

Исследование предвестников землетрясений и извержений вулканов

**ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ
НА V 2017 – IV 2022 гг., ЕГО РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ; ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ГЛУБОКОГО ОХОТОМОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 24.V 2013 г., $M = 8.3$**

Федотов С.А.^{1,2}, Соломатин А.В.¹, Кирюхин А.В.¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

²*Институт физики Земли РАН, г. Москва, karetn@list.ru*

Введение

Уровень сейсмичности на Курило-Камчатской дуге являются наивысшим в России. Здесь в среднем раз в 5 лет происходят сильнейшие землетрясения с $M \geq 7.7$. Для мониторинга опасности таких землетрясений в Курило-Камчатском регионе с 1965 г. применяется и развивается метод долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова (ДССП). По данным ДССП в настоящее время сохраняется высокий уровень сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский, где вероятность 9-балльного катастрофического землетрясения в 3 раза больше средней для него. В работе рассматриваются последние результаты исследований по методу ДССП по апробированной методике и дан прогноз для Курило-Камчатской дуги на V 2017 – IV 2022 гг.

Представленные данные ДССП подтверждают необходимость продолжения и увеличения работ по сейсмобезопасности и предотвращению огромных ущерба и потерь в районе г. Петропавловск-Камчатский. Полученные оценки сейсмической опасности для Курило-Камчатской дуги используются, как это делалось с предыдущими прогнозами с 1985 г., для обоснования государственных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению этого форпоста России на Тихом океане.

Основы метода, прогнозируемые величины

В основе метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова лежит ряд фундаментальных свойств и закономерностей сейсмического процесса, изложенных в работах [3–5 и др.]: сейсмогенная зона Курило-Камчатской дуги является однородной структурой; процесс развития сейсмичности в очагах сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений региона происходит согласно сейсмическому циклу со средним периодом $T = 120\text{--}140$ лет; очаги следующих сильнейших землетрясений региона с вероятностью 0.8–0.9 располагаются между очагами предшествовавших таких землетрясений, в сейсмических брешах.

Долгосрочные сейсмические прогнозы даются для наиболее активной полосы сейсмогенной зоны Курило-Камчатской островной дуги на глубинах 0–80 км. Эта полоса длиной 2100 км и шириной 100 км делится в среднем на 20 участков. На основе ряда параметров сейсмического процесса за предыдущие 5 лет, а также времени предыдущего сильнейшего землетрясения для всех участков прогнозируются: стадии сейсмического цикла; наиболее вероятные места следующих сильнейших землетрясений – сейсмические брешы; значения сейсмической активности A_{10} ; магнитуды землетрясений средней силы, ожидающихся с вероятностями: 0.8, 0.5 и 0.15; M_{max} – максимальные магнитуды ожидаемых землетрясений; $P(M \geq 7.7)$ – вероятности сильнейших землетрясений; относительная опасность сейсмических брешей. Результаты сопоставляются с данными других методов сейсмического прогноза. Метод может применяться в других регионах со сходными сеймотектоническими условиями, а также использоваться для прогноза опасности больших цунами. Последнее изложение метода и прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг. приведены в работе [6].

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на V 2017 – IV 2022 гг.
(*Был сообщен 5.06.2017 г. губернатору Камчатского края В.И. Илюхину*)

Прогноз на 5-летний период V 2017 – IV 2022 гг. был построен по данным региональных каталогов КФ и СФ ФИЦ ЕГС РАН (<ftp://ftp.gsras.ru/pub/>) за предыдущее пятилетие: VI 2017 – V 2022 гг. Для анализа сейсмической обстановки на основе землетрясений с $M \geq 5$ использовался также каталог NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/>). Результаты прогнозов приведены в табл. 1 и на рис. 1. Погрешность определения вероятностей землетрясений с $M \geq 7.7$ для сейсмических брешей оценивается величиной 2–3 %.

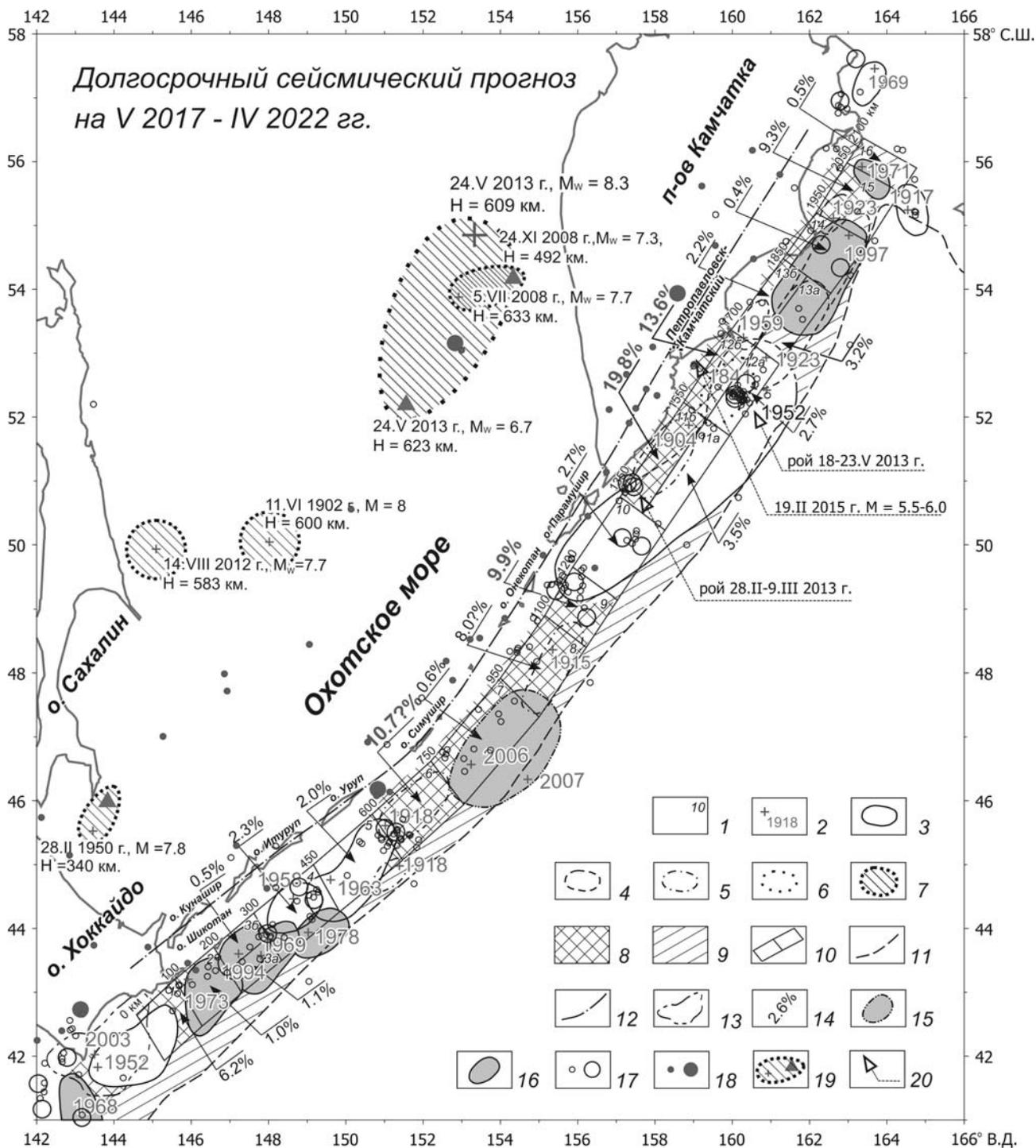


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902–2017 гг. с $M \geq 7.7$ и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) таких землетрясений в V 2017 – IV 2022 гг. во всех участках полосы прогноза: 1 – номера участков; 2 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3–6 – границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с разной точностью; 7 – предполагаемые области очагов глубоких землетрясений 2008 и 2012 гг.; 8, 9 – наиболее вероятные и возможные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 10 – границы участков прогноза; 11 – оси глубоководных желобов; 12 – ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 13 – границы очага землетрясения у Хоккайдо 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 14 – вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в V 2017 – IV 2022 гг., табл.1; 15 – область очага предсказанного землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$; 16 – области очагов других землетрясений с $M \geq 7.7$, которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 17 – эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период V 2012 – IV 2017 гг., меньший кружок, соответствует $mb = 5.0-5.9$, больший – $mb = 6.0-7.3$, $H < 80$ км; 18 – то же с $H \geq 80$ км; 19 – эпицентры и предположительные области очагов глубоких ($H > 300$ км) сильнейших землетрясений, треугольники – положение их главных афтершоков; 20 – рои землетрясений 28.II – 9.III 2013 г., $M_{max} = 6.9$, и 18–23.V 2013 г., $M_{max} = 6.1$, $H < 80$ км. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на V 2017 – IV 2022 гг. (H ≤ 80 км), построенный по параметрам A₁₀ и D

Участок, №	Δ, км	Район	Год предыдущего землетрясения с M ≥ 7.7	Стадия цикла и ее оценка по данным 2012-2017 гг. (IV 2012 г. – IV 2017 г.)				Прогноз на V 2017 – IV 2022 гг.							Вероятная очередность			
				Стадия	P(A)	P(D)	B = P(A)*P(D)	A ₁₀ (P~0.7)		M								
								A ₁₀	A ₁₀ ±σ	P~0.8	P~0.5	P~0.15	M _{max}	P(M≥7.7)%				
1	0 - 100	Мыс Смириха - п-ов Немуро	1952	III?	0.92	0.73	0.67	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	4.3	(5.6)	7	(6)	
2	100 - 200	П-ов Немуро - о-в Зелёный	1973	II				1.2	0.8-1.9	5.8	6.3	6.8		1.0	(0.9)			
3а	200 - 300	О-в Шикотан, Ю-В	1969	II				1.2	0.8-1.9	5.7	6.2	6.7		1.1	(1.1)			
3б	200 - 300	О-в Шикотан, С-З	1994	II				1.2	0.8-1.9	5.7	6.2	6.7		0.5	(0.4)			
4	300 - 450	О-в Итуруп	1958	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.3	(2.2)			
5	450 - 600	Пролив Фриза - о-в Уруп	1963	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.0	(1.9)			
6	600 - 750	Мыс Кастрикум - пр. Буссоль	1918	III?	0.95	0.49	0.47	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	10.3?	(9.6?)	4?	(4)	
7	750 - 950	О-в Симушир - пролив Крузенштерна	2006	I				1.4	1.0-2.6	6.0	6.5	7.0		0.6	(0.5)			
8	950 - 1100	О-в Шишкотан	1915	III?	0.82	0.67	0.55	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	8.7?	(9.2?)	5?	(5)	
9	1100 - 1200	О-в Онекотан - пролив 3-й Курильский	1952?	III	0.52	0.03	0.02	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	12.7	(12.5)	2	(2)	
10	1200 - 1350	О-в Парамушир - мыс Лопатка	1952	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.7	(2.6)			
11а	1350 - 1550	Юг Камчатки, Ю-В	1952	II				0.8	0.6-1.1	5.8	6.3	6.8		3.5	(3.5)			
11б	1350 - 1550	Юг Камчатки, С-З	1904	III	0.61	0.01	0.01	1.3-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	25.7	(25.0)	1	(1)	
12а	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шигунский, Ю-В	1952	II				1.2	0.8-1.9	5.7	6.2	6.7		2.7	(2.6)			
12б	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шигунский, С-З	1841	III	0.51	0.72	0.37	1.2-3	0.8-4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	12.3	(10.8)	3	(3)	
13а	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	1923	III?	0.95	0.98	0.92	1.2-3	0.8-4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	1.5	(3.3)	8	(8)	
13б	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, С-З	1959	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.2	(2.1)			
14	1850 - 1950	П-ов Кроноцкий	1997	II				1.2	0.8-1.9	5.8	6.3	6.8		0.4	(0.4)			
15	1950 - 2050	Зал. Камчатский	1923	III	0.64	0.94	0.60	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	5.1	(5.1)	6	(7)	
16	2050 - 2100	П-ов Камчатский	1971	II				0.8	0.6-1.1	5.7	6.2	6.7		0.5	(0.5)			
				Оценка критических значений вероятностей				0.062	0.308	0.019	Σ = 100							

Примечание. В табл. даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на V 2017 – IV 2022 гг. Для всех 20 участков дуги указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с M ≥ 7.7 не происходили в течение последних 80 лет и где значительна вероятность прихода заключительной, III стадии сейсмического цикла. Знаками вопроса отмечены те из участков, в которых вероятность такого события меньше. 1-В – параметр, показывающий относительную опасность сейсмических брешей; A₁₀ – сейсмическая активность; P ~ 0.8, 0.5, 0.15 – вероятности землетрясений с M = 5.7-7.2, M_{max} – максимальная возможная магнитуда; P(M ≥ 7.7) – прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений. Значения вероятности P(M ≥ 7.7) в скобках соответствуют их величинам на XI 2016 – X 2021 гг. Средняя долговременная величина P(M ≥ 7.7) = 3.6-4.2%.

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на V 2017 – IV 2022 гг. заключаются в следующем. Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ и глубиной очагов $H \leq 80$ км, как и в предыдущем прогнозе на период IX 2016 – VIII 2022 гг., остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский и Южной Камчатки. Для Южной Камчатки (участок 11б, рис. 1, табл. 1) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 20.0%; для Авачинского залива (участок 12б, рис. 1, табл. 1) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$, имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский – 13.7%.

Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в участках 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б, которые могут иметь силу 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, может достигать 45.3% и более в период времени V 2017 – IV 2022 гг. При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловск-Камчатский землетрясения силой 9 баллов равняется 13.7%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 31.6%.

Опасность землетрясений силой 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский в этот период в 3–4 раза больше их средней долговременной опасности в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, которая является наибольшей в сейсмичных областях РФ.

Повышена сейсмическая опасность в сейсмической брешии залива Камчатский (участок 15, рис. 1). Вероятность сильнейшего землетрясения здесь оценивается величиной $P(M \geq 7.7) = 9.3\%$.

На Курильских островах наиболее высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (6, 8 и 9 участки, рис. 1, табл. 1) – общая вероятность сильнейшего землетрясения $M \geq 7.7$ для данного района сохранилась и составляет 28.1%, при этом, в участках 6 и 8 находятся концы главных разрывов Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г., $M = 8.2$, рис. 1. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в 8 участке на период V 2017 – IV 2022 гг. является 2–3 по величине – 12.4?%, а в 6 участке – 9.9?%.

Значения вероятности сильнейшего землетрясения в 6 и 9 участках на период V 2017 – IV 2022 гг. оцениваются величинами 10?% и 10%, а в 8 участке – 8.1?%¹.

Участок 1 возле п-ова Немуро является седьмым по степени опасности: $P(M \geq 7.7) = 6.3\%$.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений равна средней (3.6–4.2%) или существенно, до 10–15 раз, ниже ее.

Дополнительную значительно меньшую опасность по всей Курило-Камчатской дуге представляют землетрясения, очаги которых располагаются вне выделенной наиболее активной полосы зоны.

Значение и необходимость продолжения рассмотренных исследований и работ РАН по долгосрочному сейсмическому прогнозу

Сильнейшее землетрясение в районе г. Петропавловск-Камчатский может быть самым тяжелым стихийным бедствием на Дальнем Востоке России. Стоимость ущерба может превысить 2 трлн. рублей, а число погибших составить несколько десятков тысяч. Основной причиной угрозы таких потерь является то, что до начала 70-х годов сейсмостойкость строительства была здесь недостаточной, так как принятая балльность была заниженной. До этого времени она считалась равной 8, и не было каменных строений с большей устойчивостью. Долгосрочные сейсмические прогнозы для наиболее сейсмичного региона РФ, Курило-Камчатской дуги, а также предупреждения о необходимости проведения заблаговременных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению в его наиболее опасном месте, районе г. Петропавловск-Камчатский, в период 1985–2017 гг. послужили основанием многих Правительственных распоряжений и постановлений о подготовке Камчатской области (края) к сильным землетрясениям [5, 6 и др.]. По данным, приведенным Губернатором Камчатского края В.И. Илюхиным, в это время только в 2009–2015 гг. было проведено сейсмоусиление 45 и построено 35 больших жилых домов. Вместе с тем в Камчатском крае еще остается 1150 объектов жилищного назначения, имеющих дефицит сейсмостойкости, общей площадью 1.86 млн. кв. м. Они составляют 25% площади жилищного фонда края.

Жизненно важным достижением является то, что с начала 70-х годов до нашего времени до 75% от общей площади жилищного фонда увеличена площадь жилых домов, имеющих необходимую

¹ Знак вопроса в табл. 1 для участков 6 и 8 поставлен потому, что указанный уровень опасности может быть завышен вследствие продолжающегося влияния роя афтершоков близкого Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, а также вследствие откликов на сильнейшее глубокое землетрясение 14.VIII 2012 г., $M = 7.7$.

устойчивость. Однако при имеющемся в последние годы объеме работ на повышение устойчивости или замену домов с дефицитом сейсмостойкости, на завершение этих мер могут понадобиться многие дальнейшие десятилетия, и катастрофические потери станут неизбежными. При сохраняющейся чрезвычайно высокой сейсмической опасности в Камчатском крае, особенно в районе г. Петропавловск-Камчатский, должны продолжаться и развиваться необходимые меры по сейсмоукреплению и исследования по долгосрочному сейсмическому прогнозу, которые относятся к наиболее важным научно-прикладным работам РАН на Дальнем Востоке России.

Исследование структурных особенностей сейсмических процессов, предвещающих сильнейшие землетрясения Курило-Камчатского региона и прилегающих областей

Предложен и многие годы применяется ряд дополнений к методу ДССП [5, 6] и др. Среди них начаты оценки влияния текущих особенностей развития сейсмического процесса в регионе на уровень сейсмической опасности.

В рамках этого направления проводятся исследования по выделению ориентированных плоскостей – кластеров гипоцентров землетрясений. Идея выделения плоскоориентированных кластеров сейсмических событий, отражающих развитие трещинных нарушений в вулканических постройках, применялась в [1, 2]. Предполагается, что подобные исследования Курило-Камчатской сейсмогенной зоны приведут к выяснению совместной роли сейсмичности и тектоники в процессе подготовки сильнейших землетрясений региона на примере Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M=7.8$, и Жупановского землетрясения 30.I 2016 г., $M=7.2$ (и последовавшего извержения Жупановского вулкана). Рассматривалось влияние на сейсмичность региона сильных землетрясений прилегающих областей – Северо-Восточной Японии и Командорских островов, в связи с произошедшими в них сильнейшими землетрясениями 11.III 2011 г., $M=9$ и 17.VII 2017 г., $M=7.8$. Продолжалось исследование вопроса об изменениях сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский, связанных с сильнейшим глубоким Охотоморским землетрясением 24.V 2013 г., $M=8.3$ [6].

Предполагается также исследование связи активизаций плоскоориентированных кластеров землетрясений и удаленных форшоков в качестве развития хорошо зарекомендовавшей себя методики краткосрочной оценки сейсмической опасности на основе сценария форшоков, используемого в методе долгосрочного сейсмического прогноза ДССП [5].

Рассматриваемые исследования велись по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН, проект ДВО РАН № 15-I-2-035 «Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: продолжение прогноза, обоснование мер по повышению сейсмостойкости, развитие метода и применение в других регионах мира».

Список литературы

1. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // «Вулканология и сейсмология». 2016. № 5. С. 1–18.
2. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А., Черных Е.В. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
3. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды Ин-та физики Земли АН СССР. № 36 (203). М.: Наука, 1965. С. 66–93.
4. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
5. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.
6. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V 2013 г., $M=8.3$ // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 3–21.

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ «ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗОН» ЗЕМНОЙ КОРЫ ПРИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА КАМЧАТКЕ

Кузьмин Ю.Д., Полежаев В.А.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
kuzu@emsd.ru, polet@emsd.ru

Введение

Основной задачей данной работы было исследование геолого-структурной обстановки отдельно взятого района на примере Карымшинского полигона с позиции «чувствительных зон» при выявлении предвестниковых эффектов землетрясений, предложенной и разработанной И.Г. Киссиным [6, 7] по аномальным вариациям уровня подземных вод в скважинах. Структурно эти зоны приурочены к разломам и к узлам крупных тектонических нарушений. С позиции этой концепции пункт наблюдения, расположенный в «чувствительной зоне» может оказаться информативнее, чем все другие, даже более близкие к очагу землетрясения, но расположенные в иных геолого-структурных условиях. В этой концепции, чувствительные зоны определялись по одному параметру – колебаниям уровня подземных вод, относящихся к гидродинамическим предвестникам. Однако такие чувствительные зоны могут выделяться и по гидрогеохимическим данным.

Методика исследований

Для проведения работ по данной тематике нами была выбрана Верхне-Паратунская гидротермальная система (ВП ГТС), как расположенная в сложном геолого-структурном и тектоническом районе Южной Камчатки, хорошо изученная, круглогодично доступная. Методика выполнения базировалась на многолетних режимных наблюдениях, проводимых лабораторией гидросейсмологии на Карымшинском полигоне [8, 15, 16, 18], дешифрировании АФС, изучении и анализе структурно-геологической обстановки по результатам многочисленных геологических и гидрогеологических съемок ПГО «Камчатгеология» [1, 4, 6, 17].

Представленная карта-схема чувствительных зон базируется, прежде всего, на структурно-тектонических элементах Верхне-Паратунского участка, составной частью которого является Карымшинский полигон (рис. 1).

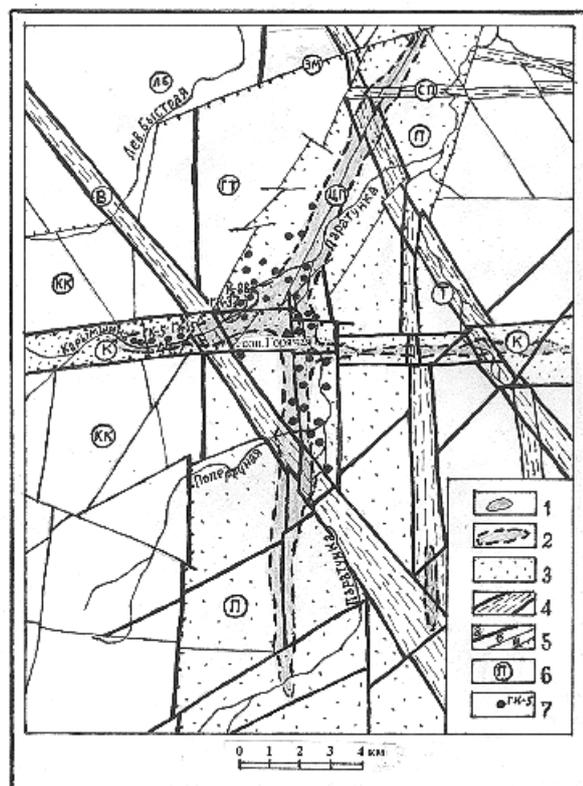


Рис. 1. Карта-схема чувствительных зон Карымшинского полигона.

Чувствительные зоны: 1 – первого порядка, 2 – второго порядка; перспективные структуры (3–4): 3 – грабены, 4 – разломные зоны; 5 – разломы: первого порядка (а), более мелкие (б), с указанием падения смесителя (в); 6 – названия тектонических структур: Паратунский грабен (П), Карымшинский грабен (К), горст хребта Тополового (ГТ), Лево-Быстринская депрессия (ЛБ), зона развития преимущественно клиновидных блоков (КК), Тополовская разломная зона (Т), Вилочинский разлом (В), Средне-Паратунская разломная зона (СП), взброс Зайкина Мыса (ЗМ), Вилочинско-Паратунский меридиональный взброс (ВП), Центрально-Паратунский субмеридиональный разлом (ЦП); 7 – буровые скважины (номер обозначен только у мониторинговых ЛГС)

В геологическом отношении район характеризуется интенсивным проявлением разрывной тектоники, предопределившей общий структурный план территории: заложение Паратунского грабена, блоковое строение кристаллического фундамента, общее погружение Паратунской депрессии с наклоном к востоку, что и обусловило основные черты гидрогеологических, геотермических, гидрохимических, гидродинамических особенностей ВП ГТС.

