разгрузки молекулярного водорода с геодинамическим режимом и сейсмичностью [9].

По предложению Г.И. Войтова с 1999 г. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне осуществляется регистрация молекулярного водорода в подпочвенном газе, где в период 1997–2001 гг. была организована сеть станций мониторинга объемной активности подпочвенного радона [4, 10]. Регистрация молекулярного водорода

проводится в опорном пункте ПРТ (Паратунка), который расположен в районе Паратунского месторождения термальных вод, приуроченного к грабену северо-восточного простирания, в 120–150 км от наиболее близко расположенных сильных землетрясений сейсмофокальной зоны Заварицкого-Беньюфа (рис. 1).

Совместная регистрация подпочвенного радона и водорода представляется целесообразной, так как физические и химические свойства этих газов совершенно различны (химическая инертность, малая тепловая адсорбция, небольшой период полураспада одного и высокая стабильность другого). Это позволяет считать данные этих эманацій в качестве характеристик поверхностного (радон) и глубинного (водород) процессов, происходящих в литосфере.

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОДПОЧВЕННОГО ВОДОРОДА, ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В качестве измерительного прибора концентрации молекулярного водорода (H_2) использовались водородные сигнализаторы геофизические

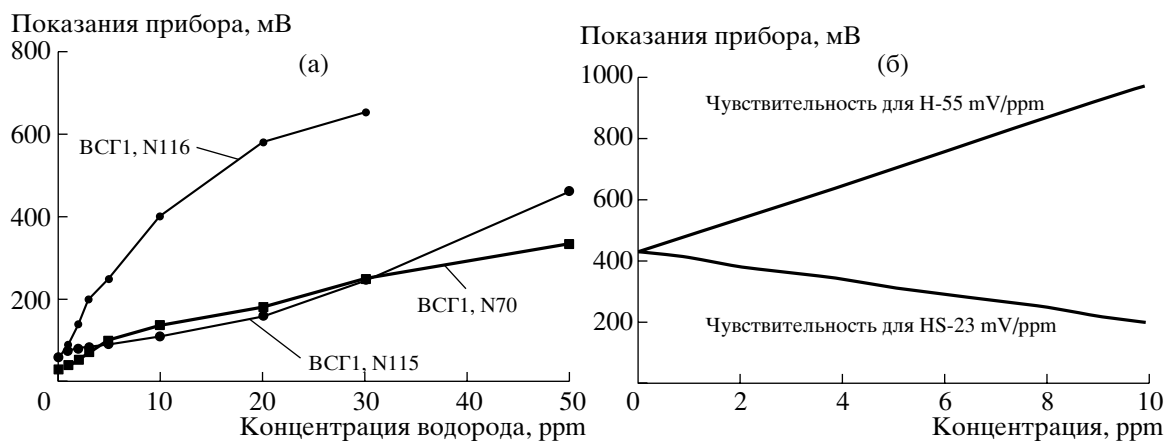


Рис. 2. Калибровочные кривые для приборов: а – водородный сигнализатор геофизический; б – газоанализатор сероводорода.

(VSG-1 и VSG-2) конструкции МИФИ [11]. Прибор состоит из чувствительного элемента, блока первичного преобразователя и электронного блока. Чувствительный элемент изготовлен на основе структуры Si-SiO₂-Pd, которая под действием водорода в воздухе изменяет емкость перехода металл-диэлектрик-полупроводник. Чувствительный элемент закреплен на блоке первичного преобразователя, сигнал с которого подается на электронный блок, имеющий аналоговый выход. Порог чувствительности прибора составляет 10⁻⁴–10⁻² об. % (1.0–100 ppm) для VSG-1 и 5 × 10⁻⁵–5 × 10⁻³ об. % (0.5–50 ppm) для VSG-2. Следует отметить, что каждый прибор имел свою индивидуальную характеристику чувствительности, поэтому при наличии калибровки на графиках приведена шкала значений в мВ и соответствующее значение концентрации водорода в ppm.

В качестве базовых наблюдений выбран разлом северо-восточного простирания в районе Паратунской геотермальной системы в долине ручья Коркино, где установлены приборы, позволяющие вести автоматизированную регистрацию подпочвенных газов с цифровой регистрацией сигналов на твердотельные накопители.

С июня 1999 г. до декабря 2001 г. регистрация H₂ осуществлялась с помощью самопишущего прибора НЗ99 в зоне аэрации. В ноябре 2001 г. водородный сигнализатор был установлен в зоне полного влагонасыщения на дне бункера глубиной 2.5 метра, где работает и в настоящее время. Регистрация в этом случае осуществляется с помощью 16-разрядного 6^{ти}-канального контроллера, изготовленного фирмой “КЛАССИК”. Частота дискретизации составляет 2 цикла/час.