Верхне-Паратунская ГТС генетически связана с Карымшинским вулканоплутоническим комплексом и горстовым поднятием Тополового хребта. В островодужную стадию в олигоцен-миоцене здесь действовал долгоживущий вулканический центр, в границах которого формировался вулканогенно-осадочный вилючинско-паратунский комплекс пород. В его строении принимали участие вулканогенно-осадочные образования, среди которых получили широкое развитие водонепроницаемые черные аргиллиты, слагающие верхние части разрезов вилючинско-паратунского комплекса. В плиоценовое время в данном районе сформировался обширный коровый магматический очаг. В голоценовое время произошла активизация вулканической деятельности, в результате которой образовалась экстрюзия – сопка Горячая. Вблизи нее наблюдается тепловая аномалия, которая свидетельствует об аномальном подтоке глубинного тепла в северной части этой сопки и у подножья. Предполагается, что на пересечении двух систем разломов (субмеридиональной и субширотной) размещается обширный коровый остывающий очаг, который сформировал очаг нагрева ВП ГТС и обусловил их поверхностную разгрузку. Возраст этой экстрюзии определяется границей верхнего плейстоцена и голоцена [2, 4].

Главная структурообразующая роль на территории ВП ГТС принадлежит, прежде всего, Паратунскому грабену.

Паратунский субмеридиональный грабен (П) представлен своеобразной мозаикой блоков. Восточное ограничение грабена прослеживается вдоль подножья правого борта Паратунской депрессии – хребта Берегового. Западный контур – совпадает с подножьем хребта Тополового. Граничные субмеридиональные разломы имеют плоскости смесителя, ориентированные в сторону погружения под углами 70–80°, наиболее выраженные в южной части. Внутренняя структура грабена представляет собой клавишно-глыбовую систему, в общем случае, элементов отрицательного погружения. Общая суммарная амплитуда погружений, определенная геологическими методами, по разности абсолютных отметок одних и тех же горизонтов в хребте Тополовом и в скважинах долины р. Паратунка на разных участках оценивается в 600–800 м и достигая 1 км к осевой части – Центрально-Паратунскому разлому (ЦП), а в районе сопки Горячей амплитуда не превышает 200 м [1, 5]. Анализ данных о поперечных структурах, осложняющих дно Паратунского грабена показывает общее погружение блоков к северу. Центрально-Паратунский разлом Б.И. Пийп еще в 30-х гг. называл Паратунской термальной линией [12].

Карымшинский грабен (К) субширотного простирания пересекает Паратунский грабен и образован целой серией нарушений, самые крайние из которых имеют падения смесителей навстречу друг другу под углами порядка 60°. В целом, его можно считать субширотной грабенообразной разломной зоной или депрессией. Время образования структуры относится к концу среднего миоцена [4].

Горст хребта Тополового (ГТ) – горстоподобная структура общего субмеридионального простирания. Границы ее определяются системой разновозрастных тектонических нарушений. К северу от взброса Зайкина Мыса преобладают субмеридиональные линеаменты, юго-западнее структура имеет мозаично-блоковое строение с четко выраженной ролью меридиональных, субмеридиональных и субширотных разломов. Амплитуда вертикальных перемещений пород в блоках достигает первых сотен метров. Горизонтальная составляющая смещений оценивается в отдельных случаях до 150–200 м. Начало формирования структуры, выраженное в поднятии и консолидации блока на участке Зайкин Мыс – сопка Горячая, относится к нижнему миоцену. Окончание – с заложением субмеридиональных разломов в нижнем плейстоцене [2, 4].

Зона развития преимущественно клиновидных блоков (КК) выделяется в западной части и подчеркивает клавишно-блоковое строение территории. Эта зона слагает приподнятое, в общем плане, крыло Паратунского грабена.

Тополовская (Т) и Вилючинская (В) разломные зоны имеют определяющее для всей Малкинско-Петропавловской складчато-глыбовой зоны северо-западное простирание.

Вилючинская разломная зона (Вилючинский линеамент, Вилючинский глубинный разлом) состоит из серии кулисообразных разломов с близвертикальным падением смесителей [1, 4, 5]. Зона прослеживается от восточного побережья Южной Камчатки через подножье Вилючинского вулкана в Начикинскую депрессию. Поперечная к разломам зона (линеамент) разбита на отдельные сегменты с

различными амплитудами смещения, достигающие до первых сотен метров. Заложилась зона в нижнем миоцене и была активна в четвертичную эпоху.

Тополовская разломная зона представляет собой узкую грабеноподобную структуру с максимумом погружения в осевой части около 300 м. Возраст образования – конец нижнего миоцена [4].

Описанные тектонические структуры имеют важное значение для представления о сложной напряженно-деформационной обстановке района, характеризующейся широким развитием обстановок общего сжатия (горст хребта Тополового, зоны развития клиновидных блоков на западе и востоке района) и **растяжения** (Паратунский и Карымшинский грабены).

Особенностью исследований Карымшинского участка ВП ГТС является изучение газогидрогеохимического состава природных термальных вод традиционным мониторинговым опробованием через 6 дней, уже на протяжении 30 лет на трех скважинах (ГК-5, ГК-15, № 44). Для постановки экспериментальных и режимных наблюдений на ВП ГТС были организованы автоматизированные гидрогеохимические наблюдения: термодинамические (P , T) и газовые (водород) с начала на скважине К-88, а с 2014 г. – на скважине ГК-37 с интервалом между измерениями от 1 минуты до 1 часа; измерения радона, торона и водорода в 4-х метровой сухой измерительной скважине и приповерхностном слое земли. Для производства термодинамических и геохимических наблюдений была изготовлена и установлена проточная система измерений на устье скважины [11].

Обсуждение результатов

Известно, что подземная гидросфера – один из наиболее чувствительных индикаторов напряженно-деформационного состояния природной среды, изменение которого зачастую связано с процессами подготовки и реализации землетрясений [10, 13, 14]. С нашей точки зрения, наиболее информативными, чувствительными зонами для выявления предвестниковых эффектов землетрясений служат не только, и не столько, узлы пресечения крупных разломов (а таковых великое множество, поэтому трудно установить чувствительные), а участки пересечения структур растяжения (грабенов), особенно расположенные вблизи краевых пограничных частей (скв. ГК-37, К-88). Зоны грабенов наиболее трещиноваты и насыщены газом-водным флюидом, посредством которого, согласно общеизвестному закону Б. Паскаля, передаются накапливающиеся напряжения по водонасыщенным межблочным прослойкам, что изменяет напряженно-деформационное состояние горных пород. Такие зоны можем считать чувствительными зонами первого порядка.

Чувствительность зоны подтверждается наблюдениями за термодинамическими параметрами скважины ГК-37, которые показывают, что для данной гидротермальной системы имеется внешний регулярно возмущающий фактор, на который система избирательно откликается в виде определенного вида околосуточных флуктуации (рис. 2), механизм которых предстоит еще выяснить.

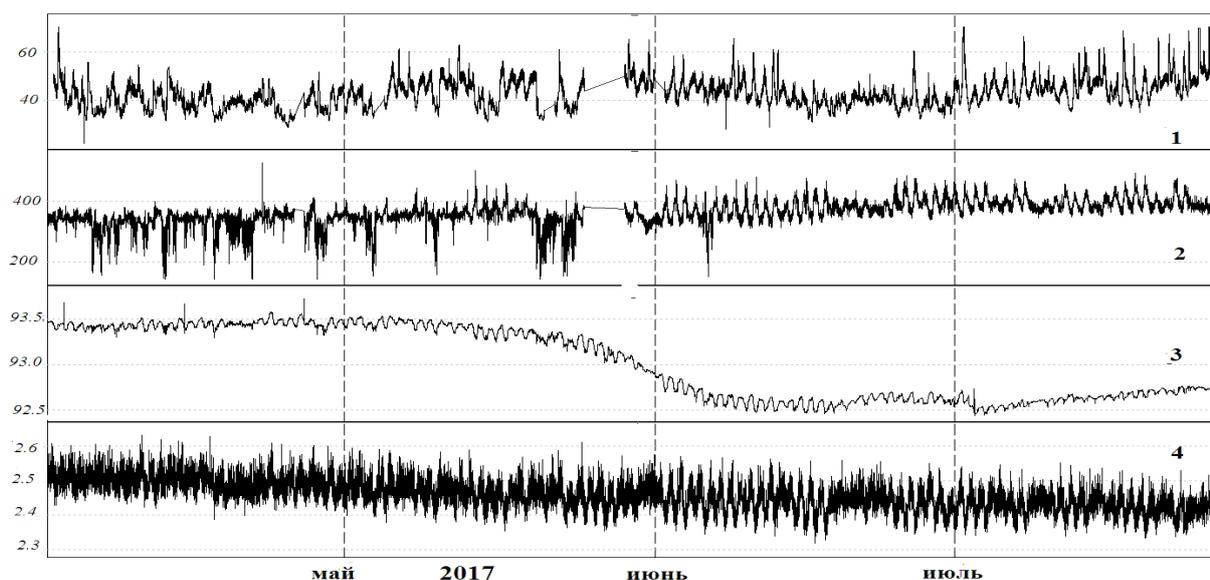


Рис. 2. Графики изменения: концентрации растворенного водорода в 4-х метровой измерительной скважине, в мВ (1); концентрации водорода в скважине ГК-37, в мВ (2); температуры термальной воды на устье скважины ГК-37, в град. С (3); давления в измерительной системе скважины ГК-37, в атм. (4)

Это явление подтверждает вывод, сделанный в [3], где отмечается, что одновременно процессы в природных средах могут характеризоваться множеством ритмов (полиритмичность), находящихся в определенных иерархических соотношениях, при этом в некотором интервале времени может доминировать один из них или группа ритмов. При этом отдельно взятые объемы литосферы характеризуются собственными режимами вариаций состояния системы. В этих наблюдениях также проявляются факторы, указывающие на экзогенную и эндогенную природу воздействий на гидротермальную систему. Экзогенная природа может проявляться в виде сезонного таяния снега, изменения температуры и атмосферного давления в данном районе; эндогенная природа – в виде изменения регионального теплового потока, определяющего температуру и давление в подземной гидросфере Южной Камчатки, с которой Верхне-Паратунская гидротермальная система связана по законам гидродинамики закрытых сред.

Информация скважины ГК-37, расположенной в чувствительной зоне первого порядка, в зоне восходящего теплового потока (термодинамические и газовые параметры), может быть определяющей для понимания эндогенного механизма в объемном деформографе и связанного с ним напряженно-деформационного поля ВП ГТС. Скважина этой зоны пригодна также и для мониторингового опробования по традиционной методике на макрокомпоненты и углеводородные газы.

Мы выделяем также чувствительные зоны второго порядка в наиболее погруженных, как правило, центральных частях крупных грабенов при пересечении их более мелкими разломами. В такой зоне Карымшинского грабена расположены скважины ГК-5, ГК-15 и № 44. В них за весь период наблюдений, начиная с 1992 года, характерным прогностическим признаком являлось резкое увеличение дисперсии изменения концентрации углеводородных газов практически перед всеми крупными сейсмическими событиями, в некоторых случаях наблюдались изменения средних значений концентраций макрокомпонентов. Реакция на Кроноцкое землетрясение (5.12.1997) выражалась в уменьшении за несколько месяцев концентраций хлора и в положительных аномалиях всех углеводородных газов [15, 18]. Такие зоны могут проявляться, по нашему мнению, и при пересечениях крупных разломных зон.

Заключение

В целом, Карымшинский полигон можно представить в качестве своеобразного природного объемного деформографа, реагирующего на разные геотектонические и техногенные воздействия [9], расположенного как в региональной, так и в глобальной гидродинамически связанной подземной гидросфере.

Выделенные чувствительные зоны – первый опыт таких построений в регионе. Они могут служить для определения наиболее перспективных скважин (объектов) при гидрогеохимических исследованиях, как научно-прикладного – выявления предвестников землетрясений, так и фундаментально-научного характера, заключающихся в изучении режимов вариаций параметров состояния литосферы.

Список литературы

1. *Апрелков С.Е., Иванов Б.В., Попруженко С.В.* Тектоника и геодинамическая эволюция юго-восточной Камчатки (Петропавловский геодинамический полигон) // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 3. С. 16–28.
2. *Белоусова С.П.* Экструзия сопки Грячей в долине р. Паратунки и ее роль в образовании Верхне-Паратунских термальных источников // Вулканизм и связанные с ним процессы. Выпуск 3. Геотермия, действующие гидротермальные системы и рудообразование. Тезисы докладов VI Всесоюзного вулканологического совещания, Петропавловск-Камчатский, сентябрь 1985 г. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 19–20.
3. *Гамбурцев А.Г.* Человек и земля, окружающие среды // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 4. М.: ООО «Светоч Плюс», 2009. 336 с.
4. Государственная карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI, N-57-XXVII, N-57-XXXIII. Объяснительная записка. Составитель В.С. Шеймович. М.: 2000. 302 с.
5. *Зимин В.М., Ворожейкина Л.А., Демченко Л.Д., Заненкова Т.К.* Сводный отчет о комплексных геологосъемочных, поисковых и специальных гидрогеологических работах масштаба 1:50 000, проведенных Паратунским съемочным отрядом в 1967–1971 гг. Елизово. ТГФ Камчатгеолкома, 1972.
6. *Киссин И.Г.* Чувствительные зоны земной коры, амплитуды аномалий предвестников землетрясений // Доклады АН СССР. 1985. Т. 270. С. 574–577.
7. *Киссин И.Г.* Новые данные о «чувствительных зонах» земной коры и формирование предвестников землетрясений и постсейсмических эффектов // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. С. 548–565.

8. Кузьмин Ю.Д., Рябинин Г.В. Мониторинг газового состава и гидрохимических параметров гидротермально-магматических систем // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма. Петропавловск-Камчатский, 2005. С. 328–342.
9. Кузьмин Ю.Д. Гидротермальная система как газотермодинамический индикатор деформационных процессов в земной коре // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды III региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9 – 15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 223–227.
10. Кузьмин Ю.Д. Реакция подземной гидросферы на деформационные процессы в литосфере Земли // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды IV региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 69–73.
11. Кузьмин Ю.Д. Результаты предварительных измерений термодинамических параметров на Верхне-Паратунской гидротермальной системе // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды IV региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 74–78.
12. Пийп Б.И. Геологические исследования Малкинских, Начикинских, Банных и Паратунских термальных горячих источников на Камчатке. ТГФ Камчатгеолкома, 1935.
13. Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д. Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 36–42.
14. Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Кузьмин Ю.Д., Солодчук А.А. Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферно электрического полей у границы земная кора – литосфера перед землетрясением // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. № 3. С. 72–78.
15. Рябинин Г.В. Гидрогеохимические предвестники землетрясений в высокосейсмичном регионе: на примере юго-восточной части полуострова Камчатка: диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.03. Москва, 2007. 170 с.
16. Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 13. № 1. С. 107–122.
17. Смирнова Н.Ф. и др. Сводный отчет о результатах поисково-разведочных работ на Верхне-Паратунском месторождении термальных вод, проведенных в 1966–1980 гг. с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 17 мая 1980 г. ТГФ Камчатгеолкома, 1980.
18. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4 С. 34–42.

ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УЧАСТИЕ ГАЗА В ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФАХ НА СУШЕ И МОРЕ

Обжиров А.И., Шакиров Р.Б.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ) ДВО РАН, г. Владивосток,
obzhirov@poi.dvo.ru*

Введение

Лаборатория Газогеохимии ТОИ ДВО РАН выполняет изучение распределения природных газов в воде и донных осадках Охотского моря с 1984 года. Концентрации метана, тяжелых углеводородов (С₂-С₄), углекислого газа, водорода, гелия и их соотношения использовались как индикаторов для: 1) поиска месторождений нефти и газа; 2) картирования зон разломов, выявление их глубины проникновения и сейсмо-тектонической активности, и на этой основе прогноза землетрясений и цунами; 3) поиска газогидратов в комплексе с геофизическими исследованиями; 4) изучение формирования морфоструктур в донных осадках, которые образуются в районе выходов пузырей газа (метана) из донных отложений в воду. Поверхность дна нарушается, происходят оползни, провалы, бугры. Эти особенности важно учитывать при строительстве каких-то подводных объектов, в том числе скважин, газонефтепроводов. Отклонение концентраций и объемов газов от фоновых обычно связано или с природными факторами или антропогенным загрязнением. С одной стороны определяются источники поступления газа, с другой выясняется влияние их на окружающую среду и структурного изменения рельефа дна. Эффективность прогнозных оценок повышается при использовании геолого-геофизического комплекса исследований – акустических, геофизических, гидрологических, газогеохимических, морфоструктурных характеристик.

Некоторые результаты газогеохимических исследований в Охотском море

С 1984 г. по 1988 г. выполнялись газогеохимические исследования по контракту с трестом «Дальморнефтегеофизика» (г. Южно-Сахалинск) в Охотском море для выделения первоочередных объектов для бурения нефтегазопроисловых скважин на Сахалинском шельфе. На 6 структурах из 7, на которых был дан положительный прогноз, бурением вскрыты промышленные залежи нефти и газа, на 1 – непромышленные. На 3 структурах из 3, где был дан отрицательный результат, залежей углеводородов бурением обнаружено не было. В настоящее время на многих структурах, в которых перспектива нефтегазоносности была оценена газогеохимическим методом положительно, бурением были обнаружены залежи нефти и газа.

По данным газогеохимических исследований в Охотском море [1–3] первый поток пузырей метана был обнаружен нами в 1988 г. на Сахалинском северо-восточном склоне Охотского моря (рис. 1). В районе этого потока в 1991 г. в верхнем слое донных осадков (1–5 м от поверхности дна) были обнаружены газогидраты (рис. 2). Дальнейшие исследования показали рост количества потоков газа (преимущественно метана). В настоящее время их обнаружено более 500 на восточном шельфе и склоне Охотского моря (рис. 3). Вместе с ростом количества потоков пузырей метана увеличилась его концентрация в придонной воде в 5–10 раз, достигая 2000–5000 нл/л (рис. 4). Наблюдается взаимосвязь увеличения количества выходов метана и его концентраций в водной толще с эпизодами землетрясений в западной части Охотского моря и его прибрежной части (Кунаширское, 1994, Нефтегорское, 1995, Хоккайдское, 2003, Невельское, 2007 и др.)

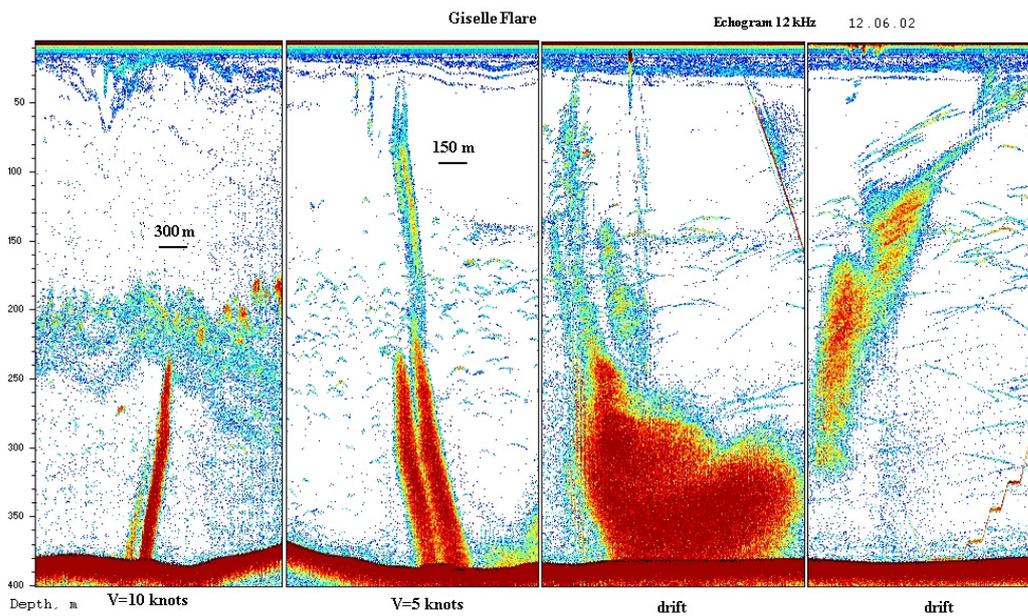


Рис. 1. Гидроакустическая запись выходов пузырей газа со дна моря в районе, где обнаружены газогидраты на Сахалинском восточном склоне Охотского моря (запись выполнена А.С. Саломатиным, 2002)



Рис. 2. Слои газогидратов (белый цвет) в донных осадках на Южной площади восточного Сахалинского склона Охотского моря

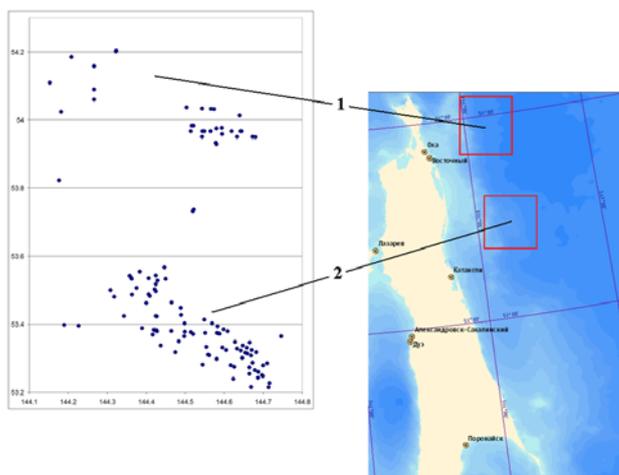


Рис. 3. Распределение обнаруженных выходов метана (показаны точками): 1 – северная площадь; 2 – Южная площадь. Сахалинский восточный склон Охотского моря

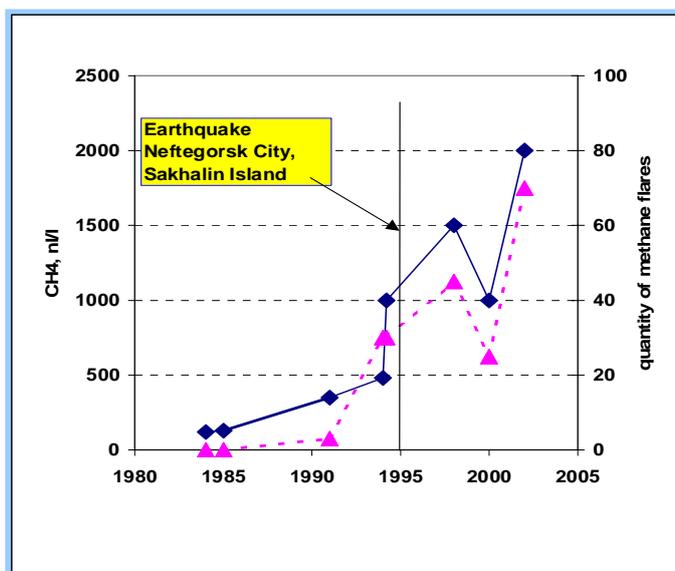


Рис. 4. Изменение концентраций метана (показано квадратами) в придонной воде (на оси справа) и количества потоков пузырей метана (показано треугольниками) из донных отложений в воду в Охотском море. Первый поток пузырей метана обнаружен в 1988 г. и концентрации метана были в пределах 80–100 нл/л. Затем отмечен рост концентраций метана в придонной воде и количества потоков пузырей метана из донных отложений в воду. Вертикальной линией отмечен эпизод Невтегорского землетрясения

Активные процессы в геологической среде

Какие газогеохимические процессы являются индикаторами природных явлений, которые требуется изучать и использовать для геологического картирования структур и зон разломов, прогноза газогидратов и залежей углеводородов, в том числе инженерного проектирования выполнения различной научной и хозяйственной деятельности в море и на суше [4–7].

На морском дне в районе зон разломов наблюдается миграция газов к поверхности, в воду и частично в атмосферу. В зависимости от источника газа, глубины его очага и мощности из донных осадков идут потоки газа в виде пузырей в воду. Состав газа может быть преимущественно метановым, если источник его нефте-газ-содержащие породы, углекислотным, в случае источником являются изверженные породы, наличие в газе водорода, гелия характеризует возможное его поступление из пограничных слоев литосферы и наличие сейсмической активизации.

В 2012 г. в ходе исследований по международной Российско-Японо-Корейской программе исследований газовых гидратов в Охотском и Японском морях (SSGH – Sakhalin Slope Gas Hydrates) впервые было обнаружено 17 выходов природного газа на дне западной части Курильской котловины и склоне залива Терпения, среди них один факел (F1, рис. 1) высотой более двух километров был обнаружен на глубине 2200 м, что значительно выше зарегистрированных ранее в Мировом океане. Сопоставление с геологическим строением территории показывает, что факел возник вблизи пересечения крупного продольного разлома с осложняющим его разломом северо-восточного простирания. В настоящее время многие исследователи пришли к выводу, что Курильская котловина является новообразованной структурой, в которой активный тектогенез и переработка земной коры продолжают и поныне.

Важным является тот факт, что этот поток газа в 2013 г. уменьшился в 2 раза, а в 2014 г. он исчез. Причиной этим событиям является сейсмическая активизация этого региона в 2012 г., в связи с чем на юге Охотского моря произошло землетрясение. В 2013 г. сейсмическая активность снизилась и в 2-а раза уменьшился поток газа, а в 2014 г. район сейсмически стабилизировался и поток газа исчез (рис. 5).

В районе потоков пузырей газа (метана) на морском дне образуются нарушения поверхности дна, ямки, бугры глубиной 20–40 м относительно друг друга, формируются более мощные нарушения дна в виде каньонов, на дне которых обнаруживаются также потоки пузырей газа.

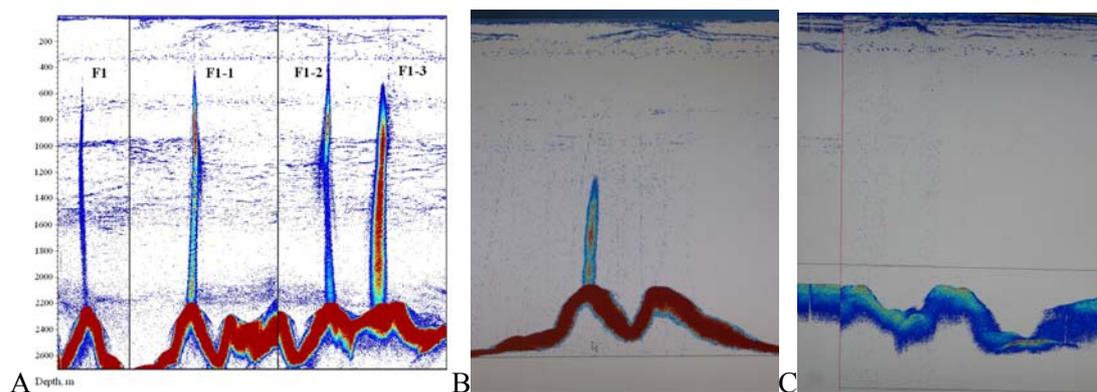


Рис. 5. Самый высокий поток газа (с метаном) на западном склоне Курильской котловины на глубине моря 2200 м. А – в 2012 г., в год землетрясения на юге Охотского моря, В – в 2013 г., год стабилизации после землетрясения в 2012 г., С – в 2014 г. на второй год после землетрясения

В районе выхода потока пузырей метана в донных отложениях образуются газогидраты в зоне его стабильности, то есть, при высоком давлении и низкой температуре. При давлении 30 атмосфер, температуре 0 °С, при наличии метана и воды может образоваться газогидрат. В Охотском море при температуре придонной воды +2.4 °С газогидраты обнаружены на минимальной глубине моря 386 м, то есть, при повышении температуры для образования газогидрата требуется большее давление, то есть, увеличении глубины моря. При образовании газогидрата происходит вспучивание поверхности дна как при образовании льда. 1 см³ газогидрата, похожего на лед, содержит 160 см³ метана

Строительные или другие хозяйственные работы на морском дне (например, строительство буровых вышек, проводка трубопроводов, других строений) в районе потоков пузырей газа (метана) и (или) газогидратов является опасными. При повышении температуры газогидраты разрушаются и выделяется большое количество метана, а дно нарушается. В районе повышенной газонасыщенности донных отложений повышается опасность возникновения землетрясений в период сейсмических активизаций. Газ поднимается по трещинам разломов, расширяет их и является воздушной «подушкой» в результате чего, блоки легко скользят относительно друг друга, резко смещаются, возникает землетрясение и цунами.

Газогеохимические исследования как индикаторы также используются при проверке стабильности состояния морских нефте-газ-добывающих скважин. Важно установить возможные утечки газа (метана) из-за трубного пространства скважин и (или) законсервированных скважин. Например, лаборатория Газогеохимии по просьбе компании МАГЭ выполняла газогеохимические исследования по скважинам Киринской нефтегазоносной структуры Охотского моря. Отмечается очень высокая концентрация метана в придонном слое воды в районе всей площади Киринской структуры – от 2500 до 74000 нл/л. Фоновая концентрация метана в этом районе не превышает 100–200 нл/л. То есть, концентрации метана в придонном слое на Киринской структуре превышают в 10–100 и более раз фона. В районе скважин Киринская 1 и П4 нами обнаружены потоки пузырей газа. Концентрации метана в свободном газе очень высокие – **72–81%**. Концентрации метана в придонном слое в районе этих скважин аномально высокие – **2–136** мл/л. Это говорит о том, что газ поступает из залежи как из трещин цементации ствола скважины, так и, возможно, оперяющих трещин зоны разлома структуры. В настоящее время происходит высачивание метана из трещин цементации скважин, возможно, трещин зоны разлома структуры. Метан насыщает придонный слой воды и поверхность донных осадков. То есть, требуется ремонт цементации скважин.

На суше потоки флюидов, насыщенные газом (в основном метаном), создают структуры – грязевые вулканы. По зонам разломов газо-флюидная смесь создает каналы миграции ее к поверхности, создавая грязевые бугры с вытекающей смесью воды, газа и пелитовой фракцией разрушенных вмещающих отложений с брекчиями нижних горизонтов пород. Грязевый вулканизм широко распространен на Земле, в том числе на островах Хоккайдо и Сахалина вдоль продольной тектонической границы (грязевые вулканы Ниикаппу, Камихоронобе, Южно-Сахалинский, Пугачевский, Восточный), которая совпадает с зоной влияния Япономорского линеймента. В газовой фазе Южно-Сахалинского грязевого вулкана содержится метана 20% и углекислого газа 80%. По геологическим условиям и строению он похож на грязевые вулканы на о.Тайвань.

Япономорский линеамент выражен сейсмической активностью, сочетанием высокоамплитудных сдвигов, надвигов и взбросов, которые в районе исследования отвечают за положение участков газовой разгрузки. В западной части Охотского моря и острова Сахалин данный линеамент контролирует участки газо-флюидных проявлений (холодных сипов газовых потоков, газогидратов, грязевых вулканов и геотермальных источников) углеводородных и других газов (водорода, гелия, углекислого газа), которые, как правило, приурочены к узлам пересечения разрывных нарушений составляющих структурный план крупных разломных зон. Данные разломные зоны отражают положение сейсмо-активной конвергентной границы литосферных плит.

Выводы

Таким образом, газогеохимические исследования являются важным индикатором геологических процессов на суше и море и характеризуют участие газа в формировании геологической среды. Потоки газа указывают на наличие зон разломов, а увеличение их количества связано с процессами сейсмо-тектонических активизаций. В этот период наличие газа усиливает возможность происхождения катастрофических эпизодов в геологической среде в связи с внедрением газа по трещинам из недр к поверхности, создавая газовую подушку и облегчая резкое перемещение блоков относительно друг друга, что способствует возникновению землетрясений и цунами. Состав газа характеризует строение недр. Например, метан и тяжелые углеводороды (C1–C4) указывают на наличие в недрах залежей углеводородов, углекислый газ является индикатором изверженных и вулканогенных пород, водород и гелий характеризуют сейсмические активизации и проникновение разломов в литосферу. В районе потоков метана в верхнем слое морских осадков в зоне стабильности (высокое давление, низкая температура, наличие метана и воды) образуются газогидраты, которые внедряются в осадочные отложения и нарушают поверхность дна. На суше, в сейсмически активных районах и наличием газа, по зонам разломов мигрирует газо-флюидный поток, который участвует в формировании структур грязевых вулканов. Все эти проявления в геологической среде являются опасными для выполнения научных исследований и хозяйственной деятельности.

Список литературы

1. *Обжиров А.И.* Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
2. *Обжиров А.И.* История открытия газогидратов в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 72–82.
3. *Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Мищукова Г.И., Мищуков В.Ф., Окулов А.К.* Распределение содержания и потоков метана на акваториях Японского, Охотского морей и прикурильской части Тихого океана // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 71–81.
4. *Обжиров А.И.* Газогидраты, методы их поисков и возможность добычи из них метана как альтернативного источника углеводородов // Сборник материалов VI Сахалинской молодежной научной школы "Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз", 3–8 октября 2016 г., г. Южно-Сахалинск. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016. С. 49–54. ISBN: 978-5-7442-1590-3.
5. *Обжиров А.И.* Комплекс газогеохимических и геофизических критериев геологических исследований и прогноз залежей углеводородов в морских условиях // Сборник материалов VI Сахалинской молодежной научной школы "Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз", 3–8 октября 2016 г., г. Южно-Сахалинск. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016. С. 55–59. ISBN: 978-5-7442-1590-3.
6. *Обжиров А.И., Болобан А.В., Веникова А.Л.* Газогеохимические исследования и робототехника в инженерном проектировании на морском дне // Подводные исследования и робототехника: глубины океана – наша гигантская лаборатория. 2016. № 1 (21). С. 66–71. ISSN 1992-4429.
7. *Obzhirov A., Shakirov R., Salyuk A. et al.* Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea // Geo-Marine Letters. 2004. Vol. 24. P. 135–139.

ПРЕДВЕСТНИКИ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2013-2016 гг., ВЫЯВЛЕННЫЕ ПО МЕТОДИКЕ ВСШ

Салтыков В.А.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

Анализ данных, полученных в течение последних 30 лет, выявил ряд особенностей, которые свидетельствуют о модуляции высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) приливами и связи ВСШ с различными геофизическими процессами, в том числе с изменением напряженного состояния среды в процессе подготовки землетрясений [2, 3, 5, 6]. Эти работы носят не только фундаментальный, но и прикладной характер, что связано с актуальностью проблемы сейсмического прогноза. Обнаружено важное свойство отклика ВСШ на приливное воздействие: эффект не является стабильным во времени. В 90-х годах по результатам исследований ВСШ на Камчатке выдвинута гипотеза о связи вариаций фазы приливной компоненты ВСШ с геодинамическими процессами в регионе. Позднее на основе многолетних натуральных наблюдений было показано, что приливная чувствительность ВСШ наиболее стабильна и статистически значима в период подготовки сильных локальных землетрясений.

Обнаруженный эффект синхронизации процессов лег в основу методики прогноза сильных локальных землетрясений по изменению характера отклика ВСШ на приливное воздействие. Оригинальным в данной методике является использование земных приливов, обусловленных лунно-солнечным гравитационным воздействием, в качестве калибровочного (эталонного) сигнала с известными характеристиками при изучении закономерностей микросейсмического излучения.

Базовым элементом методики является экспериментально выявленный в 1992–1995 гг. эффект стабилизации фазового сдвига $\Delta\varphi$ между выбранной волной приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом. Этот параметр рассчитывается через временное рассогласование между определенной приливной волной и компонентой огибающей ВСШ с тем же периодом. Синхронизация ВСШ с внешним приливным воздействием, проявляющаяся в виде стабилизации фазового сдвига, рассматривается как прогностический признак и является новым, ранее не обнаруженным предвестником землетрясений [1] (рис. 1).

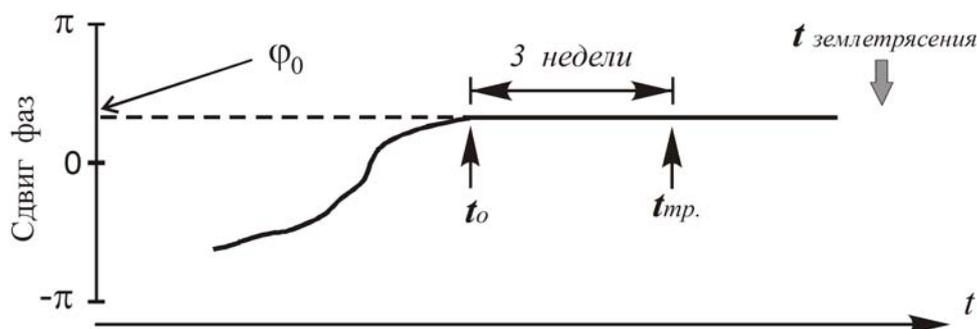


Рис. 1. Схематическое изображение рассматриваемого предвестника землетрясения. Начало стабилизации фазового сдвига φ_0 определяет начало проявления предвестника t_0 . Тревога подается в случае продолжительности стабилизации $(t_{тр} - t_0) \geq 3$ недели

Действующий в настоящее время вариант методики описан в [4], и ее ключевыми пунктами являются следующие:

1. Предвестник: стабилизация фазового сдвига между выбранной волной приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом продолжительностью 3 недели;
2. Момент подачи тревоги (прогнозного заключения): достижение стабилизацией продолжительности $(t_{тр} - t_0) = 3$ недели;
3. Параметры ожидаемого землетрясения: прогнозируются землетрясения с магнитудой $M \geq M_0 = 5.0$ на глубине до 300 км. Предельное эпицентральное расстояние R связано с ожидаемой

магнитудой M и определяется соотношением $\lg R = \frac{M + 3.64}{4.06}$.

4. Период упреждения прогноза (промежуток времени, на который разрабатывается прогноз): прогноз дается первоначально на 2 недели, с возможной пролонгацией;

5. Снятие тревоги при отсутствии ожидаемого землетрясения (ложная тревога): тревога снимается через 2 недели после окончания стабилизации фазы;

6. Успешный (оправдавшийся) прогноз: землетрясение с магнитудой $M \geq M_0 = 5.0$, произошедшее на глубине до 300 км и на эпицентральной дистанции R : $\lg R \leq \frac{M + 3.64}{4.06}$ во временном интервале,

объявленном тревогой;

7. Снятие тревоги после оправдавшегося прогноза: произошедшее землетрясение с магнитудой M_1 , удовлетворяющее условиям п. 3, снимает прогноз землетрясения с магнитудой в диапазоне $[M_0; M_1]$ досрочно. Время тревоги составляет $(t_{\text{землетрясения}} - t_{\text{тр}})$. Прогноз относительно $M \geq (M_1 + 0.1)$ остается в силе с соблюдением условий п. 3 (диапазон глубин и соотношение “эпицентральное расстояние – магнитуда”) и п. 5 (снятие тревоги).

8. Вероятность прогноза: прогноз носит вероятностный характер, определяемый специальной номограммой. Вероятность пропуска цели определяется соответствующей номограммой.

Также в работе [4] приведены такие важные характеристики прогностической методики, как эффективность предвестника, его надежность и достоверность в зависимости от диапазона прогнозируемых магнитуд.

Учитывая, что работа [4] и описанная в ней прогностическая методика основаны на наблюдениях ВСШ до середины 2013 г., представляет интерес рассмотреть результаты ее использования в последующее время. Здесь следует отметить, что станция “Начики” была закрыта в сентябре 2015 г. по независящим от КФ ГС РАН причинам.

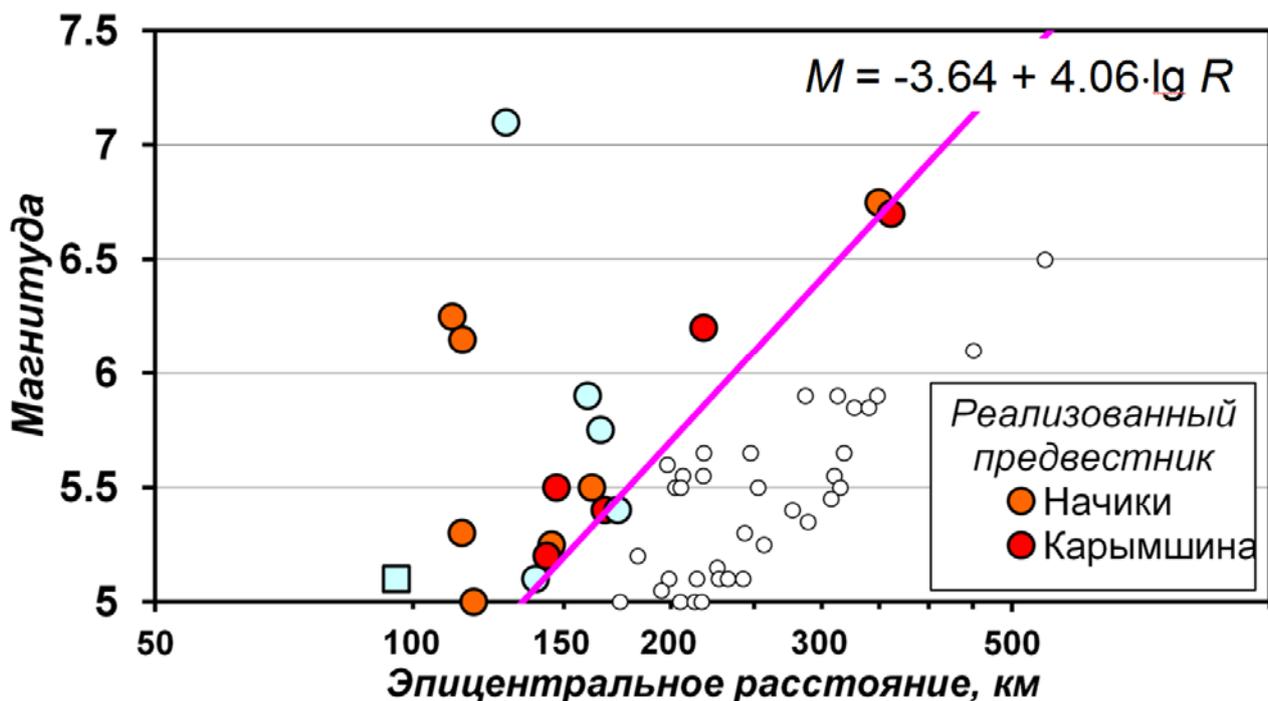


Рис. 2. Произошедшие с сентября 2013 г по май 2016 г. землетрясения Камчатки в координатах «магнитуда – эпицентральное расстояние». Прямая линия соответствует нижнему порогу магнитуды прогнозируемого события в зависимости от эпицентрального расстояния. Темные большие кружки соответствуют землетрясениям с предвестником, светлые большие – без предвестника. Мелкие кружки обозначают землетрясения, для которых предвестник не предполагается согласно методике. Квадрат соответствует землетрясению 15 ноября 2015 г. с $ML5.1$ (пояснение в тексте)

С сентября 2013 г. по май 2016 г. произошло 18 землетрясений, соответствующих прогнозируемому типу (по соотношению магнитуда – расстояние) (рис. 2). Для землетрясений, которые имели предвестник, выделенный по методике ВСШ, в таблице представлены временные участки стабилизации фазового сдвига по данным станций “Начики” и “Карымшина” с отмеченным

временем землетрясения, положение его эпицентра, а также дата подачи прогнозного заключения в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Таблица.

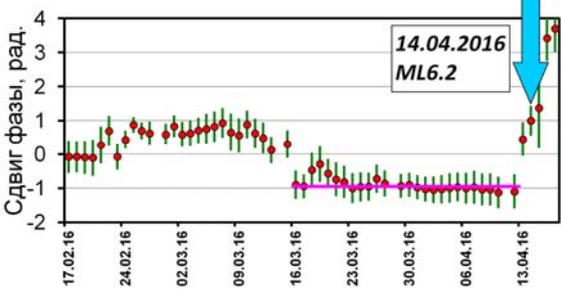
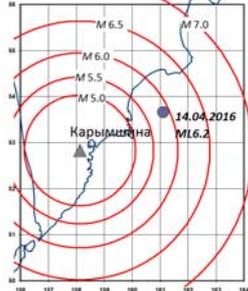
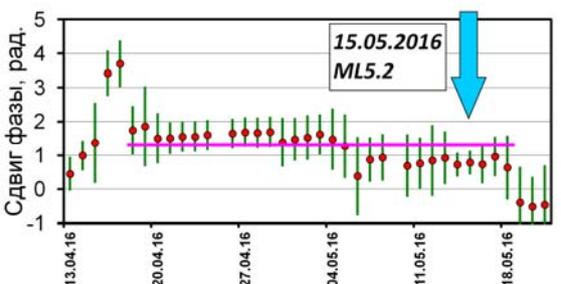
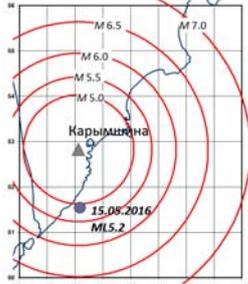
№	Временной ход $\Delta\varphi$	Положение эпицентра	Примечания
1			<p>Дата подачи прогноза 22.10.2013 Время тревоги – 10 суток.</p>
2			<p>Дата подачи прогноза 18.02.2014 Время тревоги – 20 суток.</p>
3			<p>Предвестник выявлен ретроспективно</p>

Примечание. Стрелка указывает время землетрясения. Горизонтальная линия отмечает участок стабилизации фазы. Концентрические окружности соответствуют максимальному эпицентральному расстоянию для ожидаемого землетрясения указанной магнитуды. Время тревоги приведено для реально поданных прогнозов.

Таблица (продолжение).

<p>4</p>			<p>Дата подачи прогноза 12.12.2014 Время тревоги – 11 суток.</p>
<p>5</p>			<p>Предвестник выявлен ретроспективно</p>
<p>6</p>			<p>Дата подачи прогноза 02.04.2015 Время тревоги – 8 суток.</p>
<p>7</p>			<p>Дата подачи прогноза 06.11.2015 Время тревоги I – 6 суток. Время тревоги II – 13 суток.</p>
<p>8</p>			<p>Дата подачи прогноза 26.02.2016 Время тревоги – 23 суток.</p>

Таблица (окончание).

9			Предвестник выявлен ретроспективно
10			Дата подачи прогноза 12.05.2016 Время тревоги – 3 суток.

Обратим внимание на предвестник № 3 и № 7. В соответствии с методикой (п. 7) произошедшее 24 сентября 2014 г. землетрясение с $ML5.3$ не остановило ожидание более сильного события. В этом случае следующее землетрясение – 2 октября 2014 г. $ML6.3$ также соответствует прогнозу. Похожая ситуация наблюдалась и для предвестника № 7: землетрясение 19 ноября 2015 г. имеет большую магнитуду ($ML5.5$), чем землетрясение 12 ноября 2015 г. – $ML5.4$. Поэтому оба эти землетрясения можно считать спрогнозированными. Однако, землетрясение 15 ноября 2015 г. имеет магнитуду $ML5.1$, и хотя его эпицентральное расстояние соответствует требуемому условию (п. 3), оно рассматривается как ”пропуск цели”, так как в соответствии с упомянутым п. 7 после произошедшего землетрясения с $ML5.4$ ожидаются только более сильные события.

Отсутствие в колонке ”Примечания” (в таблице) даты прогноза означает, что предвестник был обнаружен уже после землетрясения при ретроспективном анализе. Задержка обработки, как правило, связана с техническими проблемами.

Самое сильное за рассматриваемый временной интервал землетрясение – Жупановское землетрясение 30 января 2016 г. $ML7.1$ не имело предвестника по этой методике, хотя вариации соотношения амплитуд приливных гармоник уровня ВСШ на дробных периодах были отмечены [7].

Статистически обоснованный анализ эффективности прогнозов за короткий (3 года) временной интервал не представляется возможным, однако, приведенные данные демонстрируют перспективность используемого подхода для прогноза сильных локальных землетрясений и не противоречат приведенным в [4] характеристикам методики.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-05-00185).

Список литературы

1. Пат. 2105332 Российская Федерация. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений / Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. № 94042027/25 Заявл. 23.11.94. Оpubл. 20.02.98. Бюл. № 5.
2. Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Характерные параметры высокочастотного сейсмического шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // ДАН. 1998. Т. 361. № 3. С. 402–404.
3. Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл. РАН. 1995. Т. 341. № 3. С. 406–407.
4. Салтыков В. А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84–96.
5. Салтыков В. А., Кугаенко Ю.А. Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений (по материалам долговременных режимных наблюдений на Камчатке) // Физика Земли. 2007. № 9. С. 48–60.
6. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124.
7. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $KS=15.7$, $MW=7.2$, $I=6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.

ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Салтыков В.А, Воропаев П.В.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

Введение

В Камчатский филиал экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) регулярно поступают сейсмические прогнозы для региона Камчатского края и сопредельных территорий. Поданные прогнозы основываются на различных физических методах, имеют многообразную пространственно-временную реализацию, включают в себя оценки для широкого диапазона энергетических классов и магнитуд. При рассмотрении прогнозов часто возникает ситуация наложения прогнозных зон друг на друга в пространстве и времени, что вызывает необходимость комплексного анализа сейсмической обстановки.

Осложняющим моментом при комплексном анализе является неоднородность прогнозов, под которой понимается различие выделяемых пространственных объемов и временных интервалов, диапазонов магнитуд, вероятностей реализации прогноза (или эффективностей предвестника). В данной работе предложен подход к проблеме комплексирования при прогнозе землетрясений, заключающийся в разбиении пересекающихся пространственно-временных прогнозных областей на производные зоны с последующим вычислением вероятности землетрясения для каждой из них.