В обоих случаях чувствительный элемент сигнализатора опускался в емкость, зарытую на глубине один метр от дна бункера с хорошей температурной стабилизацией. В процессе работы исполь-

зовалось несколько экземпляров VSG. На рис.2.а приведены калибровочные графики приборов, которые использовались в процессе работы. Кроме того, с 10 ноября 2002 г. параллельно с VSG-2 был установлен на работу газоанализатор, одновременно регистрирующий концентрацию водорода и сероводорода (СВГ-1), калибровочный график которого приведен на рис. 2б.

На первом этапе, в период работы с аналоговыми записями, два раза в сутки снимались показания с индикатора водородного сигнализатора, а по регистрограмме самописца НЗ99 отслеживались изменения динамики водорода с периодом в несколько часов. На рис.3а приведены кривые, построенные по показаниям приборов. Значение концентрации водорода варьирует от 2 до 7 ppm, что близко к фоновым концентрациям юго-восточного Предкавказья [9]. На рис.3а видна тенденция к повышению значений концентрации H₂ в зоне аэрации в зимнее время, причем амплитуда сезонных вариаций составляет около 4 ppm. При увеличении температуры воздуха в весенне-летний период проницаемость рыхлых отложений увеличивается и концентрация водорода несколько понижается за счет оттока его в атмосферу, что отмечалось в работе [12]. Аналогичный сезонный ход имеет и объемная активность R_n в этой точке [4]. На рис.3.б приведена динамика H₂ в зоне полного влагонасыщения, где велась цифровая регистрация с помощью контроллера. В этом случае сезонный ход не просматривается.

На рис. 3а видно, что в зоне аэрации в течение 11.1999–09.2001 гг. наблюдается слабо выраженный сезонный ход, на фоне которого были зарегистрированы импульсные сигналы (периоды появления которых отмечены стрелками на рис. 3а) длительностью несколько часов с превышением уровня фона не менее чем на 50% в абсолютных единицах (ppm). В зоне полного влагонасыщения также наблюдаются кратковременные импульс-

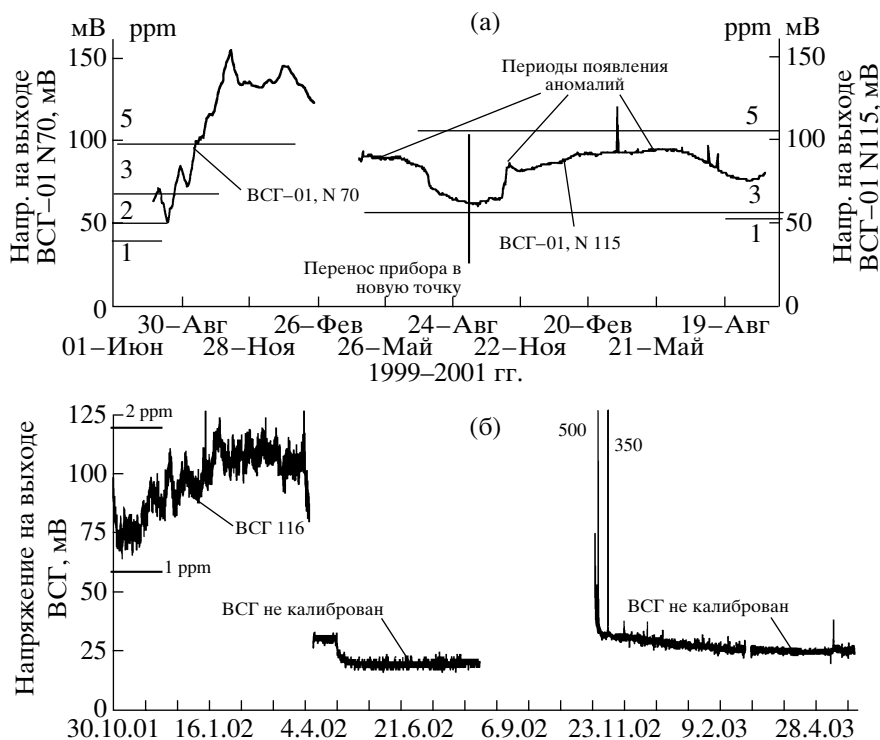


Рис. 3. Динамика молекулярного водорода в почвенном газе на станции ПРТ. а – зона аэрации, график показаний индикатора водородного сигнализатора с дискретностью 12 часов (стрелками отмечены моменты возникновения импульсных сигналов), б – зона полного влагонасыщения, цифровая запись с частотой 0.5 цикл/час.

ные всплески концентрации молекулярного водорода (рис. 3б).