Параметры сейсмических прогнозов

Сейсмические прогнозы характеризуются следующими категориями: время (даты начала и конца прогноза), пространство (пространственная область, интервал глубин), энергия (интервал энергетических классов и магнитуд), вероятность реализации, эффективность предвестника.

Вероятность землетрясения в прогнозном зоне

Рассматривая сейсмический процесс как пуассоновский поток, для каждой пространственно-временной зоны вероятность землетрясения P определяется следующим образом:

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

где λ – интенсивность пуассоновского потока (среднее число событий, которые проявляются в единицу времени), вычисляется на основании выборки землетрясений из сейсмического каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН, соответствующей параметрам прогноза; t – рассматриваемый временной интервал; J – величина эффективности прогнозных методик, предложенная А.А. Гусевым [1], она показывает во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в тревожное время случайным образом, и вычисляется по следующей формуле:

$$J = \frac{N_+}{N \cdot \frac{T_{alarm}}{T}}$$

где N_+ – количество землетрясений соответствующих успешному прогнозу, N – общее количество землетрясений с параметрами, соответствующими прогнозу, T_{alarm} – время тревоги, T – время мониторинга сейсмичности по данному методу. В случае пространственного наложения прогнозных зон, соответствующих разным методикам, величина J определяется как произведение эффективностей прогнозных методик пересекающихся зон.

Пересечение прогнозных зон в пространстве и времени

На рисунке 1 представлен пример пересечения двух прогнозных зон, с обозначением соответствующих прогнозных параметров.

Прогнозная зона 1

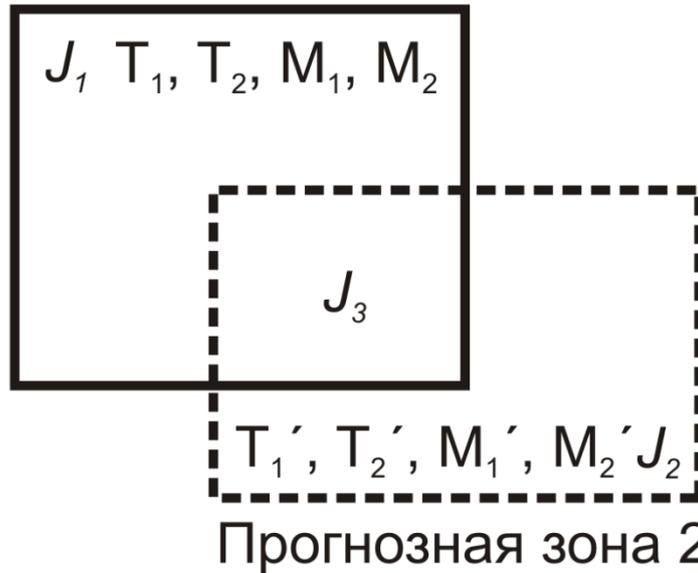


Рис. 1. Пример пересечения в пространстве двух прогнозных зон с образованием в месте пересечения третьей зоны. Прогнозные параметры: T_1 – дата начала прогноза; T_2 – дата конца прогноза, M_1 – минимальное значение магнитуды; M_2 – максимальное значение магнитуды; J_1, J_2, J_3 – эффективности прогнозных методик. При совпадении временных и магнитудных диапазонов первой и второй зоны эффективность в пространственной зоне пересечения $J_3 = J_1 \cdot J_2$

Определим производные зоны, возникающие в результате пересечения вышеприведенных зон при условии, когда дата начала прогнозной зоны 2 находится во временном интервале существования прогнозной зоны 1, а дата конца прогнозной зоны 2 больше даты конца прогнозной зоны 1. При этом минимальное значение магнитуды зоны 2 лежит в интервале магнитуд зоны 1: $T_1 < T_1' < T_2 < T_2'$, $M_1 < M_1' < M_2 < M_2'$. В результате образуется семь производных зон (рис. 2). Контуры зон 1, 2, 6, 7 имеют уникальную пространственную конфигурацию, и наследуют значения J от изначальных прогнозных зон. Зоны 3, 4 и 5 совпадают в пространстве и времени, но обладают различными интервалами магнитуд. Пересечение исходных прогнозных зон по всем параметрам справедливо только для зоны 4, поэтому ее прогнозная эффективность определяется как произведение эффективностей исходных зон.

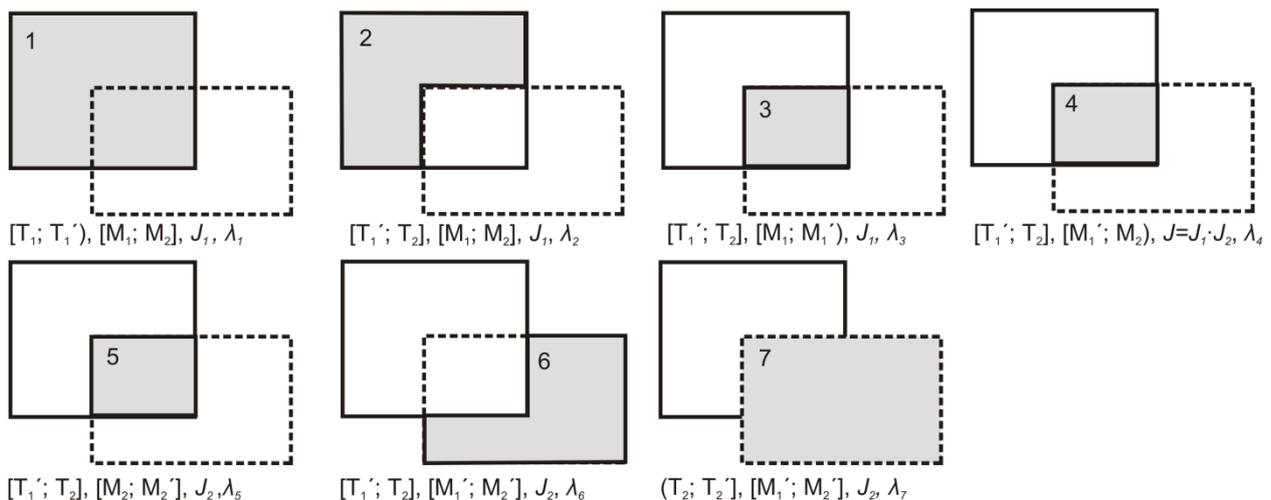


Рис. 2. Производные прогнозные зоны, образующиеся в результате пересечения двух пространственно-временных зон

Случай пересечения в пространстве и времени трех и более прогнозных зон принципиально не отличается от рассмотренного выше. Однако количество производных зон значительно возрастает, что влечет за собой необходимость машинных вычислений.

Программа вычисления вероятности землетрясения на основании данных сейсмических прогнозов

В лаборатории сейсмического мониторинга Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН идет разработка системы вычисления вероятности землетрясения на основании сейсмических прогнозов для Камчатского края, поступающих в КФ РЭС. Данная система реализована в виде компьютерной программы для персонального компьютера с операционной системой семейства Windows.

Программа написана на языке С#. Одним из компонентов системы является база данных формализованных сейсмических прогнозов на основе СУБД MS Access, которая содержит в себе следующие основные параметры: период прогноза, названия мест реализации прогноза и координаты контуров, диапазон энергетических классов и магнитуд, описание методик прогноза и величину их эффективности J .

Функциональные средства программы позволяют пользователю работать с базой данных сейсмических прогнозов.

Вычисление вероятности землетрясения для заданной пространственно-временной области производится на основании содержащейся в базе данных информации по следующему алгоритму: для заданного пользователем периода времени производится выборка сейсмических прогнозов; определяются пространственные области соответствующие выборке прогнозов; в случае пересечения ранее определенных пространственных областей вычисляются их производные области; на основании сейсмического каталога ФИЦ ЕГС РАН и заданных параметров прогноза для каждой пространственной области, вычисляется интенсивность λ ; с использованием ранее полученных значений J и λ , и заданного интервала времени вычисляется вероятность землетрясения для каждой пространственно-временной области; результаты вычисления выводятся на экран и записываются в текстовый файл.

В программе имеются средства графического представления результатов вычисления в виде карт прогнозных областей, с возможностью сохранения в графические файлы. В качестве источника картографических данных выбран сервис Google Maps.

Программа снабжена интуитивно понятным пользовательским интерфейсом, в основе которого лежит графический интерфейс пользователя (GUI) операционной системы MS Windows. Основными функциональными объектами интерфейса пользователя являются следующие элементы: многодокументный интерфейс (MDI), выпадающие и контекстные меню, диалоговые окна и строка состояния. Выпадающее меню расположено в верхней части главного окна. Диалоговые окна вызываются при нажатии на соответствующие пункты главного меню, и могут свободно размещаться по всему пространству родительской формы. Строка состояния расположена в нижней части главного окна.

По функциональному назначению дочерние окна подразделяются на две категории: взаимодействие с базой данных, вычисления и представления результатов.

Основная информация о сейсмических прогнозах выводится в форме "Список прогнозов" (рис. 3-5). В этой форме данные представлены в виде таблиц. Первая таблица включает в себя следующие колонки: код прогноза, название методики прогнозирования, даты начала и конца прогноза, интервалы глубин, энергетических классов и магнитуд прогнозируемого землетрясения. Вторая таблица выводит список зон реализации сейсмического прогноза. Ввод нового прогноза в базу данных производится путем заполнения полей формы "Добавить прогноз" (рис. 3-1). Список прогнозных зон, содержащихся в базе данных, можно просмотреть в форме "Прогнозные зоны" (рис. 3-2). Данная форма выводит в виде таблиц названия зон прогноза и список координат узловых точек контура зоны (в текущей версии программы все прогнозные зоны задаются в виде полигональных областей). Добавление новых прогнозных зон производится в соответствующей форме (рис. 3-3). Форма "Список методик прогноза" (рис. 3-4) выводит таблицу, содержащую название, краткое описание и значение эффективности методики J .

Для проведения необходимых вычислений пользователь должен ввести исходные данные сейсмических прогнозов с помощью форм представленных на рисунке 3. Искомый период времени, для которого необходимо определить существующие прогнозные зоны и соответствующие им вероятности, задается пользователем в соответствующей форме (рис. 3-8). Результаты вычисления выводятся в текстовом виде (рис. 3-7) и изображаются графически в виде карты в соответствующем окне (рис. 3-6).

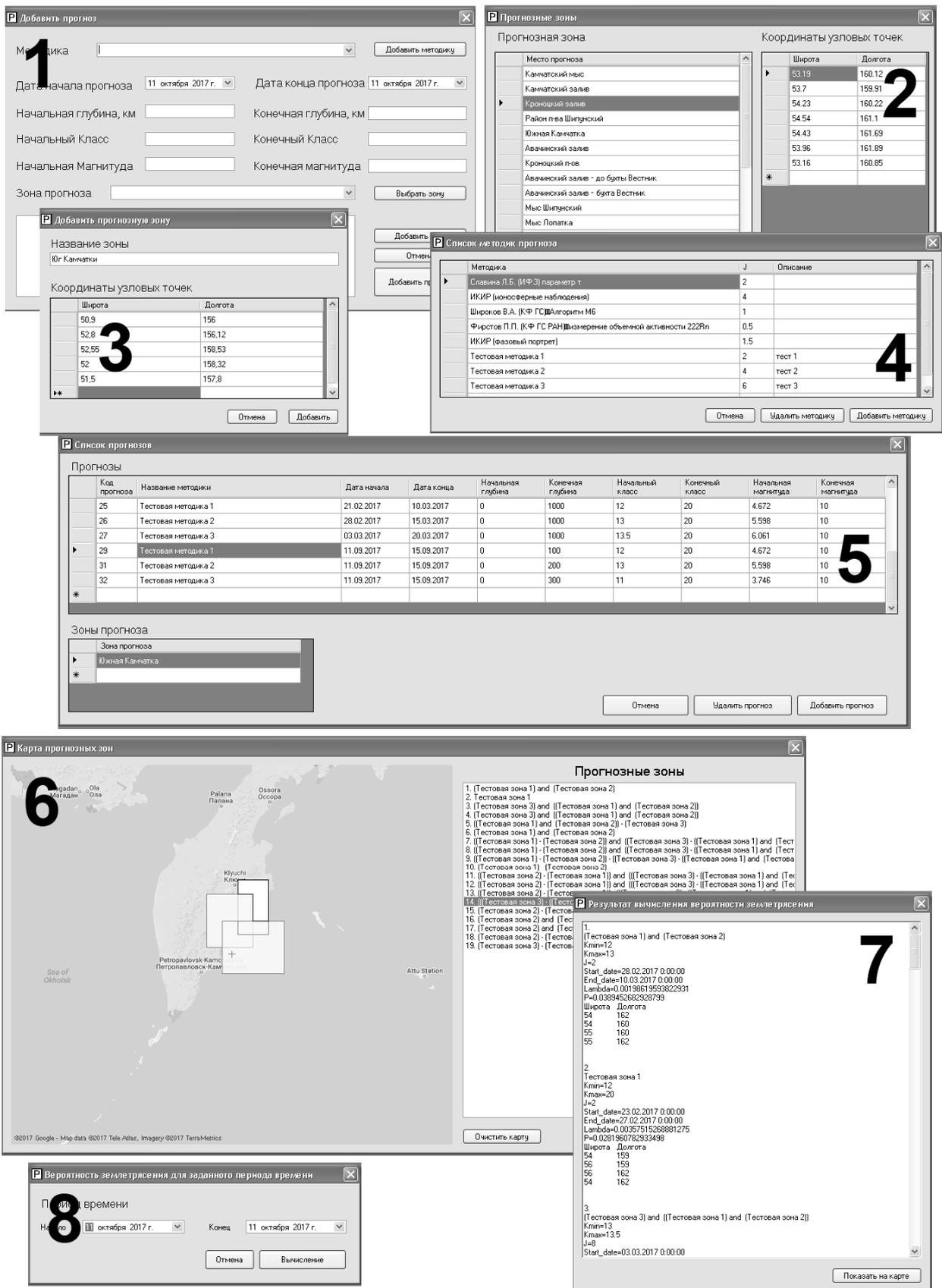


Рис. 3. Вид окон, предназначенных для работы с базой данных сейсмических прогнозов, вычисления и представления результатов. 1 – окно добавления сейсмического прогноза в базу данных; 2 – список прогнозных зон с координатами узловых точек; 3 - окно добавления прогнозных зон; 4 – список прогнозных методик; 5 – окно списка прогнозов; 6 – представление прогнозных зон на карте; 7 – представление результатов вычисления в текстовом виде; 8– вычисление вероятности землетрясения прогнозных зон для заданного периода времени

Пользователь имеет возможность составить отчет в виде файла формата MS Word, включающий в себя следующую информацию: порядковый номер, название, изображение на карте, интервал энергетических классов, время существования, координаты узловых точек контура прогнозной зоны, значения P и λ (рис. 4).

№	Карта	Характеристика зоны	Координаты узловых точек контура зоны	
			Широта	Долгота
1		Название зоны: Южная Камчатка Интервал классов: $11 \leq K < 20$ Дата начала прогноза: 23.02.2017 0:00:00 Дата конца прогноза: 11.03.2017 0:00:00 Вероятность землетрясения $P=0.09237771606022479$	50.88 52.81 52.54 52 51.54	156.72 156.11 158.52 158.32 157.82
2		Название зоны: (Тестовая зона 1) and (Тестовая зона 2) Интервал классов: $12 \leq K < 13$ Дата начала прогноза: 28.02.2017 0:00:00 Дата конца прогноза: 10.03.2017 0:00:00 Вероятность землетрясения $P=0.0389452682928799$	54 54 55 55	162 160 160 162

Рис. 4. Внешний вид отчета результатов вычислений, формируемого программой

Заключение

Предложен подход к проблеме комплексирования при прогнозе землетрясений, заключающийся в выделении производных прогнозных зон в случае пространственно-временного пересечения исходных, с последующим вычисление искомых параметров.

В Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН разрабатывается и тестируется компьютерная программа вычисления вероятности землетрясения для региона Камчатки на основании данных сейсмических прогнозов. В настоящее время программа проходит апробацию, идет процесс выявления ошибок, расширения функциональных возможностей и улучшения пользовательского интерфейса.

Список литературы

1. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.

ДИНАМИКА ПОЛЯ ОТНОШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ V_P/V_S В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ И ЕЕ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССОМ РАЗВИТИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

Славина Л.Б.¹, Кучай М.С.¹, Сениюков С.Л.²

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, slavina@ifz.ru*

²*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Динамика вулканической активности, накопления и перемещения магм, строение корней вулканов и магматическая питающая система являются основными проблемами, стоящими при исследовании вулканов. Северная группа вулканов (СГВ) является наиболее мощной действующей группой, расположенной на севере Камчатки и включает такие действующие вулканы как Ключевской, Крестовский, Ушковский, Безымянный и Плоский Толбачик. На севере к этой группе относится также вулкан Шивелуч. Исследования строения Ключевской группы проводились различными геофизическими методами, включая методы ГСЗ [1]. Были получены основные границы в коре и мантии [2]. Однако ни один из указанных выше методов в силу методических особенностей не позволял проследить за изменением скоростей во времени по глубине, и связь этих изменений с процессом вулканической активизации. Это позволил сделать метод «обращенной волны», разработанный Славиной, Пивоваровой. Методика позволила восстановить скорости в области концентрации очагов вулканических землетрясений и проследить за изменением их во времени и по глубине [5, 6, 7].

Землетрясения в вулканически активной области несут информацию о пути перемещения магм, состоянии вещества геологической среды, отражают пространственно-временные изменения среды, ее напряженно-деформированное состояние. Сейсмическая активность на уровне слабых региональных землетрясений несет информацию об активизации того или иного участка вулканической области, о подготовке извержения. При слежении за временами пробега P - и S -волн, регистрируемых на станциях, и отношением скоростей этих волн, параметром V_P/V_S она также несет информацию о тектоническом строении среды, выявляя подчас предполагаемые геологами погребенные, разрывные структуры, пути перемещения магм.

Введение

В данной работе представлены результаты расчетов отношения скоростей V_P/V_S в области Ключевской группы вулканов по данным вулканических землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических станций, расположенных в районе исследуемых вулканов. Расчеты проводились по данным, полученным в результате обработки параметров слабых вулканических землетрясений [3], зарегистрированных в КФ ГС РАН в период с 2009 г. по 2017 г. В расчетах участвовали все зарегистрированные в районе СГВ землетрясения с энергетического класса $3 \leq K_S \leq 7.5$. Землетрясения из фокальной зоны в расчетах не участвовали.

Значения V_P/V_S рассчитывались по формуле

$$V_P/V_S = T_{S-P} / (T_P - T_0) + 1,$$

где T_{S-P} – разность времен вступлений P - и S -волн на конкретной станции от i -ого землетрясения, $(T_P - T_0)$ – время пробега P -волны. Методика расчета параметра V_P/V_S разработана ранее.

Отношение скоростей так же может быть выражено через упругие параметры Ламе:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}}.$$

Здесь λ — первый, а μ — модуль сдвига (Н/м^2) – соответственно, второй, параметры Ламе, коэффициенты закона Гука выражающего в линейной теории упругости зависимость между тензором деформации ε и тензором напряжений σ в упругой среде:

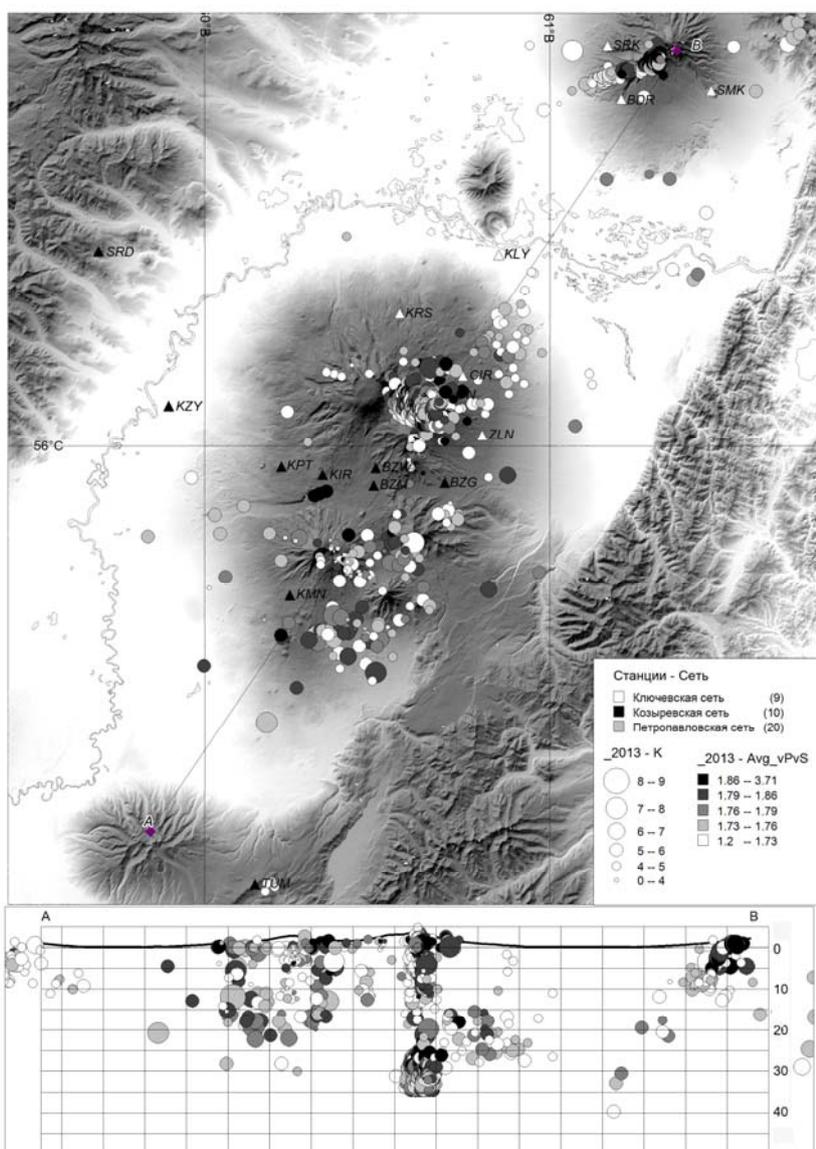
$$\sigma = 2\mu\varepsilon + \lambda\text{Tr}(\varepsilon)I$$

В свою очередь, параметры Ламе через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν выражаются следующим образом:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Отметим, что когда значения упругих параметров μ , λ равны, V_p/V_s равно корню из 3, т.е. 1.73. Приведенные выше формулы, соотношения, связывающие упругие параметры однозначно свидетельствуют о прямой связи параметра V_p/V_s с полем напряжения и состоянием среды в вулканически активном регионе. Значения равные 1.73 ± 0.05 считались нормальными для исследуемой геологической среды. Значения $V_p/V_s < 1.68$ считались пониженными, значения > 1.78 – повышенными.

На исследуемой территории развита и оснащенная цифровой телеметрической аппаратурой сеть сейсмических станций, обеспечивающая наблюдения и проведение анализа в режиме близком к реальному времени за изменениями времен пробега сейсмических P и S волн их отношения t_s/t_p , параметром V_p/V_s , которые фиксируют и отражают изменения вулканической активности, напряженного состояния геологической среды. Важным преимуществом имеющихся сейсмологических данных является не только наличие каталогов слабых землетрясений за длительный период времени, но и времена пробега P и S волн от региональных землетрясений до близкорасположенных к вулканам сейсмических станций региона.



Были использованы данные за 2009–2017 гг. В расчетах были использованы более 5000 землетрясений, энергетического уровня $K_s \geq 1.5 - 7.5$ [3, 4]. На рис. 1, в качестве примера, показан район исследования: вулканы, сейсмические станции и землетрясения, произошедшие в районе СГВ в 2013 г. Размер кружочка эпицентра соответствует энергетическому классу K_s , окраска – величине V_p/V_s в соответствии с условными обозначениями.

На приведенной карте и разрезе по глубине вдоль линии АВ хорошо видны особенности распределения землетрясений, присущие Северной группе. Четко выделяется подводящий магматический канал под Ключевским вулканом, периферический очаг на границе коры и мантии. На глубине 25–35 км подводящий, наклонный канал под Шивелучем, активность подводящего канала под Плоским Толбачиком. В 2013 г. продолжалось его трещинное извержение, начавшееся 27 ноября 2012 г.