Идентификация самих аномалий не требует специальных способов обработки, ввиду их четкой выраженности на уровне фона. На рис. 4 приведены сигналы, записанные самописцем и оцифрованные с дискретностью 5 сек., а на рис. 5 показаны импульсные сигналы, зарегистрированные в ноябре 2002 г. одновременно двумя приборами (ВСГ и СВГ). Как следует из сопоставления этих двух рисунков, импульсные сигналы имеют форму единичного импульса длительностью от 3 до 6 час. Передний фронт сигнала, записанного самописцем, формируется за счет постоянной времени самописца, а задний – за счет постоянной времени водородного сигнализатора. При цифровой записи происходит минимальное искажение переднего фронта, длительность которого составляет не более 0.5 часа (один отсчет). В таблице приведены основные параметры наиболее сильных импульсных выбросов молекулярного водорода в почвенном газе.

СОПОСТАВЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ПОЯВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ВОДОРОДА С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

Для проверки гипотезы о связи импульсов концентрации водорода с сейсмичностью исследова-

лась связь между моментами их появления с землетрясениями в Курило-Камчатской зоне с магнитудой $M \geq 4.5$, а также с сильнейшими землетрясениями Земли с $M \geq 7.6$ для периода 1999–2003 гг. С этой целью были составлены 2 каталога.

В каталог 1 включены землетрясения района южной Камчатки с магнитудой $M \geq 4.5$ и наиболее сильные землетрясения в Курило-Камчатской зоне с магнитудой $M \geq 7$. Событий с $M \geq 7$ было два. Одно из них произошло в центральной части Курило-Камчатской геоструктурной дуги 17 ноября 2002 г. на глубине 520 км ($M = 7.3$, данные NEIC GS USA), другое отмечено 16 июня 2003 г. в районе Кроноцкого полуострова (Камчатка) на глубине около 200 км ($M = 6.9$, данные NEIC GS USA). В дополнение к этим двум землетрясениям в каталог включены также землетрясения из района южной Камчатки по данным определений Качатской опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН, которые произошли в той части камчатского участка зоны субдукции, который ограничен линиями АВ и СД (рис. 1), проведенными перпендикулярно к соответствующему участку геоструктурной дуги. Из этой зоны выбраны землетрясения энергетического класса $K_{сф72} \geq 10.5$ [13], что, согласно зависимости $M = 0.5K - 0.75$, полученной

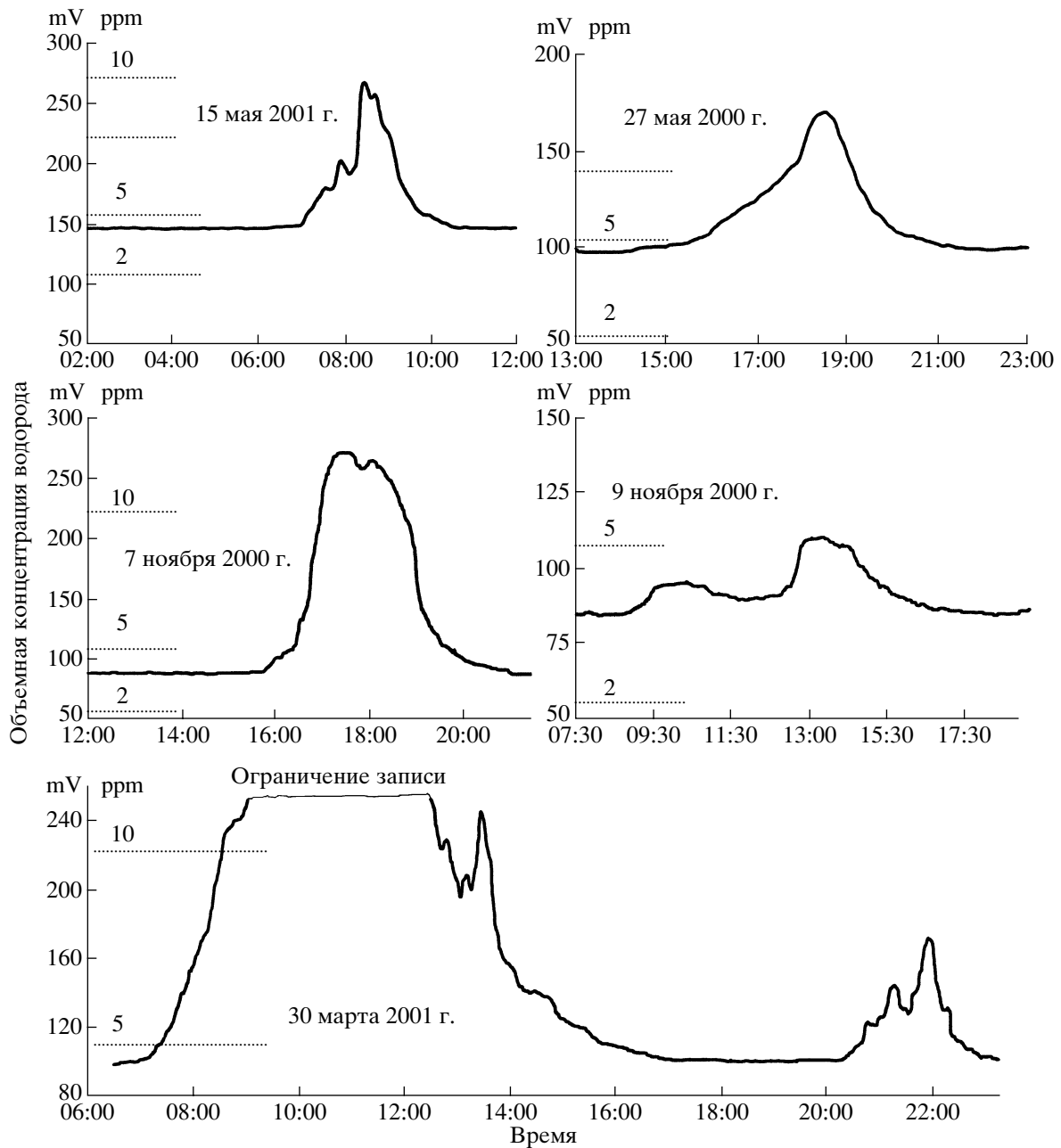


Рис. 4. Импульсные всплески концентрации молекулярного водорода в подпочвенном газе зоны аэрации. Аналоговая запись, оцифрованная с дискретностью 5 сек.

А.А. Гусевым¹, соответствует землетрясениям с локальной магнитудой $M \geq 4.5$. В каталог 2 включены наиболее сильные землетрясения Земли с магнитудой $M \geq 7.6$ по данным определений NEIS Геологической службы США (всего 20 событий).

Поиск связи времени возникновения импульсов водорода с вариациями сейсмического режи-

ма основывался на следующей методической процедуре. Каждый из импульсов водорода принимался за нулевой репер, относительно которого анализировалось распределение во времени землетрясений из соответствующего каталога на временном интервале 120 сут до и 120 сут после моментов появления импульсов водорода. Весь период продолжительностью 240 суток был разбит на 16 интервалов по 15 сут. Для каждого из интервалов рассчитывалось число попавших в него землетрясений, а затем применялся метод на-

¹ Отчет КОМСП ГС РАН. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке и Командорских островах в 1999 г. Петропавловск-Камчатский. 2000 г. Фонды КОМСП ГС РАН.

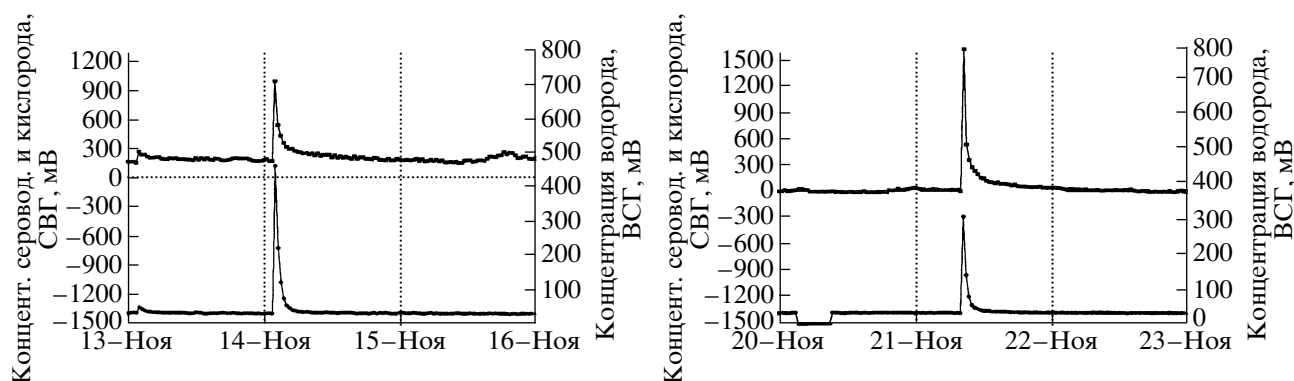


Рис. 5. Импульсные всплески концентрации водорода в подпочвенном газе зоны влагонасыщения в 2002 г., зафиксированные с помощью цифровой регистрации с дискретностью 30 мин.