Рис. 1. Исследуемый район Северной группы вулканов Камчатки

Описание результатов расчетов поля V_p/V_s

Расчеты параметра V_p/V_s производились по указанной выше формуле. Осреднение параметра для каждого события осуществлялось по станциям, где значение $S-P$ не превышало 5 сек. Землетрясения выбирались внутри «стаканов», в центре которых был соответствующий вулкан. Радиусы окружности (проекция стаканов осреднения на поверхность), были выбраны в зависимости от вулкана, от 30 км до 15 км. Были построены временные разрезы по глубине для вулканов

Ключевской, Шивелуч и Плоский Толбачик за период с 2009 г. по 2017 г. Окраска окружности эпицентра соответствует среднему значению V_p/V_s в соответствии с приведенной шкалой на разрезах по времени и глубине (а) и по глубине по профилю АВ (б) внутри стакана, вокруг Ключевского вулкана (рис. 2). На разрезах приведенных ниже по Ключевскому вулкану можно видеть, что повышенные значения характерны в основном для постройки вулкана. Причем, в период активности вулкана в 2009 и в 2013 г. повышенные значения опускаются в область промежуточного очага до глубин 8–10 км. Так называемая область нейтральной плавучести, на глубинах 10–20(25) км, характеризуется смешанными слабо повышенными и нормальными, незначительно пониженными значениями. Особый интерес вызывают значительно пониженные значения. Они группируются как в области периферического очага на глубине 30–35 км, так и в области промежуточного очага в некоторые интервалы времени.

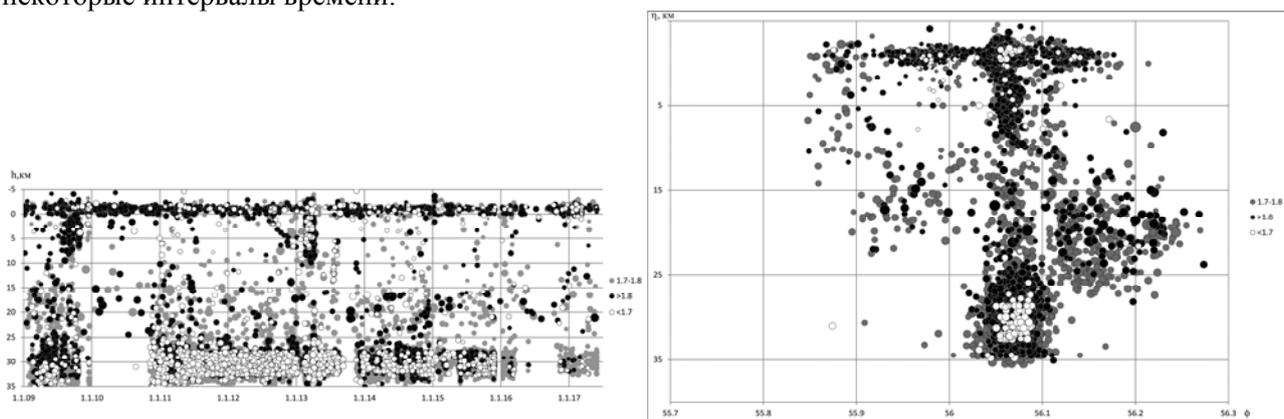


Рис. 2. Диаграмма глубина-время (а) и меридиональный разрез (б) области вокруг Ключевского вулкана за период 2009–2017 гг.

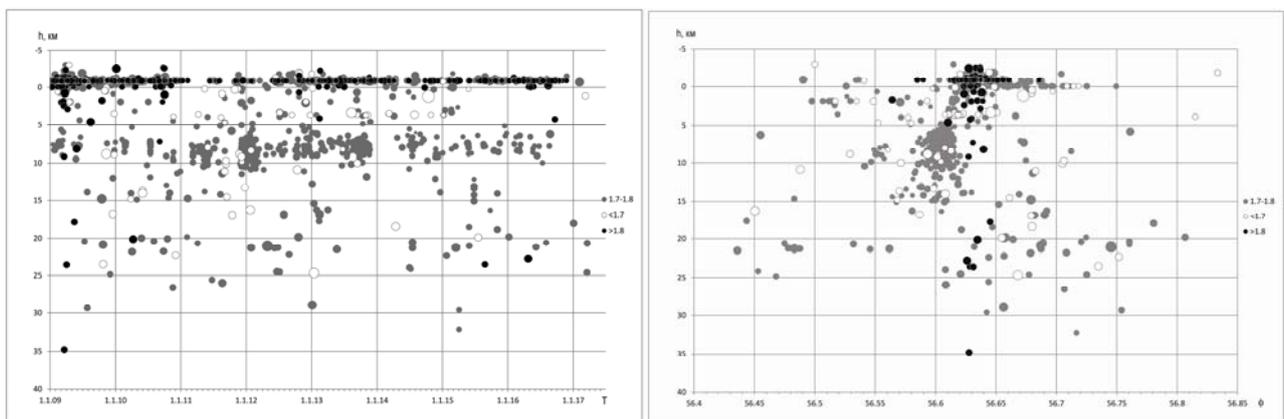


Рис. 3. Диаграмма глубина-время (а) и меридиональный разрез (б) области вокруг вулкана Шивелуч за период 2009–2017 гг.

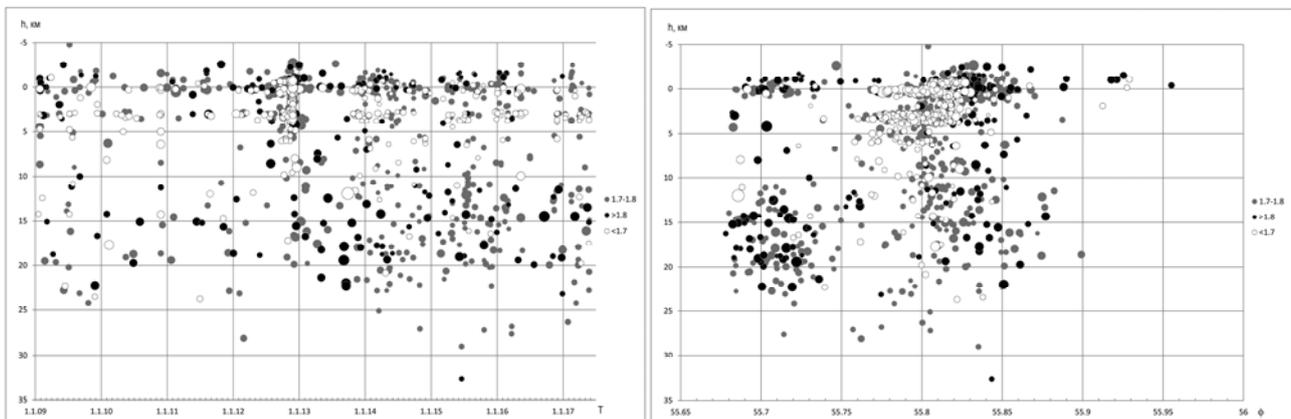


Рис. 4. Диаграмма глубина-время (а) и меридиональный разрез (б) области вокруг вулкана Пл. Толбачик за период 2009–2017 гг.

На разрезах, построенных в области осреднения вулкана Шивелуч можно видеть, что в постройке вулкана наблюдаются повышенные значения V_p/V_s . В период 2012 г. повышенные значения регистрируются до глубин 5 км. На глубинах 5–10 км мы видим нормальные значения, близкие к значению 1.73.

Особый интерес вызывает разрез по глубине вдоль линии АВ. (рис. 3б). Подводящий канал имеет наклон на ЮЗ, прослеживается до глубин 15 км. В постройке вулкана и до глубины 5–6 км наблюдаются значительно пониженные значения V_p/V_s до значений 1.60.

На этих глубинах, вероятно, располагается промежуточный очаг.

На разрезе в области осреднения в районе Плоского Толбачика можно видеть в период Трещинного извержения 2012–2013 гг. пониженные значения в районе промежуточного очага, на глубинах 4–6 км. Питающий канал наблюдается до глубин 15–20 км. Значения V_p/V_s на глубинах ниже 6 км в среднем близки к нормальным. Юго-восточнее Плоского Толбачика, в Толудской зоне, повышенные значения наблюдаются на глубине 15–20 км.

Оценки распределений параметра V_p/V_s в исследуемой области

На графиках распределения значений параметра показаны кривые нормированных значений для указанных вулканов. Можно видеть, что максимум средних значений для трех вулканов отличаются. Для Шивелуча это повышенное значение, равное 2.1, причем кривая сдвинута в область повышенных значений. Для Ключевского максимум в окрестности 1.8. Для Плоского Толбачика максимум также в районе 1.8, но при этом кривая сдвинута в область низких значений V_p/V_s (рис. 5).

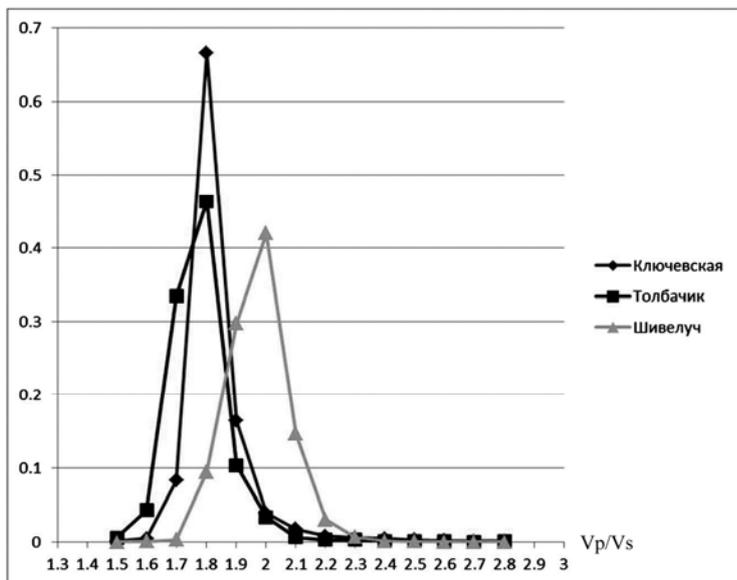


Рис. 5. Нормированные графики распределения параметра V_p/V_s для трех вулканов – Ключевского, Шивелуча, Плоского Толбачика

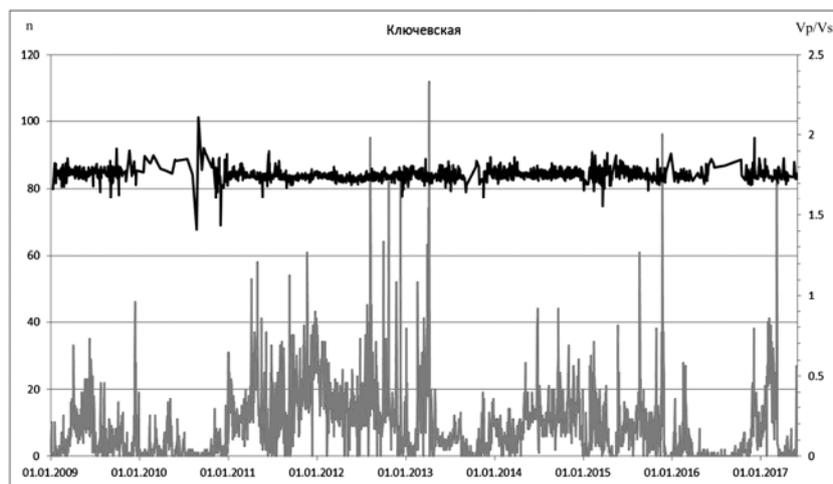


Рис. 6. Графики изменения V_p/V_s и суточного числа землетрясений зарегистрированных в окрестности Ключевского вулкана

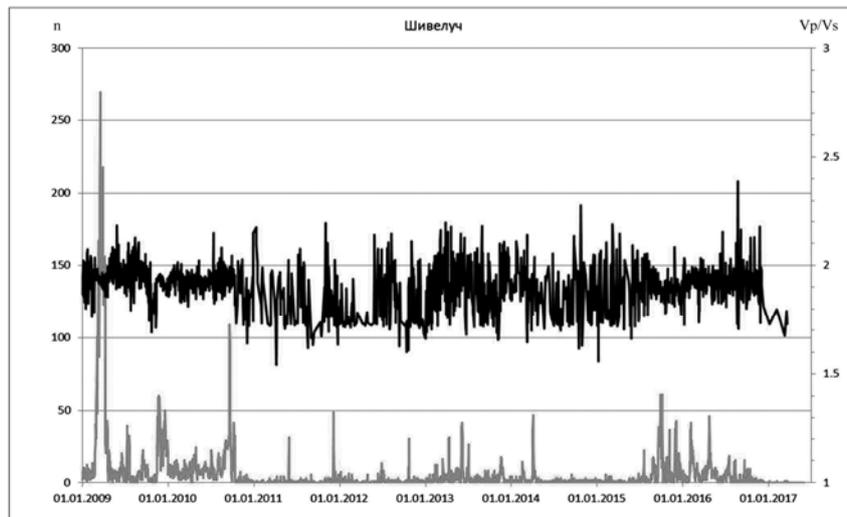


Рис. 7. Графики изменения V_p/V_s и суточного числа землетрясений зарегистрированных в окрестности вулкана Шивелуч

На графиках иллюстрирующих зависимость V_p/V_s от активности вулканов (рис. 6, 7, 8), можно видеть, что после очередного пика активности вулкана среднее значение V_p/V_s несколько меняется. Особенно хорошо это заметно на рис. 7 (Шивелуч), но имеет место и для других вулканов.

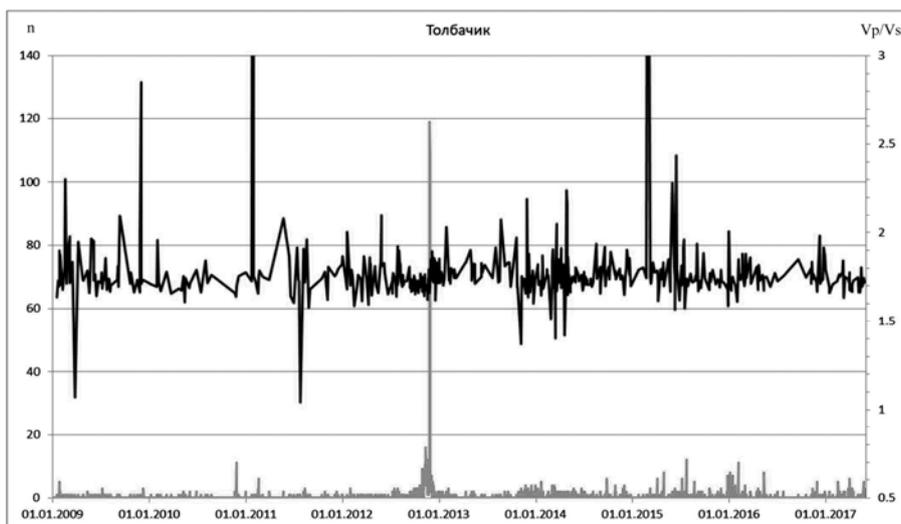


Рис. 8. Графики изменения V_p/V_s и суточного числа землетрясений зарегистрированных в окрестности вулкана Плоский Толбачик

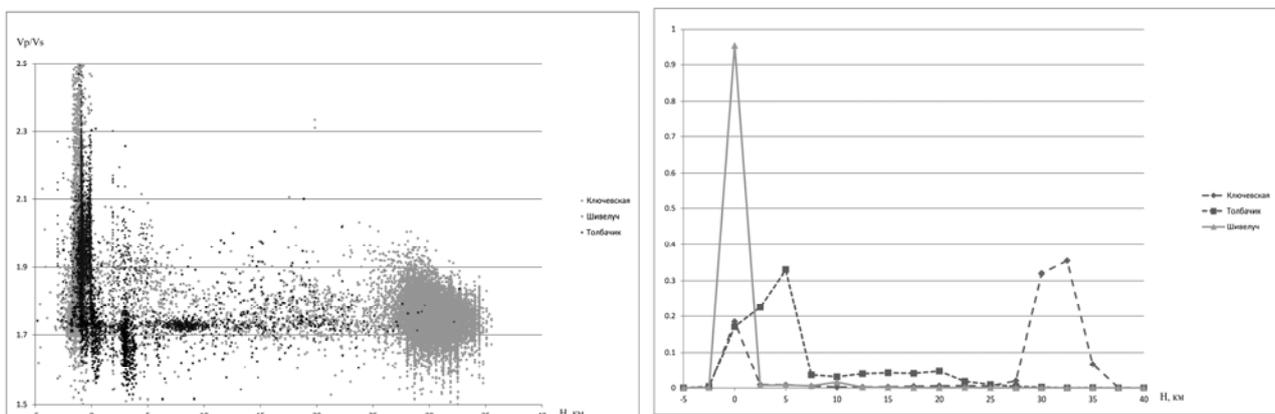


Рис. 9. Распределения значений параметра V_p/V_s по глубине. Точечная диаграмма (а) и нормированные значения (б)

На точечном распределении единичных значений параметра от глубины для трех вулканов можно видеть, что для Ключевского вулкана и вулкана Шивелуч характерны повышенные значения V_p/V_s достигающие значений 2.3 и выше в постройке вулканов, на глубинах -3–0 км. В области периферического очага, на глубинах 25–35 км для Ключевского вулкана можно видеть как повышенные значения до уровня 1.9, так и понижены до уровня 1.5. Вероятно, значения зависят от поступления коромантийной магматической смеси и состояния вещества в процессе перемещения магмы в канале. Интерес вызывают значения для вулкана Плоский Толбачик. Пониженные значения наблюдаются как в постройке вулкана, так и в области промежуточного очага на глубинах 3–5 км, где величины опускаются до значений 1.5–1.6. В области слоев нейтральной плавучести на границе гранитного и базальтового слоев на глубинах 10–20(25) км можно видеть увеличение дисперсии, разброс значений параметра вокруг нормального значения V_p/V_s 1.73 ± 0.05 .

На графиках числа событий на разных глубинах можно видеть, что максимум для вулкана Шивелуч на глубине 0 км, т.е. постройка вулкана. Для Ключевского максимум на глубинах 30–35 км, т.е. в области периферического очага на границе коры и мантии. Для Плоского Толбачика – 0–5 км, т.е. в области промежуточного очага по Федотову [8].

Обсуждение результатов

По полю параметра V_p/V_s можно проследить за изменением вулканического процесса в пространстве и времени. Поле, в какой-то степени отражает состояние магматического процесса, вероятно, так же и вещественный состав магматического вещества, а также изменения поля напряжений в различные периоды развития вулканической активности. Формирование в поле параметра V_p/V_s градиентных зон (границ аномалий повышенных и пониженных значений), по аналогии с результатами, полученными в период подготовки сильных землетрясений, могут предварять и свидетельствовать о подготовке вулканических извержений. Аномалии параметра также, свидетельствуют о состоянии вещества в этих областях.

Низкие значения V_p/V_s , наблюдающиеся в области промежуточных магматических очагов, под Ключевским вулканом на глубинах 8–10 км, и на глубинах 4–5 км под Плоским Толбачиком, вероятно, свидетельствуют о состоянии вещества в этих областях, и могут быть связаны с магматическими расплавами и флюидно-газовой составляющей.

Следует констатировать, что параметр не остается постоянным ни во времени, ни в пространстве в периоды развития процесса вулканической активности. Для различных периодов характерно свое поведение поля.

Список литературы

1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л. Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.
2. Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевой группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и Сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
3. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
4. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.
5. Славина Л.Б., Гарагаи И.А., Горельчик В.И., Иванов Б.В., Белянкин Г.А. Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 49–59.
6. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Трехмерная скоростная модель среды в районе Карымского вулканического центра по данным региональной сейсмичности // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 377–386.
7. Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Сеньюков С.Л. Скоростное строение коры и верхней мантии в районе северной группы вулканов Камчатки (по данным времен пробега P - волн от вулканических землетрясений) // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 3. С. 38–50.
8. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.

ИОНОСФЕРНЫЕ И АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ ПЕРЕД КАМЧАТСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 30.01.2016

Смирнов С.Э.¹, Бычков В.В.¹, Корсунова Л.П.², Хегай В.В.²

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Камчатский край, sergey@ikir.ru

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
г. Москва, г. Троицк

Введение

Анализ различных экспериментальных данных, полученных в зоне подготовки любого сильного землетрясения незадолго до сейсмического толчка, всегда представляет большой интерес. Такой анализ, прежде всего, необходим для создания наиболее полного физического «портрета» последовавшего сейсмического события и, в перспективе, для определения специфических черт, возникающих на завершающей фазе его подготовки.

Конечная цель подобного рода исследований – выделить совокупность таких аномалий в поведении разных измеряемых физических параметров, которые могли бы служить возможными временными индикаторами назревающего толчка (его возможными предвестниками) для использования в прогнозе других землетрясений. Однако выделение аномалий, предшествующих землетрясениям (АПЗ) с некоторым временным упреждением, еще не означает их обязательной причинной связи с подземными толчками, хотя они могут устойчиво коррелировать с сейсмическими событиями с каким-то характерным временем их упреждения (например, в зависимости от магнитуды землетрясения). В любом случае необходимо накапливать наблюдательный материал, который поможет ответить как на фундаментальные вопросы о возможной причинной связи АПЗ с последовавшим землетрясением, так и для решения практических вопросов прогноза, если некая совокупность АПЗ будет хорошо коррелировать с моментом толчка с подходящим временным упреждением.

В настоящей работе не обсуждается генезис проявления в атмосфере Земли сейсмогенных аномалий, предшествующих землетрясениям и обусловленных процессами подготовки землетрясений в области их очагов внутри Земли. Возможные физические механизмы связи возмущений в ионосфере, предшествующих землетрясениям (ВИПЗ), которые можно рассматривать как ионосферные предвестники землетрясений подробно рассмотрены, в частности, в монографии [3], а аномалии в приземном атмосферном электричестве, предшествующие землетрясениям (АПАЭПЗ), являющиеся электрическими предвестниками землетрясения (ЭПЗ), детально разбираются в монографии [8], а также в работах [5, 6]. Важный физический аспект непосредственной связи сейсмогенных электрических аномалий в твердой Земле перед землетрясениями с соответствующими их проявлениями в атмосфере приземного слоя, обусловленный переносом положительно заряженных «дырок» (происходящим при сжатии в магматических породах), подробно описан в работах [11, 9]. Общий обзор предвестников землетрясений всех возможных типов и их физическая природа подробно обсуждаются в монографии [7].

Целью настоящей работы является выделение ВИПЗ и АПАЭПЗ и их сопоставительный анализ перед Камчатским землетрясением 30.01.2016 г. (географические координаты эпицентра $\varphi_e = 54.01^\circ N$, $\lambda_e = 158.01^\circ E$, магнитуда $M = 7.2$, глубина гипоцентра $h = 161$ км), произошедшим в 03:25 UT на эпицентральной дистанции $R \cong 116$ км от комплексной геофизической обсерватории «Паратунка» (географические координаты $\varphi = 52.97^\circ N$, $\lambda = 158.25^\circ E$). Для этого были использованы данные проводившихся на ней пятнадцатиминутных измерений параметров ионосферы, десятиминутных измерений вертикальной компоненты (E_z) приземного квазистатического атмосферного электрического поля (КАЭП) и соответствующих ему величин электропроводности приземного слоя воздуха (λ^+ и λ^-) в январе 2016 г.

Геофизическая и метеорологическая обстановка

При анализе вариаций в ионосфере большую роль играет наличие или отсутствие в рассматриваемый период времени существенных геомагнитных возмущений, которые могут влиять

на ионосферу (причем особенно сильно их влияние на область F ионосферы, проявляющееся глобально, а исследование приземного атмосферного электричества может осложнять наличие осадков [6, 4].