ложения эпох. Такой подход позволяет получить некоторые средние зависимости распределения землетрясений относительно моментов появления импульсов водорода.

Предварительный анализ распределения землетрясений внутри 240-суточных периодов для каждого из реперов в отдельности показал, что периоды относительного сейсмического затишья сменяются фазами более высокой сейсмичности, причем для большинства из реперов (6 случаев из 7) максимум числа землетрясений приурочен к интервалу (–30 сут, 30 сут), т.е. события чаще всего происходили за месяц до и в течение месяца после появления импульсов водорода. Исключим из общей статистики данные для репера 16 мая 2003 г., для которого 120-суточный интервал после момента появления импульса водорода пока не закончился. Проанализируем сводную статистику для остальных 6 реперов. Как видно из рис. 6а, распределение чисел землетрясений по 16 выбранным интервалам заметно отличается от равномерного.

Минимумы числа землетрясений (от четырех до девяти событий) приурочены к крайним частям 240-суточного периода. Максимальное число

землетрясений (от 15 до 23) приурочено к интервалу (–30, 30) сут, т.е. чаще всего события происходят за месяц до и в течение месяца после моментов появления импульсов водорода. Существенно, что в течение семи 15-суточных интервалов подряд, в диапазоне от –90 суток до +15 суток, отмечается последовательный рост числа землетрясений от четырех событий до 23-х. Выявленная закономерность по критерию “восходящих” и “нисходящих” серий статистически значима с уровнем доверия более 0.99 [14]. Таким образом, в среднем изменение сейсмичности по отношению к выбранным нами реперам происходит во времени не случайно.

Проанализируем теперь распределение наиболее сильных землетрясений каталога 1 с локальной магнитудой $M \geq 5.6$, что соответствует событиям энергетического класса $K = 13$ и более (рис. 6б). Все 12 таких землетрясений приурочены к интервалу продолжительностью 96 суток от –53 до +43 суток. На краях 240-суточного периода землетрясения с $M \geq 5.6$ не происходили. Гипотеза о случайном распределении событий относительно моментов появления импульсов водорода по критерию знаков верна с уровнем доверия более 0.99

Основные параметры наиболее сильных импульсных выбросов молекулярного водорода в подпочвенном газе

Дата	Фон, ppm	Амплитуда сигнала, ppm	Длительность, часы	Примечание
15.05.2000	4	10	2.5	
27.05.2000	4	8	2.5	
07.11.2001	4	15	3	
29.03.2002	4	>18	6	Ограничение записи за счет малого динамического диапазона самописца.
	мВ	мВ	Часы	Прибор не калиброван, значение фона и амплитуда сигнала даны в мВ.
14.11.2002	35	500	3	
21.11.2002	35	350	3	
16.05.2003	25	40	1.5	

[2]. Как и в случае с более низким порогом событий ($M \geq 4.5$), подавляющее число землетрясений с $M \geq 5.6$ (10 из 12) приурочены к интервалу за месяц до и в течение месяца после моментов появления импульсов водорода.

Приведем теперь конкретные данные о тех сильных землетрясениях с $M \geq 5.6$, которые произошли после моментов появления импульсов водорода. После выбросов водорода 15 и 27 мая 2000 г. соответственно через 19 и 8 суток произошло землетрясение в районе Авачинского залива с $M = 5.8$. После выброса водорода 7 ноября 2000 г. спустя 43 дня в районе Авачинского залива произошло землетрясение с $M = 5.8$. Спустя 2 сут после репера 30 марта 2001 г. произошло землетрясение с локальной магнитудой $M = 5.6$. Через 3 сут после репера 14 ноября 2002 г. произошло землетрясение с $M = 7.3$ в центральной части Курило-Камчатской зоны субдукции. После репера 22 ноября 2002 г. землетрясения с $M \geq 5.6$ не было. Вероятно, пары близких по времени реперов (14 и 22 ноября 2002 г.) можно рассматривать в качестве одного кластера, причем сильное сейсмическое событие может произойти и в интервале между реперами, как это имело место в 2002 г. После репера 16 мая 2003 г. было 2 сильных землетрясения. Первое землетрясение с $M = 5.8$ произошло южнее Авачинского залива спустя 14 сут после появления импульса водорода, а второе отмечено севернее Авачинского залива ровно через месяц после него ($M = 6.9$). Таким образом, если близкие по времени пары реперов принимать в качестве кластеров, то во всех случаях после появления одиночных или близких по времени пар импульсов водорода в течение полутора месяцев после их возникновения имели место сильные землетрясения с магнитудой $M = 5.6$ и более. Этот результат имеет важное проностическое значение и будет обсужден в следующем разделе.

Рассмотрим теперь связь импульсов водорода с сильными землетрясениями Земли. В 2000–2003 гг., в течение которых зарегистрированы импульсы водорода, по данным каталога NEIC GS USA на Земле произошло 20 землетрясений с $M \geq 7.6$, 17 из которых – в Тихоокеанском поясе. Все события, кроме одного, группируются во времени. Общее число групп равно 6. Две группы продолжительностью 83 и 77 сут включают 4 и 6 событий соответственно. Продолжительность других четырех групп с числом событий от двух до трех не превышает 15 суток. В исследуемый период наиболее сильным было Аляскинское землетрясение с $M = 8.5$, оказавшееся последним в группе из 6 событий. Исходя из предположения, что уровень мировой сейсмичности заметно превышает фоновый в периоды появления групп, реперы водорода сопоставлялись только с группами сильных землетрясений мира с $M \geq 7.6$ с числом событий в группе не менее трех. Распределение группиру-

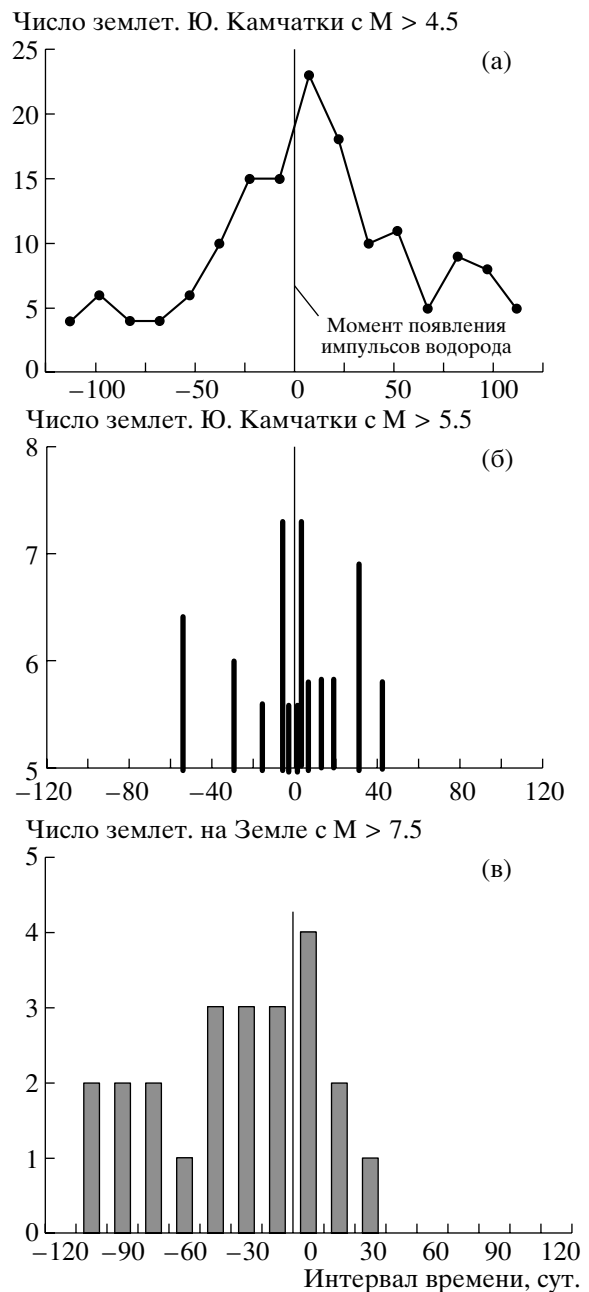


Рис. 6. Динамика подпочвенного водорода (а) и сероводорода + водорода (б) зоны влагонасыщения в 2002–2003 г.

щихся землетрясений по отношению к реперам водорода приведено на рис. 7в., на котором видно, что большинство землетрясений приурочено к интервалу от -105 до $+30$ сут. Лишь одно землетрясение произошло спустя 30 суток после момента появления импульса водорода. Гипотеза о неслучайности такого распределения землетрясений по критерию знаков [15] верна с уровнем доверия более 0.99 (20 событий против одного на 120-суточных по длительности интервалах).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Как уже отмечалось, на исследуемом участке субдукции землетрясения с $L \geq 10.5$ ($M \geq 4.5$) происходят крайне неравномерно во времени, что отражается, в частности, на рис. 6а и 6б. Наиболее часто землетрясения с $M \geq 4.5$ и с $M \geq 5.6$ происходят в интервале за месяц до и в течение месяца после моментов появления импульсов водорода. До достижения этого максимума число землетрясений $M \geq 4.5$ закономерно растет, а после него число землетрясений за короткое время достигает фонового значения. Длительность процесса, включающего фазу роста и последующего уменьшения числа землетрясений до фонового уровня, составляет в среднем около 5–6 месяцев. Если предположить, что выявленные нами эффекты связаны с процессами взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской тектонических плит, то находит свое объяснение связь между появлением импульсов водорода с наиболее интенсивными группами сильных землетрясений Земли. Обратим внимание на то, что большинство землетрясений 2000–2003 гг. с $M \geq 7.6$ произошло в Тихоокеанском сейсмическом поясе (17 событий из 20).