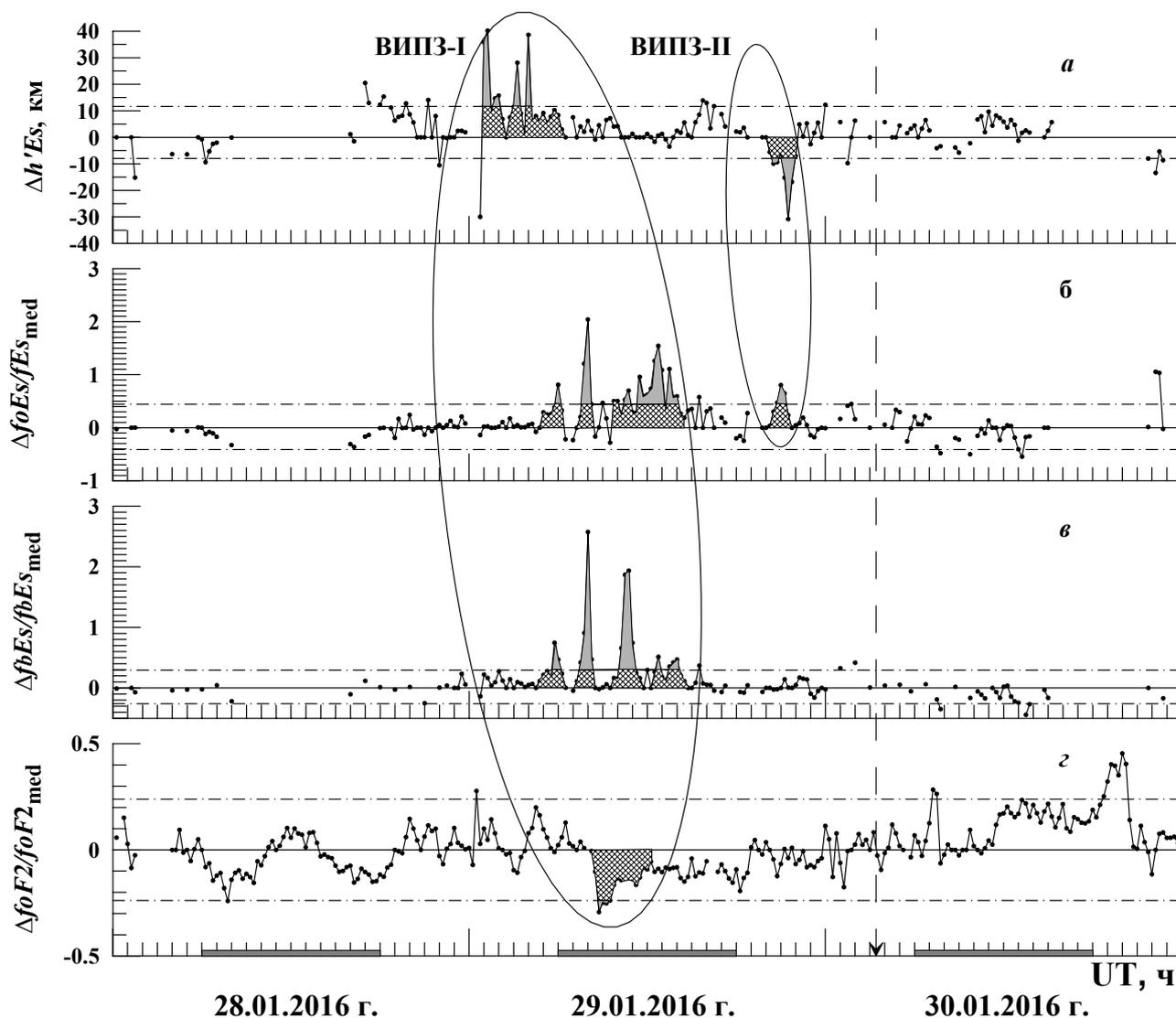


Рис. 1. Изменения параметров ионосферных слоев Es и $F2$ со временем (UT): $a - \Delta h'Es$; $б - \Delta foEs/foEs_{med}$; $в - \Delta fbEs/fbEs_{med}$; $г - \Delta foF2/foF2_{med}$. Штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, темные прямоугольники на оси абсцисс обозначают интервалы местного времени от 18:00 до 06:00 LT.

Штрихпунктирные линии фиксируют полосы разбросов $K\pm$, а выходящие за них вариации (выделенные аномалии) даны темной заливкой. Части этих аномалий, не выходящие за границы разбросов, для удобства восприятия заштрихованы. Аномалии объединены в две группы (эллипсы ВИПЗ-I и ВИПЗ-II)

Во-первых, с 25 по 31 января по мировому времени, согласно данным obs. «Паратунка», не наблюдалось осадков. Уровень шумов в сигнале КАЭП при наличии осадков на два порядка выше, чем в условиях «хорошей погоды», что могло бы затруднить выделение аномалий [4].

Во-вторых, величина трехчасового Kp -индекса планетарной геомагнитной активности в этот же период не превышала уровня $2+$ во все часы суток (что соответствует геомагнитно-спокойным условиям), за исключением последних трех часов 31 января.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены вариации ионосферных параметров в течение трех дней по UT. Штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, темные прямоугольники на оси абсцисс обозначают интервалы местного времени от 18:00 до 06:00 LT. Штрихпунктирные линии фиксируют полосы разбросов $K\pm$, а выходящие за них вариации (выделенные аномалии) даны темной заливкой. Части этих аномалий, не выходящие за границы разбросов, для удобства восприятия заштрихованы. Аномалии объединены в две группы (эллипсы ВИПЗ-I и ВИПЗ-II).

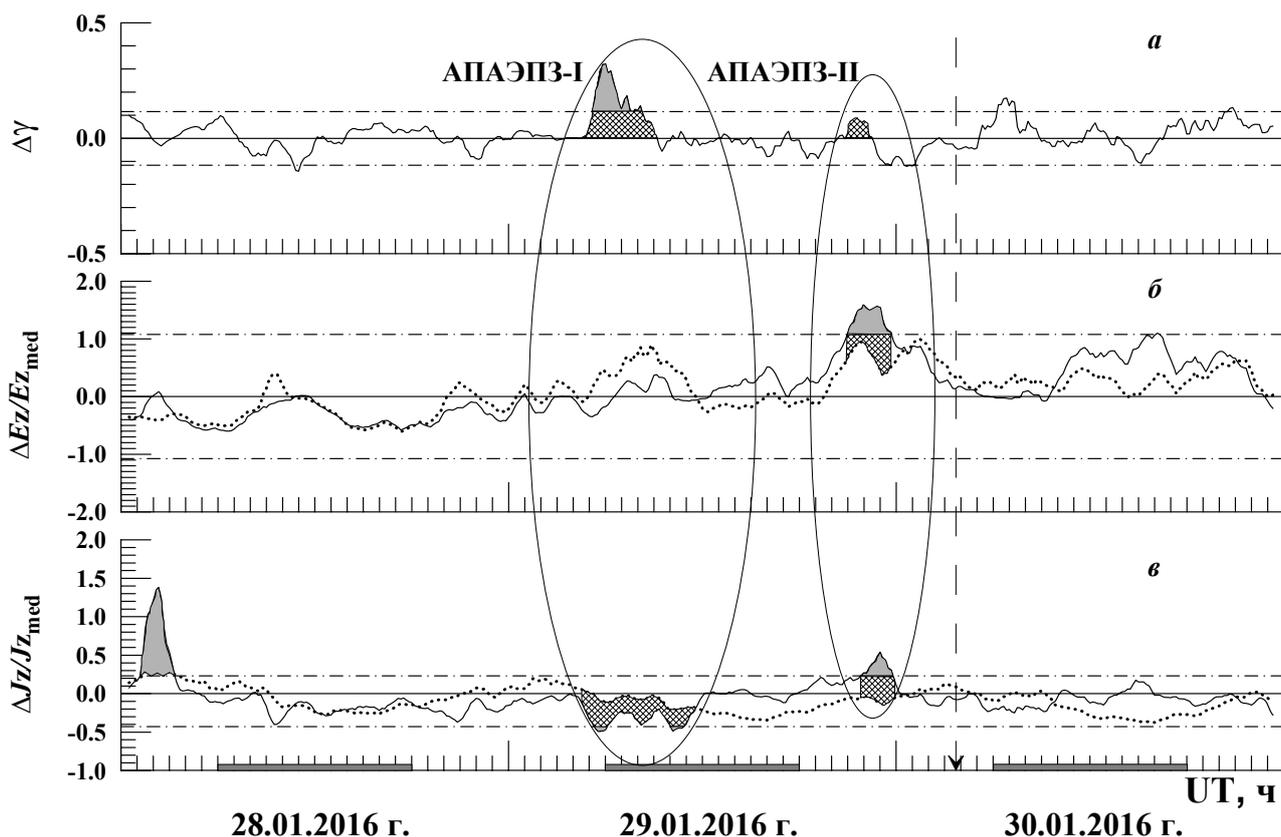


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для электрических характеристик приземного слоя атмосферы: *a* – $\Delta\gamma$; *б* – $\Delta E_z/E_{z_{med}}$; *в* – $\Delta J_z/J_{z_{med}}$. Выделены две группы аномалий (эллипсы АПАЭПЗ-I и АПАЭПЗ-II) и отдельно – аномалия $\Delta J_z/J_{z_{med}}$ в начале суток 28.01.2016 г. Пунктирные линии на панелях *б* и *в* показывают вариации этих же параметров в соответствии с «теоретической» моделью зависимости $E_z = E_z(\lambda_{\Sigma})$

В группе ВИПЗ-I аномалии действующей высоты $h'Es$ появляются на ~ 4 ч раньше, чем в частотных характеристиках спорадического слоя Es , а аномалия в $F2$ -слое возникает еще на 4 ч позже. Такое распределение временной задержки получится, если предположить, что в результате развития сейсмического процесса на заключительной фазе его подготовки (близко к моменту толчка), часть сейсмической энергии канализируется от земли в верхние слои атмосферы. Она сначала достигает высот спорадического слоя Es и только потом более высоко лежащего $F2$ -слоя (при этом изменяются и их частотные характеристики), однако, конечно, ситуация может быть и более сложной. Здесь под сейсмической энергией понимается потенциальная энергия среды, накопленная в виде ее упругих напряжений, которая при землетрясении, главным образом, идет на разрушение материала среды, трение при подвижке и образование сейсмических волн. До магистрального разрыва малая (по сравнению с моментом главного удара) часть уже накопленной энергии частично выделяется в атмосферу, например в виде тепла, инфразвука и т. п. (см., в частности, работу [10]).

Первая аномалия группы ВИПЗ-I в $h'Es$ появляется за ~ 26.5 ч до землетрясения, а последние (в $foEs$ и $fbEs$) заканчиваются за ~ 13 ч до него. Общая длительность аномалий в группе (от начала появления первой до исчезновения последней в этой группе) составляет ~ 13 ч. Анализ группы аномалий ВИПЗ-I показывает, что сначала значительно возрастает действующая высота, с которой наблюдаются отражения, а затем (с задержкой порядка часов) резко возрастают частоты $fbEs$ и $foEs$ (а не только $fbEs$), что свидетельствует о развитии выраженной неоднородности структуры слоя в горизонтальных направлениях. При этом горизонтальные размеры отдельных крупных «облаков» с повышенной электронной концентрацией составляют несколько сотен километров, а электронная концентрация распределена неоднородным образом внутри каждого такого «облака» (см. монографию [1]). Таким образом, над станцией зондирования ионосферы появляются более плотные и более неоднородные «облака» плазмы внутри регулярного слоя E , собственно и составляющие спорадический слой Es .

Следует также отметить еще одно обстоятельство. Для группы аномалий ВИПЗ-I резкое начальное уменьшение высоты слоя $h'Es$ коррелирует с одновременным «выбросом» $foF2$ (нижняя

панель), однако, так как длительность этого возмущения составляет менее получаса (всего одна точка), то по принятому ранее условию, этот «выброс» в $foF2$, совпадающий с резким понижением в $h'Es$, не попадает (формально) под определение аномалии.

Группа ВИПЗ-II проявляется только в спорадическом слое Es практически синхронно (в $h'Es$ и $foEs$) за ~ 6.4 ч до толчка и длится ~ 1.5 ч. Здесь корреляция возрастания $foEs$ с уменьшением высоты слоя $h'Es$ свидетельствует о том, что неоднородность отражающего слоя возрастает одновременно с его понижением, при этом нельзя однозначно говорить об увеличении плотности слоя, так как $fbEs$ практически не изменяется.

Рисунок 2 выполнен по аналогии с рис. 1, но для соответствующих электрических параметров приземного слоя атмосферы. Аномалии на этом рисунке также объединены в две группы (эллипсы АПАЭПЗ-I и АПАЭПЗ-II), и отдельно показана существенная относительная аномалия $\Delta Jz/Jz_{med}$ в начале суток 28.01.2016 г.

В группе АПАЭПЗ-I начало положительных аномалий в приращении коэффициента униполярности $\Delta\gamma$ совпадает с началом отрицательных относительных приращений вертикального тока $\Delta Jz/Jz_{med}$, при этом не наблюдаются аномалии в относительных изменениях вертикальной компоненты КАЭП Ez . По времени группа АПАЭПЗ-I примерно соответствует группе ВИПЗ-I рис. 1.

В группе АПАЭПЗ-II развитие положительного относительного приращения вертикального тока $\Delta Jz/Jz_{med}$ примерно на час запаздывает от такого же относительного приращения КАЭП $\Delta Ez/Ez_{med}$, причем в это время положительное абсолютное приращение коэффициента униполярности $\Delta\gamma$ приближается к верхней границе своего разброса. По времени эллипс АПАЭПЗ-II соответствует эллипсу ВИПЗ-II рис. 1.

Отдельно выделена значительная аномалия в $\Delta Jz/Jz_{med}$, существующая с 01:00 по 03:00 UT 28.01.2016 г., которая не сопровождается аномалиями в других электрических параметрах приземного слоя воздуха, однако в $\sim 01:30$ UT регистрируется отрицательный «выброс» приращения действующей высоты $\Delta h'Es$ (см. рис. 1). К сожалению, ионосферные данные по слою Es на этом интервале времени далее (вблизи этого момента времени) слишком фрагментарны. Можно только отметить, что этот «выброс» приращения действующей высоты $\Delta h'Es$ в ионосфере возникает по времени несколько позже, чем возмущение в приземном электричестве, когда аномалия в $\Delta Jz/Jz_{med}$ уже успела развиться.

Более детальное сопоставление рис. 2 с рис. 1 (путем совмещения их временных осей) обнаруживает следующее. Аномалии в группе ВИПЗ-II появляются практически синхронно с началом аномалии в КАЭП $\Delta Ez/Ez_{med}$, с незначительной задержкой. В группе ВИПЗ-I ситуация несколько сложнее. Аномальные изменения частотных параметров ионосферы, тесно связанные со структурой спорадического слоя Es , также начинаются с задержкой (незначительной для $\Delta foEs/foEs_{med}$, $\Delta fbEs/fbEs_{med}$, и около 4 часов для $\Delta foF2/foF2_{med}$) после начала аномалий в группе АПАЭПЗ-I величин $\Delta Jz/Jz_{med}$ и $\Delta\gamma$. Однако высотная его характеристика $\Delta h'Es$, начинает свой аномальный ход раньше примерно за три часа до того, как значения $\Delta Jz/Jz_{med}$ станут аномально низкими (оставаясь отрицательными). Тем не менее, на рис. 2 видно, что на протяжении этих трех часов величина $\Delta Jz/Jz_{med}$ не только отрицательна, но и проходит существенно ниже «теоретической» кривой для $\Delta Jz/Jz_{med}$, т.е. несмотря на то, что возмущение $\Delta Jz/Jz_{med}$ по своей величине еще не выходит за нижнюю границу своего разброса, высота ионосферного слоя Es растет, прежде чем в нем начнутся существенные его структурные изменения, что конечно, требует какого-то времени.

Сопоставление рисунков 1 и 2 показывает хорошую корреляцию между аномалиями групп ВИПЗ-I и АПАЭПЗ-I, равно как и групп ВИПЗ-II и АПАЭПЗ-II, и, в основном, более раннее развитие аномалий в приземном электричестве по сравнению с развитием аномалий в ионосфере. Наблюдение такого совпадения во временном ходе аномалий в ионосфере и электричестве приземной атмосферы перед землетрясением 30.01.2016 г. свидетельствует в пользу гипотезы о том, что эти аномалии могут быть связаны с процессом подготовки землетрясения и являются ионосферными предвестниками землетрясения (ИПЗ) и электрическими предвестниками (ЭПЗ) этого землетрясения соответственно.

Выводы

Проведен сопоставительный анализ данных пятнадцатиминутных измерений вертикального зондирования ионосферы и десятиминутных измерений вертикальной компоненты (Ez) приземного квазистатического атмосферного электрического поля (с соответствующими ему величинами электропроводности приземного слоя воздуха λ^+ и λ^-) на комплексной геофизической обсерватории "Паратунка" за период с 28.01.2016 г. по 30.01.2016 г. Цель состояла в обнаружении возможных

аномалий, предшествующих землетрясению магнитудой $M = 7.2$, произошедшему 30.01.2016 г. в 03:25 UT с эпицентральной дистанцией 117 км от обсерватории.

Выделенные группы возмущений в ионосфере, предшествующие землетрясению (ВИПЗ-I,-II), как оказалось, хорошо коррелируют по времени с аномалиями в приземном атмосферном электричестве, предшествующими землетрясению (АПАЭПЗ-I,-II). С учетом ранее проведенных исследований по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений для Камчатского региона, выполненных в работе [2], с высокой степенью вероятности можно считать, что выделенные аномалии в ионосфере были ионосферными предвестниками землетрясения, а соответствующие им аномалии в приземном атмосферном электричестве были электрическими предвестниками землетрясения.

Список литературы

1. Гериман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М: Наука, 1974. 256 с.
2. Корсунова Л.П., Хегай В.В. Об эффективности метода поиска ионосферных предвестников землетрясений по параметрам спорадического слоя E и регулярного слоя $F2$ / Сб. докл. VI Междунар. конф. "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений". с. Паратунка, Камчатский край, 9–13 сентября 2013 г. / Отв. ред. Б. М. Шевцов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. С. 412–417.
3. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 303 с.
4. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузевич А.В., Смирнов С.Э. Особенности атмосферных шумов, наложенных на вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45. № 5. С. 690–705.
5. Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
6. Руленко О.П. Новая методика выявления и изучения предвестника землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2008. № 2. Вып. № 12. С. 42–47.
7. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
8. Электромагнитные предвестники землетрясений / Ред. М. А. Садовский. М.: Наука, 1982. 69 с.
9. Freund F.T., Takeuchi A., Lau B.W.S. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – a step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions // Phys. Chem. Earth. 2006. Parts A/B/C. V. 31. Iss. 4–9. P. 389–396.
10. Ouzounov D., Freund F.T. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // Adv. Space Res. 2004. V. 33. Iss. 3. P. 268–273.
11. St-Laurent F., Derr J. S., Freund F.T. Earthquake lights and the stress-activation of positive hole charge carriers in rocks // Phys. Chem. Earth. 2006. Parts A/B/C. V. 31. Iss. 4–9. P. 305–312.

АНОМАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА КАМЧАТКЕ И ВОЗМОЖНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ АНОМАЛИЙ

Смирнов С.Э.¹, Михайлова Г.А.², Михайлов Ю.М.², Капустина О.В.²

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Камчатский край, sergey@ikir.ru

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
г. Москва, г. Троицк

Введение

Впервые нестационарные аномалии уходящего от Земли потока инфракрасного (ИК) излучения были обнаружены на спутнике NOAA-AVHRR при пролете над Среднеазиатской сейсмически активной зоной [2, 6]. Оказалось, что за несколько дней до землетрясений (ЗТ) наблюдаются положительные аномалии ИК-излучения (преимущественно в ночное время), а наиболее сильный эффект проявляется в предрассветные часы. Явление проявляется на больших пространствах вдоль разломов перед коровыми землетрясениями с магнитудой $M > 4.5$. Одновременные измерения температуры почвы и воздуха позволили сделать вывод, что источник уходящего ИК-излучения находится либо непосредственно на поверхности, либо под землей. Это явление вызвало большой интерес как дополнительный признак предстоящего ЗТ в совокупности с другими геофизическими аномалиями до него, но, возможно, и как главный фактор в изучении механизмов литосферно-ионосферного взаимодействия. Исследования этого эффекта проводились либо только по космическим снимкам потоков излучений, зарегистрированных на серии спутников (NASA), например, [1, 13, 18]; либо с использованием одновременных записей на метеорологических спутниках GOES [12]; либо по измерениям температуры и дебита воды в бассейне реки [17]. Тепловые аномалии были обнаружены также в вариациях температуры атмосферы по данным метеорологических станций в течение нескольких недель до сильных землетрясений в Мексике в период с 1973 по 2003 г. [11].

Насколько известно авторам, до настоящего времени отсутствуют одновременные исследования тепловых аномалий и квазистатического электрического поля в приземной атмосфере в сейсмически активных зонах накануне сильных землетрясений. Впервые аномалия электрического поля необычного вида была зарегистрирована на Камчатке перед ЗТ с магнитудой $M = 7.0$ 13 ноября 1993 г. [8]. Одновременно наблюдалось усиление естественного электромагнитного излучения на частоте $f = 1.2$ кГц, в то время как на других частотах (5.4; 8.3 кГц) эффект отсутствовал (характерное явление для локальной грозовой активности [5]). Временная форма аномального электрического сигнала представляла собой колебания большой интенсивности, характерные для локальной грозовой активности [4, 5]. Этот аномальный электрический сигнал автор [7] отнес ко второму типу, в отличие от аномалии первого типа, показанной в качестве примера на рис. 1 накануне трех ЗТ (см. табл.). Как видно, сигналы этого типа представляют собой бухтообразное понижение интенсивности длительностью несколько часов (в некоторых случаях даже со сменой знака [16]) и наблюдаются преимущественно накануне относительно слабых ЗТ. Традиционно аномалии электрического поля такого вида объясняют влиянием радона на электропроводность приземной атмосферы, поступающего в атмосферу Земли. В процессе активного образования трещин перед ЗТ концентрация его заметно возрастает. В свою очередь, интенсивность радиоактивных газов зависит и от метеорологических величин: температуры, относительной влажности и давления атмосферы, в вариациях которых в более ранних публикациях перед ЗТ были выделены предвестники [3]. Очевидно, что наличие аномалий электрического поля двух типов указывает на их различную природу, обусловленную сложным взаимодействием между электрическими и метеорологическими процессами в приземной атмосфере перед ЗТ.

В настоящей работе проанализированы суточные вариации электрических величин (электропроводность воздуха и напряженность квазистатического электрического поля) в совокупности с вариациями метеорологических величин (температура, относительная влажность, давление и скорость ветра) в приземной атмосфере Камчатки накануне сильных ЗТ.

Исходные экспериментальные данные

Рассмотрены суточные вариации электрических и метеорологических величин в обл. «Паратунка» ДВО РАН ($\varphi = 52.97^\circ N$; $\lambda = 158.25^\circ E$) накануне трех сильных землетрясений с магнитудой $M > 7$, произошедших на Камчатке в 2006, 2007 и 2016 гг. Напряженность квазистатического электрического поля (E_z -компонента, В/м) измерена прибором «Поле-2»; электропроводность атмосферы, обусловленная отдельно положительными (σ_+) и отрицательными (σ_-) ионами (либо фСм/м, либо в относительных единицах) – прибором «Электропроводность-2»; давление (P , гПа), температура (T , °С), влажность (H , %), скорость ветра (V , м/с) – цифровыми станциями WS-2000 и WS-2300. Все величины измерены с дискретностью по времени 10 мин.

На рис. 1 приведены записи суточных вариаций наблюдаемых величин перед землетрясением 15 ноября 2006 г. $t = 11:14$ UTC; $M = 8.3$; $h = 30.3$ км; $\varphi = 46.614^\circ N$; $\lambda = 153.23^\circ E$. в период с 7 по 15 ноября ($R = 10^{0.43M} = 3707$ км; $r \sim 792$ км, где R – радиус сейсмически активной зоны в коре Земли накануне ЗТ [10], r – расстояние от обсерватории до эпицентра). 7 ноября при скорости ветра менее 4 м/с, практически неизменном давлении, в отсутствии облачности (данные местной метеостанции) в приземной атмосфере сохранялись условия «хорошей погоды». В этих условиях наблюдались слабые суточные вариации величины E_z в пределах 100 ± 50 В/м (на рисунке левая ось ординат); слабые вариации электропроводностей обоих знаков; регулярный суточный ход температуры с максимумом $+5^\circ C$ в местный полдень (01:30 UT) и минимумом $-3^\circ C$ перед восходом Солнца; регулярный суточный ход относительной влажности (в противофазе с температурой) от 40 до 70 % соответственно. Эти условия в приземной атмосфере сохранялись и в предшествующие дни до 7 ноября.

Как видно на рисунке, в период с 7 ноября наблюдался положительный тренд температуры, связанный с включением дополнительного источника тепла, который действовал в течение десяти дней до 16 ноября, последовательно повышая среднюю температуру атмосферы от $+1$ до $+6^\circ C$, вопреки отрицательному тренду в это время года. Относительная влажность воздуха в нарушение регулярного суточного хода сохранялась практически неизменной и очень высокой: $\sim 90\%$ и выше. Одновременно были зарегистрированы обильные осадки. В некоторые дни (8, 13, 15 ноября) на графике температуры появились кратковременные всплески $\Delta T \sim 2^\circ C$, которые сопровождалось появлением в вариациях электрического поля знакопеременных колебаний большой интенсивности: ± 1000 В/м (правая ось ординат; на вставке более детально с шагом дискретизации $\Delta t = 1$ мин показаны аномалии электрического поля второго типа 8 и 15 ноября) и значительным ростом электропроводности (особенно отрицательного знака), связанной с обильными осадками и в два–три раза превышающей значения в условиях «хорошей погоды». Одновременно наблюдалось резкое понижение атмосферного давления и усиление ветра до 16 м/с, т.е. происходили метеорологические явления, характерные для условий локальной грозовой активности в приземной атмосфере. Эти процессы наблюдались до момента сильного ЗТ, указанного стрелкой на рисунке, и сохранились на следующий день после него. Далее источник дополнительного тепла как бы выключился, и во второй половине дня 16 ноября восстановились условия «хорошей погоды».

Также были обработаны данные при землетрясении 13 января 2007 г.: $t = 04:23$ UTC; $M = 8.1$; $\varphi = 46.48^\circ N$, $\lambda = 154.07^\circ E$, $h = 10$ км ($R = 3041$ км; $r \sim 780$ км). В этом случае процессы в приземной атмосфере развивались так же, как и при землетрясении 15 ноября 2006 г. А именно: 3 и 4 января в атмосфере сохранялись условия «хорошей погоды» со слабым ветром; низким давлением; регулярным суточным ходом температуры от $-15^\circ C$ до $-27^\circ C$ и низкой относительной влажностью ($\sim 40\%$); низкими значениями электропроводности и со слабо возмущенными вариациями электрического поля в пределах 50–120 В/м. 5 января включился дополнительный источник тепла, благодаря действию которого температура возросла до $-10^\circ C$. При этом при постоянстве давления и низкой относительной влажности в полтора–два раза увеличилась электропроводность и уменьшилась напряженность электрического поля ниже 50 В/м. При дальнейшем росте температуры 7 января усилился ветер до 20 м/с, возросла относительная влажность до 90 %, и в электрическом поле возник отклик до величины ~ 1500 В/м, который сопровождался высокой температурой и высокой относительной влажностью (согласно данным местной метеослужбы, ливневыми осадками). Благодаря осадкам, несущим объемные заряды, электропроводность обоих знаков увеличилась более чем в два раза по сравнению с условиями «хорошей погоды» и испытывала заметные колебания в течение этого периода. Эти данные интересны тем, что при высокой температуре, но низкой влажности наблюдаются усиление электропроводности и соответственно ослабление электрического поля. Мощные всплески электрического поля грозовой природы происходили в условиях, когда

температура аномально возросла (практически до нуля) при столь же аномально высокой относительной влажности (~ 100).

Далее были обработаны суточные вариации наблюдаемых величин при землетрясении 30 января 2016 г. $t = 03:25:12$ UTC; $M = 7.2$; $\varphi = 53.98^\circ N$, $\lambda = 158.55^\circ E$, $h = 172.4$ км ($R = 1247$ км; $r = 114$ км). В отличие от предыдущих случаев, поведение рассматриваемых величин иное. В суточном ходе температуры отсутствует положительный тренд, но выделяются два периода повышенных значений: 20 и 25–27 января, когда среднесуточные значения возросли до -2°C и до -6°C соответственно при нерегулярных вариациях относительной влажности. В этот период наблюдалось усиление ветра до 15 м/с. В эти дни выпал обильный снег, в результате чего в несколько раз возросла электропроводность и в вариациях электрического поля наблюдались сильные всплески до 1000 В/м, характерные для таких метеорологических условий. Для сравнения, в условиях «хорошей погоды», когда скорость ветра была ниже 4 м/с 18 и 23–24 января, в вариациях температуры отмечался регулярный суточный ход, отсутствующий в суточных вариациях относительной влажности, высокое атмосферное давление, низкая электропроводность и характерные слабые вариации электрического поля (левая ось ординат). По-видимому, в указанные выше дни действовал дополнительный источник тепла.

Обсуждение результатов и выводы

Как следует из архивов метеослужбы, зимние грозы на Камчатке случаются в среднем один раз в пять лет. Это редкое метеорологическое явление сопровождается обильными осадками в виде ледяного дождя или ливневого снега. Именно такое явление (по данным местной метеослужбы) наблюдалось в периоды рассмотренных нами трех сильных ЗТ в ноябре 2006 г., январе 2007 г. и январе 2016 г. с магнитудами $M = 8.3$; 8.1 ; 7.2 соответственно. Для возникновения грозовой активности в эти месяцы недостаточно тепла, поступающего от Солнца. Следовательно, для образования кучево-дождевых облаков, определяющих состояние грозовой активности в приземной атмосфере, необходим дополнительный источник теплового излучения. Проследим последовательно эффекты зимней грозы в суточных вариациях рассмотренных нами величин. Появилась аномалия электрического поля как знакопеременного, так и однополярного вида величины $E \sim 1000\text{--}1500$ В/м, в десятки раз превышающей сигнал в условиях «хорошей погоды». Такой вид сигнала характерен в условиях грозовой активности в теплое время года. Процесс сопровождался шквальным ветром ($V \sim 15\text{--}25$ м/с), обильным ливневым снегом, что отразилось в высокой относительной влажности ($\sim 90\text{--}100\%$), сохраняющейся практически неизменной в течение нескольких дней. Обильный снегопад и высокая влажность привели дополнительно к образованию в приземной атмосфере объемных зарядов, вызвавших сильный рост и изменчивость электропроводности воздуха (величина ее возросла в несколько раз по сравнению с условиями «хорошей погоды»). Но самая заметная аномалия наблюдалась в суточных вариациях температуры воздуха, а именно: в нарушении регулярных суточных вариаций и вопреки регулярному отрицательному тренду. Ее величины в эти зимние месяцы в течение 6–7 суток последовательно возрастали от 0°C до $+7^\circ\text{C}$; от -25°C до 0°C ; от -25°C до -5°C соответственно. Можно предположить, что именно этот дополнительный источник теплового излучения вызвал наблюдаемые эффекты в суточных вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере и определил природу аномального электрического сигнала второго типа. Источник этого излучения, как следует из одновременных измерений температуры в почве и на поверхности земли [2], располагается под поверхностью. Интенсивность его и продолжительность действия зависят от магнитуды и глубины землетрясения [14]. Наиболее эффективно его действие проявляется при сильных землетрясениях с магнитудой $M > 7$. Влияние этого источника должно проявляться и при более слабых ЗТ, под действием которого усиливается поток подпочвенного радона и отражается в увеличении электропроводности и возникновении аномального электрического сигнала первого типа [15]. Процесс усиления потоков радиоактивных газов был обнаружен также при сильном землетрясении [9], но его влияние, по-видимому, подавляется более сильными процессами образования кучево-дождевых облаков.

Как видно на рис. 1, источник аномального роста теплового излучения включается преимущественно в ночное местное время, ближе к восходу Солнца, т.е. во время отсутствия солнечного источника инфракрасного теплового излучения. Однако природа этой тепловой аномалии и привязка к ночному времени до сих пор не ясна. Существует несколько возможных сценариев этого процесса, обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи.

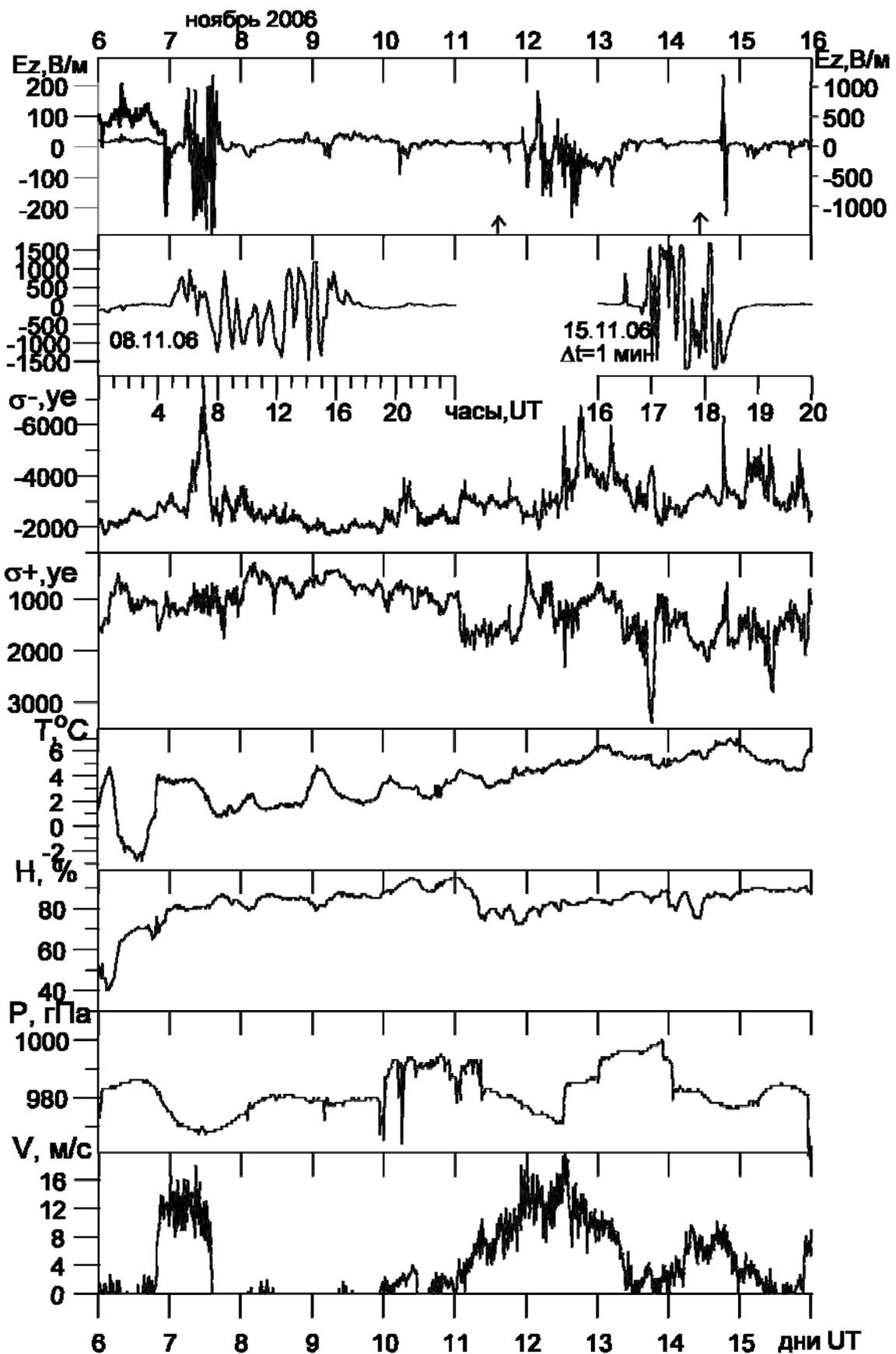


Рис. 1. Динамика суточных вариаций электрических (E_z - компоненты поля, электропроводности σ_+ и σ_-) и метеорологических (температуры $T^\circ\text{C}$, относительной влажности H , %, давления атмосферы P и скорости ветра V) величин перед землетрясением 15 ноября 2006 г. Стрелки на рисунке – моменты землетрясений

Таким образом, анализ суточных вариаций электрических и метеорологических величин, измеренных одновременно перед сильными землетрясениями с детальностью в 10 мин, впервые позволил исследовать тонкие процессы в приземной атмосфере земли при аномалии температуры. Более того, при слабом потоке естественного теплового излучения в эти сезоны года наблюдаемую динамику электрических и метеорологических процессов, по-видимому, можно объяснить появлением дополнительного источника теплового излучения сейсмической природы. Для завершения картины этих процессов целесообразно в будущем проанализировать записи потоков радиоактивных газов, а также записи уходящего инфракрасного излучения при пролете спутников над Камчаткой во время рассмотренных нами землетрясений.

Список литературы

1. Бондур В.Г., Воронова О.С. Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 годах // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 1. С. 79–85.
2. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // ДАН. 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
3. Милькис Б.Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 3. С. 36–47.
4. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 6. С. 839–852.
5. Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Смирнов С.Э. Эффекты грозовой активности в спектрах мощности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 6. С. 843–852.
6. Сальман А.Г., Тронин А.А. Вариации потока уходящего инфракрасного излучения Земли в сейсмоактивных регионах Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 7. С. 67–69.
7. Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
8. Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.93 г., $M = 7.0$ // ДАН. 1996. Т. 348. № 6. С. 814–816.
9. Руленко О.П., Кузьмин Ю.Я. Увеличение объемной активности радона и торона на Камчатке перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Тр. VI Международной конф. «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 9–13 сентября 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. С. 430–434.
10. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 5. P. 1025–1044.
11. Dunajevka M.A., Pulinets S.A. Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico // Atmosfera. 2005. V. 18. № 4. P. 235–247.
12. Ouzounov D., Bryant N., Logan Th., Pulinets S., Taylor P. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999–2003 // Phys. Chem. Earth. 2006. V. 31. P. 154–163.
13. Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. Outgoing long-wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics. 2007. V. 431(1–4). P. 211–220.
14. Rawat V., Saraf A.K., Sharma K., Shujat Y. Anomalous land surface temperature and outgoing long-wave radiation observations prior earthquakes in India and Romania // Nat. Hazards. 2011. V. 59. P. 33–46.
15. Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor // Bollettino di Geofisica Teorica ad Appliata. 2015. V. 56. № 2. P. 95–114.
16. Smirnov S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2008. V. 8. P. 745–749.
17. Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.V., Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V. 29. P. 501–506.
18. Tronin A., Hayakawa M., Molchanov O. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // J. Geodynamic. 2002. V. 33. P. 519–534.

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КАМЧАТСКОГО ФИЛИАЛА РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА В 2014-2017 гг.

Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, danila@emsd.ru

Оперативную оценку сейсмической опасности, прогноз землетрясений и извержений вулканов, а также их возможных последствий на территории Камчатского края осуществляет Камчатский филиал Российского экспертного совета (РЭС) по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) [6].

Заседания КФ РЭС проводятся не реже одного раза в неделю. Сообщения КФ РЭС с оценками сейсмической и вулканической опасности в Камчатском крае передаются в РЭС, Координационный прогностический центр (КПЦ) Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), Правительство Камчатского края, городскую администрацию, Главное управление МЧС России по Камчатскому краю, центр «Антистихия» МЧС РФ; управление ФСБ по Камчатскому краю. Передача заключений в средства массовой информации осуществляется через пресс-центр ГУ МЧС по Камчатскому краю.

При еженедельной оценке сейсмической опасности рассматриваются заключения о сейсмической обстановке по данным наблюдений за предвестниками сильных землетрясений, которые можно разделить на несколько групп в соответствии с природой используемых полей: сейсмологические, геофизические, геохимические, геодезические. Большинство используемых методик подробно рассмотрено в [6], там же приведены примеры их применения.

Таблица 1. Параметры землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших в Камчатском регионе ($\varphi = 49-62 N$, $\lambda = 152-169 E$) в 2014 г. – августе 2017 г. Координаты эпицентров, время, магнитуда M_c соответствуют каталогу КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>); R – эпицентрально-расстояние до г. Петропавловска-Камчатского. Значения магнитуд M_w взяты из каталога NEIC (<http://earthquake.usgs.gov>)

№	ггггммдд	ч:мин:сек	φ	λ	H , км	K_s	NEIC	M_c	R , км	Балл MSK-64
1	20160130	03:25:08	53.85	159.04	178	15.7	7.2 mww	7.1	100	PTR 4-5
2	20160320	22:50:18	54.14	163.14	43	14.9	6.4 mww	6.7	325	PTR 2-3
3	20160905	22:54:02	54.42	168.53	34	14.0	6.1 mww	6.7	670	Nikolskoe 3-4
4	20170329	04:09:22	56.97	163.22	43	15.0	6.6 mww	7.2	525	U-Kam 5-6
5	20170602	22:24:47	53.99	170.55	32	14.7	6.8 mww	7.4	795	
6	20170717	11:05:05	54.42	168.67	28	13.8	6.3 mww	7.0	680	Nikolskoe 3-4
7	20170717	23:34:08	54.35	168.90	7	16.1	7.7 mww		690	Nikolskoe 5-6

Примечание: жирным шрифтом отмечены землетрясения с $M \geq 6.0$, попавшие в Камчатскую сейсмоактивную область (КСО, район с координатами $\varphi = 50.5-56.5 N$, $\lambda = 156-167 E$, см. рис. 1).

Сильные землетрясения и их прогнозирование

За период 2014 – август 2017 г. в Камчатском регионе (район с координатами $\varphi = 49-62 N$, $\lambda = 152-169 E$) произошли 7 землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, характеристики которых представлены в таблице 1, а положение эпицентров на рисунке 1.

Для событий №№ 1 и 2, произошедших в районе КСО в таблицах 2 и 3 представлены методы, по которым были даны прогнозы или выявлены предвестники в реальном времени. Землетрясение № 4 (Южно-Озерновское) произошло вне КСО, тем не менее, считаем необходимым представить методики, по которым перед ним были выявлены предвестники (табл. 4). Перед землетрясениями №№ 3, 5, 6 и 7 (Ближне-Алеутское), также произошедшими вне указанного района, выявлялись предвестники по скважинным геоакустическим наблюдениям (Гаврилов В.А., ИВиС ДВО РАН), по

геомагнитным наблюдениям (Щекотов А.Ю., ИФЗ РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН), по кинематическому предвестнику (Славина Л.Б., ИФЗ РАН), в ОНЧ-излучении (Дружин Г.И., ИКИР ДВО РАН).

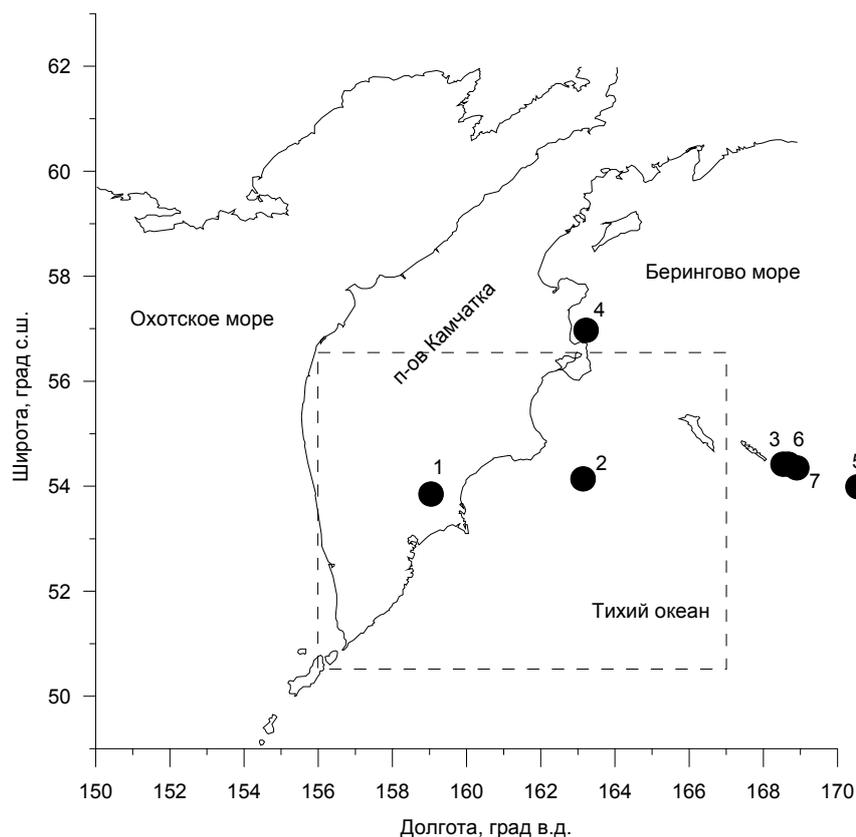


Рис. 1 Карта эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ в 2014 г. – августе 2017 г. (нумерация согласно табл. 1). Пунктиром показан район КСО. Черными кружками показаны землетрясения, перед которыми были даны прогнозы, либо были выявлены предвестники, как в реальном времени, так и ретроспективно

Оценка и прогнозирование состояния вулканов

При оценке вулканической обстановки используются заключения KVERT – (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) [1, 2], а также материалы о сейсмической активности вулканов, полученные в КФ ФИЦ ЕГС РАН [3–5]. За рассматриваемый период в КФ РЭС поступали прогнозы развития активности вулканов Шивелуч и Безымянный.

Вулкан Шивелуч. Прогнозы извержения вулкана подавались сотрудниками лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) КФ ФИЦ ЕГС РАН 19 и 28 февраля 2014 г. Прогноз от 28 февраля 2014 г. признан успешным.

Вулкан Безымянный. Сотрудниками ЛИСВА КФ ФИЦ ЕГС РАН были поданы три прогноза извержения вулкана: 13 декабря 2016 г., 09 марта 2017 г. и 11 июня 2017 г. (уточнение 15 июня). Также представлены четыре прогноза по методике СОУС'09 [3]: 21 августа 2015 г. (прогноз снят 31 августа), 13 декабря 2016 г., 26 января 2017 г. (уточнения прогноза 03 и 10 февраля), 06 марта 2017 г. и 16 июня 2017 г.

08–11 февраля 2017 г. на влк. Безымянный началось излияние лавового потока (по данным KVERT, оценка в отсутствии видимости, *реализация прогноза от 26 января 2017 г. по методике СОУС'09*).

По сейсмическим данным и видеонаблюдениям КФ ФИЦ ЕГС РАН эксплозивное извержение влк. Безымянный началось в 03:00 UTC 9 марта 2017 г. (*реализация прогноза от 06 марта 2017 г. по методике СОУС'09 и от 09 марта 2017 г. от ЛИСВА*).

По сейсмическим данным и видеонаблюдениям КФ ФИЦ ЕГС РАН эксплозивное извержение влк. Безымянный с высотой пеплового выброса до 12 км над уровнем моря произошло 16 июня 2017 г. в 05:03 UTC (*реализация прогноза от 11 июня 2017 г. от ЛИСВА и от 16 июня 2017 г. по методике СОУС'09*).

Заключение

В 2014–2017 гг. КФ РЭС продолжил свою работу в обычном режиме (регулярные еженедельные заседания, в особых случаях – внеочередные заседания), проведено 200 совещаний, на которых рассматривались заключения о прогнозе землетрясений по более чем 20 методикам от 8 организаций.

С 2015 г. количество используемых методик прогноза вулканических извержений увеличилось за счет методики СОУС'09.

За рассматриваемый период произошло 7 землетрясений с магнитудой $M_w > 6.0$. При этом в пределах КСО (район с координатами $\varphi = 50.5\text{--}56.5 N$, $\lambda = 156\text{--}167 E$) произошло только два таких события. Для них были выделены предвестники в реальном времени и имелись зарегистрированные прогнозы. Наиболее интересные события произошли вне КСО. Среди них – Южно-Озерновское землетрясение 29 марта 2017 г и Ближне-Алеутское землетрясение 17 июля 2017 г. Для данных событий тоже были зафиксированы прогнозные заключения и выделены предвестники.

В качестве интересного опыта можно отметить прогнозирование четырех эпизодов активизации вулкана Безымянного в декабре 2016 – июне 2017 гг., когда наблюдалось усиление активности этого вулкана после четырехлетнего молчания. Три из четырех эпизодов оказались заблаговременно спрогнозированными.

Список литературы

1. *Гирина О.А.* Камчатской группе реагирования на вулканические извержения (KVERT) – 20 лет // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога "Вулканизм и связанные с ним процессы", 29-30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 36–41.
2. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Демянчук Ю.В., Маневич А.Г.* Извержение вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. XX ежегодная научная конференция, посвященная дню вулканолога. Материалы конференции. Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 14–17.
3. *Салтыков В.А.* Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. №3. С. 45–59.
4. *Сенюков С.Л.* Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.
5. *Чебров Д.В.* и др. Активность вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 5–11.
6. *Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.