Многие исследователи считают, что глобальные ритмические изменения напряженно-деформированного состояния литосферы происходят под влиянием различных космических воздействий, к которым, главным образом, можно отнести приливные эффекты, солнечную активность, вариации вращательного движения Земли. Рассматриваемый ряд наблюдений является достаточно коротким, поэтому нас интересуют, главным образом, циклические изменения с характерными временами менее одного года. Для таких ритмов наиболее заметное влияние на сейсмотектонический процесс могут оказывать внутригодовые изменения скорости суточного вращения Земли, сезонные изменения различных общепланетарных факторов. В связи с необходимостью выполнения закона сохранения момента количества движения вращающегося геоида происходят глобальные и региональные процессы самоорганизации Земли. Это выражается, в том числе, в возникновении групп сильных землетрясений Земли, о которых говорилось ранее. Эти глобальные процессы могут приводить к перераспределению полей напряжений в различных регионах Земли. Землетрясения могут рассматриваться лишь как индикатор этого одновременно глобального, субрегионального и регионального сейсмотектонических процессов.

Таким образом, для сейсмотектонических процессов с характерным временем около полугода–год и менее можно рассмотреть такую гипотетическую цепочку взаимосвязанных явлений, приводящих, в конечном итоге, к появлению импульсов водорода на станции ПРТ. На планете происходят глобаль-

ные изменения напряженно-деформированного состояния, что выражается в закономерном уменьшении или увеличении скорости сейсмотектонических движений и в появлении временных групп сильнейших землетрясений в различных регионах Земли. В некоторых регионах Земли, в том числе в пределах Тихоокеанского сейсмического пояса, в этот период в течение нескольких месяцев процессы могут развиваться синхронно, что выражается в увеличении числа умеренных и более сильных землетрясений. Это можно видеть при сопоставлении рис. 6а, 6б и 6в. Когда в соответствующих сейсмоактивных объемах зон субдукции напряжения приближаются к критическим для соответствующего периода времени, в течение одного-двух месяцев повышается вероятность возникновения наиболее сильных землетрясений в соответствующем регионе или его части. В этот период происходят процессы самоорганизации не только в пределах сейсмофокальной зоны, но и в её окрестности. Процессы флюидопереноса могут стать активными на континентальной части Камчатки, в зонах соответствующих разломов. Можно предложить два механизма возникновения импульсов водорода: кратковременные подвижки по разломам, в пределах которых находится пункт регистрации водорода [16]; либо активизация транзитного переноса флюидов и других компонентов из мантии [17]. Эти предположения могут рассматриваться как самые предварительные.

Оценим возможности использования импульсов водорода в качестве краткосрочных предвестников землетрясений с $M \geq 5.6$ в районе южной Камчатки и наиболее сильных землетрясений в Курило-Камчатской зоне с $M \geq 7$. Под краткосрочным прогнозом мы имеем ввиду прогноз со временем упреждения до одного месяца. В 2000–2003 гг. было зарегистрировано 7 импульсов водорода, из которых 4 можно рассматривать как 2 пары близких по времени реализаций (2 кластера) и 3 импульса были одиночными. Всего имеем 5 случаев, для которых в ретроспективном плане оценим вероятность возникновения ожидаемых сильных землетрясений в течение месяца после моментов появления импульсов. Для пар импульсов за нулевой репер примем время возникновения первого импульса. Как указано в предыдущем разделе, в каждом из 5 случаев происходили землетрясения с $M \geq 5.6$. В четырех случаях они возникали в течение месяца после нулевого репера, в одном случае – через 43 дня после него. Таким образом, в 80% случаев импульсы водорода можно рассматривать в качестве краткосрочных предвестников землетрясений. Отметим, что в указанных четырех случаях дважды в течение месяца после импульсов происходили сильные землетрясения с $M \geq 7$ в Курило-Камчатской зоне и дважды отмечались события с $M \geq 5.6$ в районе южной Камчатки. Выявленные нами закономер-

ности можно использовать для целей краткосрочного прогноза в комплексе с другими методами прогноза.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Впервые на Камчатке с 1999 г. началась непрерывная регистрация вариаций молекулярного подпочвенного водорода. Регистрация молекулярного водорода проводится в одном пункте наблюдений, в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, в зоне разлома северо-восточного простирания, ориентированного вдоль простирания Курило-Камчатской островной дуги.

2. В 2000–2003 гг. на фоне слабо меняющегося фона концентрации подпочвенного водорода были зарегистрированы отчетливо выраженные интенсивные импульсы водорода. В некоторых случаях импульсные сигналы длительностью от 1.5 до 6 часов превышают уровень фона в несколько раз (до 1400%).

3. Зарегистрированные импульсные всплески водорода можно рассматривать в качестве краткосрочных (со временем упреждения менее одного месяца) предвестников сильных землетрясений с $M \geq 5.6$ в районе южной Камчатки и наиболее сильных землетрясений с $M \geq 7$ в Курило-Камчатской зоне субдукции. Вероятность оправданности такого прогноза составляет по имеющимся данным около 80%. Предлагаемый способ краткосрочного прогноза целесообразно использовать в комплексе с другими методами прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений.

4. Вопрос о природе зарегистрированных интенсивных импульсов водорода является дискуссионным. Известно, что в разломных зонах поток водорода неустойчив во времени. Изменение напряженно-деформированного состояния среды под действием тектонических сил может приводить к изменению путей миграции глубинного водорода, что будет отражаться в изменении концентрации H_2 в подпочвенном газе разломных зон, обладающих повышенной тензочувствительностью. Не исключено, что аномальные сигналы длительностью несколько часов в динамике поля подпочвенного водорода указывают на суперинтенсивные деформации, возникающие в контролируемом разломе [16]. С другой стороны при росте геомеханических напряжений в процессе подготовки сильных землетрясений, миграция флюидов по зонам глубинных разломов вдоль плоскостей расщепленных пород [17], также может привести к увеличению флюидного массопереноса с глубин и импульсному выбросу водорода в атмосферу в зонах активных разломов.

В заключении авторы выражают большую признательность Георгию Ивановичу Войтову за его содействие и техническую помощь в организации наблюдений за молекулярным водородом

в дом в подпочвенном газе на Камчатке, за плодотворные дискуссии по проблеме водородного дыхания Земли.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 02-05-64467.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викулин А.В., Дроздюк В.Н., Семенец Н.В., Широков В.А. К землетрясению без риска. Петропавловск-Камчатский. 1997. 120 с.
2. Федотов С.А., Чернышов С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1986–2000 гг., развитие метода и прогноз на 2001–2005 г.г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 3–24.
3. Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996–2000 г.г. с магнитудой $M = 6 - 7.8$ по комплексу сейсмологических данных. В сб. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петр.- К. 2001. С. 95–116.
4. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26–41.
5. Войтов Г.И., Добровольский И.П. Химические и изотопно-углеродистые нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах // Физика Земли. 1993. № 3. С. 20–31.
6. Войтов Г.И., Николаев И.Н., Рудаков В.П. и др. О потоках водорода в приземную тропосферу в геодинамически различных геоструктурных зонах Земли // Докл. РАН. 1995. Т. 334. № 1. С. 110–114.
7. Войтов Г.И. К проблеме водородного дыхания Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы международной конференции памяти академика П.Н.Кропоткина. М.:ГЕОС. 2002. С. 24–30.
8. Кравцов А.И., Войтов Г.И., Фридман А.И. и др. О содержании водорода в свободных струях в Хибиных // ДАН СССР. 1977. Т. 236. № 4. С. 975–978.
9. Урдуханов Р.И., Николаев И.Н., Войтов Г.И. и др. Нестабильности водородного поля атмосферы почв и подпочв как реакция на Дегестанские землетрясения 1998–2000 гг. // Докл. РАН. 2002. Т. 385. № 6. С. 818–822.
10. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997–1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33–47.
11. Быковский Ю.А., Козленков В.П., Николаев И.Н., Уточкин Ю.А. Высокодостоверный водородный сенсор на основе МДП-структуры. М.: Метрология, 1991. 30 с.
12. Рудаков В.П., Уточкин Ю.А. О мониторинге состояния геологической среды посредством непрерывных измерений вариаций концентрации водо-

- рода и радона подпочвенных отложений // *Геохимия*. 1993. № 9. С. 1368–1370.
13. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 113 с.
 14. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Основы моделирования и первичная обработка данных. Л.: Финансы и статистика. 1983. 473 с.
 15. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
 16. *Касьянова Н.А., Кузьмин Ю.О.* Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса. М.: Геоинформмарк, 1996. 55 с.
 17. *Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении. В кн. Проблемы глобальной геодинамики (Отв. ред. Д.В. Рундквист). ГЕОС. 2000. С. 204–224.