Таблица 2. Землетрясение **30.01.2016 г.**, $M_W = 7.2$ (NEIC), $M_C = 7.1$, $M_L = 7.1$, $K_S = 15.7$ (№ 1 в табл. 1 и на рис. 1)

№	Метод	Автор, Организация	Прогноз	Предвестник, выявленный в режиме реального времени
1	V_p/V_s	Л.Б. Славина ИФЗ РАН		Прогнозные оценки от 04–30.12.2015 г. (с интервалом в 1 неделю) о повышенной вероятности возникновения землетрясения $K_S \geq 12.5$ в центральной части Камчатки. Прогнозы от 21.01.2016, 28.01.2016: в связи с развитием аномалий на станциях юга Камчатки и Северных Курилах вероятность землетрясения с $K_S \geq 13$ ($M_L \geq 6$) сохраняется. Повышена вероятность возникновения землетрясения в Авачинском заливе, на севере Камчатки, возможно глубокого. <i>Ошибка по местоположению</i>
2	Скважинные геоакустические наблюдения	В.А.Гаврилов, ИВиС ДВО РАН	Прогноз от 29.01.2016 о повышенной вероятности на период 29.01 – 05.02.2016 включительно 3-й с параметром $S \geq 12\%$ ($S = L_p/R_h$, $L_p = 10^{0.44M-1.29}$ – длина очага землетрясения, R_h – гипоцентрального расстояние), что соответствует, например, $M_W = 6.0$ на расстоянии $R_h = 190$ км.	
3	Скважинные гидрогеодинамические наблюдения	Г.Н.Копылова, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Прогноз от 21.01.2016, 28.01.2016 о возможности в течение ближайшего месяца землетрясения с $M \geq 5.5$ в радиусе 350 км от скважин Е-1 и ЮЗ-5.	
4	Мониторинг концентрации подпочвенных газов	П.П. Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН		Прогноз от 28.01.2016 о возможности возникновения землетрясения на глубинах до 90 км: 1. $M \geq 5.0$ – мыс Шипунский – Авачинский залив – до бухты Вестник 2. $M \geq 5.5$ – м. Шипунский – Авачинский з-в – бух. Вестник 3. $M \geq 6.0$ – м. Шипунский – Авачинский з-в – м. Лопатка 4. $M \geq 6.5$ – за пределами этого района в полосе ограниченной широтами $49.5^\circ - 56^\circ$ с.ш. и осью глубоководного желоба в период 28.01.2016 – 04.02.2016 <i>Ошибка по глубине, местоположению</i>
5	ОНЧ	Г.И.Дружин, ИКИР ДВО РАН	Прогнозы от 21.01.2016, 28.01.2016 о возможности 3-я $K_S > 13.0$ в районе с координатами $156-168 E$ $50-57 N$ в течение 21.01 – 28.01.2016, 27.01 – 03.02.2016 соответственно.	
6	Алгоритм М6	В.А.Широков, КФ ФИЦ ЕГС РАН		Прогноз от 28.01.2016 23:50 UT о повышенной вероятности 3-я $K_S = 12.6-14.0$ ($M \geq 4.6$ по данным NEIC) в районе южной Камчатки и северной части Курильских островов ($49.5-53.8 N$) в течение недели, с вероятностью 0.3. <i>Ошибка по энергии K_S</i>

Таблица 3. Землетрясение 20.03.2016 г., $M_W = 6.4$ (NEIC), $M_C = 6.7$, $M_L = 6.7$, $K_S = 14.9$ (№ 2 в табл. 1 и на рис. 1)

№	Метод	Автор, Организация	Прогноз	Предвестник, выявленный в режиме реального времени
1	V_p/V_s	Л.Б. Славина ИФЗ РАН		<p>Прогноз от 17.03.2016: Вероятность возникновения землетрясения с $K_S \geq 12.5$ сохраняется в Камчатском заливе, вблизи Камчатского мыса, возможен афтершок на севере Камчатки, в Корякии.</p> <p>В среднесрочном аспекте аномальные значения параметра продолжают группироваться в Камчатском заливе, в районе Камчатского мыса, на юге в районе северных Курил. Возможность возникновения землетрясения с $M_L \geq 6$ в течение месяца повышена в этих районах.</p> <p><i>Оценка автора – эпицентр возник в аномальной зоне параметра V_p/V_s</i> <i>Ошибка по местоположению</i></p>
2	Ионосферные наблюдения	В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН		<p>Прогноз от 17.03.2016 о возможности усиления сейсмической активности в период с 17 марта по 21 марта 2016 г.</p> <p><i>Некорректная формулировка прогноза</i></p>
3	Мониторинг концентрации подпочвенных газов	П.П. Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН	<p>Прогноз от 25.02.2016 (продлевался 03.03.2016, 10.03.2016, 17.03.2016) о возможности возникновения землетрясения на глубинах до 90 км: 1. $M \geq 5.0$ – мыс Шипунский – Авачинский залив – до бухты Вестник 2. $M \geq 5.5$ – м. Шипунский – Авачинский з-в – бух. Вестник 3. $M \geq 6.0$ – м. Шипунский – Авачинский з-в – м. Лопатка 4. $M \geq 6.5$ – за пределами этого района в полосе ограниченной широтами 49.5–56 N и осью глубоководного желоба в период 25.02.2016 – 03.03.2016 (продлевался, в общем, с 03.03.2016 по 24.03.2016)</p>	
4	ВСШ	В.А.Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН	<p>Прогноз от 26.02.2016 (продлевался 11.03.2016) В настоящее время наблюдается стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ по данным станции «Карымшина» продолжительностью более 3 недель. Возможно землетрясение до 11 марта (с учетом продления до 25 03.2016) (включительно) на глубине до 300 км с магнитудой M, зависимой от эпицентрального расстояния Δ [км]: $M \geq 5.0$ $M \geq -3.64 + 4.06 \cdot \lg \Delta$</p>	
5	«Z-функция»	Н.М.Кравченко, КФ ФИЦ ЕГС РАН	<p>Оценка автора: Землетрясение 20 марта 2016 г. с магнитудой $M_W = 6.4$ произошло на краю сейсмической аномалии, в которой в течение года (июль 2014 г. – июнь 2015 г.) отмечалось абсолютное сейсмическое затишье по параметру «Z-функция». Положение эпицентра и интервал времени между окончанием затишья и временем землетрясения, позволяют рассматривать аномалию, проявившуюся в районе с координатами 52.5 – 54.5N, 162.0 – 163.5E как предвестниковую.</p>	

Таблица 4. Землетрясение **29.03.2017 г.**, $M_W = 6.6$ (NEIC), $M_C = 7.2$, $M_L = 6.8$, $K_S = 15.0$ (№ 4 в табл. 1 и на рис. 1)

№	Метод	Автор, Организация	Прогноз	Предвестник, выявленный в режиме реального времени
1	Скважинные геоакустические	В.А. Гаврилов, ИВиС ДВО РАН	Прогноз от 17.03.2017 на период с 17 марта 2017 г. по 31 марта 2017 г. включительно (UTC) повышена вероятность землетрясений с параметром $S \geq 12\%$ ($S = L_p/R_h$, $L_p = 10^{0.44M-1.29}$ – длина очага землетрясения, R_h – гипоцентральное расстояние). Величина $S = 12\%$ соответствует, например, землетрясениям с магнитудами $M_W = 6.0$ с гипоцентральным расстоянием $R_h = 190$ км.	
2	Мониторинг кинетических параметров сейсмичности	Н.Г.Томилин, ФТИ РАН	Прогноз от 19.10.2011 выставление тревоги: По времени: - дата выявления тревоги – 3.04.2011 - дата выставления тревоги (18.10.2011) по месту: в зоне: LONE 162.5–167E LATN 53– 57.5N, по энергии $K = 14.7–15.8$	
3	Мониторинг кинетических параметров сейсмичности	Н.Г.Томилин, ФТИ РАН	Прогноз от 10.09.2013 (уточняются параметры тревоги, выставленной 26.10.2007): <u>по месту</u> с указанием вероятности (P) в дугообразной зоне в Карагинском заливе, $Z = -100 – 0$ км	
4	«Z-функция»	Н.М.Кравченко, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Оценка автора: Землетрясение 29 марта 2017 г. с магнитудой $M_W = 6.6$ произошло в пределах сейсмической аномалии в окрестности Камчатского п-ва, в которой в течение 2015 г. отмечалось абсолютное сейсмическое затишье по параметру «Z-функция». Эпицентр и интервал времени между окончанием затишья и временем землетрясения, позволяют рассматривать эту аномалию как предвестниковую.	
5	V_p/V_s	Л.Б. Славина ИФЗ РАН		Прогноз от 23.03.2017: "...Аномалия, наблюдаемая на сст PAL вероятно связана и предвеляла землетрясение 06.03.17 в Корьякии, районе Тилички с $M_L = 5.3$. На 15.03.2017 развивается второй пик аномалии, вероятно связанный с землетрясением 15.03.17 в этом же районе..." <i>Некорректная формулировка прогноза</i>
6	Ионосферные наблюдения	В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН		Прогноз от 29.03.2017 о возможности усиления сейсмической активности в период с 29 марта по 03 марта 2017 г. <i>Некорректная формулировка прогноза</i>
7	Геомагнитные наблюдения	А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН		События с магнитудой > 6.5 к северо-востоку от П.-К. предсказывались с ноября прошлого года. Последнее упоминание о возможности землетрясения " с $M_L = 6.6 + 0.25 / -0.35$ к северо-востоку от П.-К. на широте $54.5 \pm 1.5^\circ$ СШ " было в прогнозе от 5 января 2017 . <i>Ошибка по положению гипоцентра</i>
8	Мониторинг вариаций геомагнитного и атмосферного электрического поля Земли	С.Э. Смирнов, ИКИР ДВО РАН		Прогноз от 23.03.2017: в районе с координатами 158–168E, 51– 55N ожидается усиление сейсмической активности с $K > 12.6$ в период с 23 марта по 29 марта 2017 г. <i>Ошибка по положению гипоцентра</i>

ДОЛГОСРОЧНО-КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЙОНА ЖЕЛОБА НАНКАЙ (ЯПОНИЯ) С $M \geq 8.2$ ДО 3500 г. СО ВРЕМЕНЕМ ТРЕВОГИ 196 СУТОК

Широков В.А.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, shirokov@emsd.ru

Введение

Впервые предложенная методика долгосрочно-краткосрочного прогноза (ДКП) землетрясений учитывает влияние на сейсмичность Земли двух возмущающих сил: с периодом 18.613 г. при пересечении лунной орбиты с эклиптической и с периодом 1.0 г. при обращении центра масс Земли и Луны по эклиптике вокруг Солнца. Используемый в работе каталог землетрясений автора японской 7-балльной макросейсмической шкалы Ф. Омори [10] для района желоба Нанкай является выборкой девяти землетрясений с $M \geq 8.2$ с начала VII века. В отечественном издании каталог приведен в [3]. Для восьми землетрясений принято, что события произошли в середине суток UT по Григорианскому календарю, поэтому ошибка по времени не превышает 12 часов. Для Великого Японского землетрясения 01.09.1923 г. время в очаге известно с точностью до минуты.

Прогноз основан на расчете *целочисленных резонансных ритмов* (ЦРР), использовавшихся ранее в приближенном варианте в астрономии при изучении вращений и обращений пар планет, комет и спутников планет [1, 8, 22]. Впервые целочисленные резонансы для частот обращений планет и на примере трех Галилеевых спутников Юпитера были выявлены Лапласом [22 и др.]. Поясим термин ЦРР. Если в системе отношения периодов колебаний, вращений или обращений кратны отношению целых чисел, то говорят, что они находятся в целочисленном резонансе [1]. В этом случае колебания с периодом T_x будут связаны с периодом колебаний T_y соотношением

$$m \cdot T_x \approx n \cdot T_y \approx T_{\text{цикл}} \quad (1)$$

Здесь m и n – целые числа, а $T_{\text{цикл}}$ – полный цикл резонанса, равный квадратному корню из произведения m , n , T_x , T_y , (среднегеометрическое значение). Резонансы могут быть полезными, но и приводить к разрушительным последствиям [2], поэтому у автора появилась идея использования ЦРР для прогноза сильных землетрясений и вулканических извержений [17–19 и др.].

Рассматриваемые землетрясения с нормальной глубиной очага (менее 70 км) происходили в линейно вытянутой тектонической зоне района желоба Нанкай, простирающейся с северо-востока (с широты г. Токио) на юго-запад [4, 10]. Их очаги расположены на пологой части берегового подводного склона вблизи о-вов Хонсю и Сикоку. Используя мировое время UT, укажем даты, месяцы, годы и в скобках магнитуды восьми событий с $M \geq 8.2$ по определениям Ф. Омори [10], а для землетрясения 01.09.1923 г. по данным поверхностных волн мировой сети сейсмостанций. Приведем список событий: 23.08.887 ($M=8.6$), 17.12.1096 (8.4), 3.08.1361 (8.4), 20.09.1498 (8.6), 03.12.1703 (8.2), 28.10.1707 (8.4), 23.12.1854 (8.3), 24.12.1854 (8.4), 01.09.1923 (8.2).

Методика выявления резонансных ритмов

В соответствии с нашей моделью предложено новые ЦРР T_x (далее – *резонансные ритмы*, иногда просто *ритмы*), связанные с возмущающим ритмом T_y , рассчитывать не по приближенным, а по точным формулам:

$$T_x = (m / n) \cdot T_y \quad (2)$$

Как указано выше, в данной работе рассматриваются два возмущающих ритма: $T_y(1) = 18.613$ г. и $T_y(2) = 1.0$ г. Третий возмущающий ритм, равный одним суткам, т.е. 24-м часам, использовался нами для прогнозов землетрясений со временем упреждения менее месяца и недели в [16, 20 и др.].

В формуле (2) m и n – целые числа, каждое из которых представляет собой в общем случае произведение простых чисел, которые могут повторяться, но если для m и n появляются общие делители, их следует сократить. Для каждого ритма выбирается начальная нулевая фаза. Принято, что нулевые фазы соответствуют моменту времени 600.0 г., т.к. первое событие каталога Ф. Омори с $M \geq 7.9$ произошло в 684 г. [10]. Фазы ритмов меняются от 0 до 1.0 по кольцу, причем $\Phi = 0$ и $\Phi = 1.0$ тождественно равны. Для ритма T_x число уже закончившихся циклов для любого из девяти землетрясений с $M \geq 8.2$, возникшего в момент времени t , равно целому значению равенства

$$D = (t - 600.0 \text{ г.}) / T_X \quad (3)$$

Остаток от целого определяет фазу события Φ .

$$\Phi = D - \text{Entier } D \quad (4)$$

Здесь *Entier* – целая часть [6]. Время t следующих друг за другом нулевых фаз ритмов рассчитывается по рекуррентной формуле

$$t(\Phi) = 600.0 + n \cdot T_X, \quad (5)$$

где $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

При подборе статистически значимых (по уровню < 0.01) ритмов T_X , принято условие приуроченности каждого из 9-ти землетрясений только к активной фазе $\Phi_{\text{АКТ}}$ ритмов. В этом случае вероятность P случайного распределения землетрясений по фазе ритмов T_X , рассчитываемая по формуле Бернулли $P = (\Phi_{\text{АКТ}})^9$, не должна быть больше 0.01. Значения $P < 0.001$ принято считать высокосзначимыми.

Возникает вопрос, как можно выявить ритмы, связанные, например, с лунным 18.613 г., т.к. процедура перебора неограниченного числа значений m и n в формуле (2) неэффективна и выявление значимых резонансных ритмов становится почти неразрешимой задачей. Воспользуемся уже апробированными высокосзначимыми ритмами с целью использования их долей и кратных для выявления ритмов японских землетрясений. Например, для восьми сильнейших вулканических извержений Тихоокеанского пояса с объемом продуктов в годовых по длительности интервалах от четырех до 150 км³ нами выявлен ритм **9.771825 г.** [19] с шириной активного коридора 10.23%, что соответствует $P = 0.00000001$. Оказалось, что 20-кратное значение ритма-донора **9.771825 г.**, равное **195.4365 г.**, является для событий с $M \geq 8.2$ значимым ритмом (табл.). Значимым оказался также ритм **186.13 г.** (табл.), равный 10-кратному значению ритма **18.613 г.**, выявленного для землетрясений различных регионов Земли [6, 9, 15–17]. Для ритмов **195.4365 г.** и **186.13 г.** полный цикл резонанса равен произведению ритмов, поделенному на модуль их разницы. В итоге получим, что $T_{\text{ЦИКЛ}} = 3908.73 \text{ г.}$ При делении **3908.73 г.** на значения двух ритмов, получим числа соответственно 20 и 21. Поэтому формула резонанса, в которую включен и возмущающий ритм **18.613 г.**, будет иметь вид:

$$20 \cdot (195.4365 \text{ г.}) = 21 \cdot (186.13 \text{ г.}) = 210 \cdot (18.613 \text{ г.}) = 3908.73 \text{ г.} \quad (6)$$

Из (6) следует, что **195.4365 г.** = $(210 / 20) \cdot 18.613 \text{ г.}$ = $(21 / 2) \cdot 18.613 \text{ г.}$. Т.е. мы рассчитали значения $m = 21$ и $n = 2$ в модельной формуле (2). Аналогично для ритма **186.13 г.** $m = 10$ и $n = 1$. Из (6) становится понятным, что процедура выявления других новых ритмов связана с последовательным делением **3908.73 г.** на числа 22, 23, 24, 25 и т.д. с последующей проверкой значимости получающихся ритмов.

Таким образом, зная значение $T_{\text{ЦИКЛ}}$, легко находятся значения m и n , а также ясна процедура выявления новых резонансных ритмов. Далее проводился поиск высокосзначимых ритмов с шириной активных фазовых коридоров менее 25%, чтобы достичь более высокой эффективности прогноза. Выявлены три таких ритма, полученных при делении **3908.73 г.** на числа 57, 800 и 1140 (табл.). При делении на 800 получен ритм **4.8859125 г.** (табл.), вдвое меньший уже использовавшегося нами ритма-донора **9.771825 г.**

Времена начала $t(\text{нач})$ и конца $t(\text{кон})$ опасных интервалов времени для каждого из пяти новых резонансных ритмов получаем с помощью Excel с использованием рекуррентных формул: $t(\text{нач}) = \Phi_{\text{НАЧ}} \cdot T_X + 600.0 \text{ г.} + n \cdot T_X$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ и т.д. до 3500.0 г. Расчет $t(\text{кон})$ аналогичен. Значения $\Phi_{\text{НАЧ}}$ и $\Phi_{\text{КОН}}$ для первых пяти ритмов приведены в таблице.

Перейдем к ритмам, связанным с годовым ритмом 1.0 г. Из списка землетрясений видно, что события происходили внутри года не ранее 3 августа, что указывает на их годовой ритм. С 4-го по 16-е число каждого из пяти последних месяцев года события отсутствуют. В августе – ноябре события происходили с 17-го числа по 3-е число следующего месяца, а в декабре с 17 по 31 декабря. Опасными были поочередно 18, 17, 18, 17 суток и в конце декабря 15 суток. Сумма в среднем опасных 17.5 и 13-ти неопасных суток равна 30.5 суток, т.е. двенадцатой части года. В итоге комбинация ритмов 1.0 и (1/12) г. соответствует 86 опасным суткам с 3.08 до 31.12 включительно. 86 опасных суток составляют в среднем 0.23546 г., что соответствует $P = 0.000002$.

Для прогноза используются также значимый 14-месячный чандлеровский ритм **1.2 г.** [4] и равный полному циклу резонанса ритм с периодом **6.0 г.**, проявляющийся в вариациях межгодовых амплитуд колебаний географических полюсов. За начальные нулевые фазы ритмов выбрана эпоха 600.0 г. Приведем формулу резонанса связи этих ритмов с годовым:

$$5 \cdot (1.2 \text{ г.}) = 6.0 \text{ г.} = 6 \cdot (1.0 \text{ г.}) = T_{\text{ЦИКЛ}} \quad (7)$$

Основные параметры ритмов 1.2 г. и 6.0 г. приведены в таблице. Из (7) следует, что оба ритма являются не приближенными, а точными резонансными ритмами. Таким образом, чандлеровский ритм 1.2 г. является резонансным, что получено впервые.

Таблица. Основные параметры ($\Phi_{НАЧ}$, $\Phi_{КОН}$, $\Phi_{АКТ}$) активных фаз резонансных ритмов T_i и оценки вероятности P случайного распределения землетрясений района желоба Нанкай с $M \geq 8.2$ по фазе каждого ритма; i – номер ритма, $\Phi_{АКТ} = \Phi_{КОН} - \Phi_{НАЧ}$. Пояснения в тексте

i	Период ритма T_i	$\Phi_{НАЧ}$	$\Phi_{КОН}$	$\Phi_{АКТ}$	P
1	195.4365 г.	0.421403946186	0.896854841511	0.47545	0.001
2	186.13 г.	0.545428920279	1.111513958796	0.5661	0.006
3	3908.73 г./ 57	0.098208194239	0.302680745303	0.2042	0.0000006
4	3908.73 г./ 800	0.712291084596	0.940090726803	0.228	0.000002
5	3908.73 г./ 1140	0.894712845139	1.120725966101	0.226	0.000002
6	6.0 г.	0.611015525114	1.163242009132	0.5523	0.005
7	1.2 г.	0.656392694064	1.186073059361	0.5297	0.003

Реализация методики долгосрочно-краткосрочного прогноза

Для долгосрочно-краткосрочного прогноза выбраны 9 ритмов, из которых 5 связаны с 18.613 г. и 4 с годовым. Самый длительный активный внутригодовой интервал равен 18 суткам, поэтому прогноз именуется долгосрочно-краткосрочным. Алгоритм прогноза прост: землетрясения ожидаются только в периоды совпадения опасных интервалов времени всех девяти ритмов, т.к. вне активных фаз любого ритма землетрясения не происходили и поэтому не ожидаются.

Используя данные файлов Excel, в которых приведены начало и конец опасных интервалов времени семи ритмов, сначала были рассчитаны опасные интервалы для двух ритмов (195.4365 г., 186.13 г.) с 2018.0 г. до 3500.0 г. Таких интервалов оказалось 9. Затем эти интервалы уменьшались при их сопоставлении с остальными ритмами (табл.). По данным первых пяти ритмов, связанных с 18.613 г. (табл.), рассчитаны 9 опасных интервалов времени: 2050.413–2050.758, **2060.268–2060.599**, 2255.704–2256.036, 2259.807–2259.909, **2265.016–2265.632**, 2475.142–2475.902, **3223.032–3223.416**, 3486.851–3497.057, 3496.897–3497.674. Три интервала, обозначенные жирным шрифтом, оказались в дальнейшем неопасными, т.к. они не попадают в одну или более активных фаз ритмов, связанных с годовым ритмом. Поэтому ДКП до 3500.0 г. по девяти ритмам содержит всего 6 опасных интервалов. С учетом точно рассчитанных 86 опасных суток, приведем теперь 6 опасных по прогнозу лет, для которых в скобках приведено общее количество опасных суток: 2050 г. (36 суток), 2225 г. (67 суток), 2259 г. (8 суток), 2475 г. (51 сутки), 3486 г. (9 суток), 3496 г. (25 суток). В итоге получим 196 опасных суток. Обратим внимание на то, что одна из пауз между ожидаемыми землетрясениями в 2475 г. и 3486 г. равна 1010 лет, что составляет 68% от общего времени прогноза 1482 г.

Оценим эффективность прогноза I по ретроспективным данным по определению А.А. Гусева [5]. Значение I равно отношению доли ретроспективно спрогнозированных событий к доле тревожного времени относительно общего времени прогноза. При случайном прогнозировании I в среднем равно единице. Поэтому значение I по А.А. Гусеву показывает, во сколько раз эффективность оцениваемой методики прогноза лучше случайного прогнозирования. 196 опасных суток для среднего гражданского года 365.2425 суток [8] составляют в годах долю $196 / 365.2425 = 0.53663$ г. Общее время прогноза равно 3500.0 г. - 2018.0 г. = 1482.0 г. Доля опасных суток 0.53663 г. относительно 1482.0 г. равна 0.0003621. Доля событий, соответствующих прогнозу, равна 1.0. В результате эффективность прогноза $I = 1.0 / 0.0003621 = 2761.7$. Конечно, девяти землетрясений с $M \geq 8.2$ за 13 веков, соответствующих примерно третьей части полного цикла резонанса 3908.73 г., недостаточно для надежного определения границ активных фазовых коридоров. Со временем ширина активных коридоров может только расширяться за счет возможных пропусков цели. Корректировка прогноза неизбежна, т.к. число землетрясений в исходном каталоге мало.

О физической природе резонансных ритмов и роли механизма геодинамо во внешнем ядре при возникновении землетрясений

В работе 2001 г. [16] при рассмотрении модели подготовки сильных землетрясений в качестве одного из двух ключевых положений модели предложено использовать явление резонанса. Лишь спустя 12 лет началось использование *целочисленных резонансных ритмов* для долгосрочного прогноза землетрясений и извержений вулканов [17–19]. В данной работе методика прогноза

основана на модели влияния на сейсмичность возмущающих сил с периодом 18.613 г. и 1.0 г. Согласно модели резонансные ритмы T_X рассчитываются по формуле $T_X = (m/n) \cdot T_Y$, где T_Y – возмущающий ритм. Этот подход стал основой долгосрочно-краткосрочного прогноза землетрясений района желоба Нанкай с $M \geq 8.2$ до 3500.0 г. с общим временем тревоги 196 суток и эффективностью прогноза 2761. Землетрясения до 3500.0 г. ожидаются в 2050, 2255, 2259, 2475, 3486, 3496 гг.

Известно, что приливное воздействие Луны и Солнца является весьма слабым, чтобы считать его причиной возникновения сильных землетрясений. Поэтому попытаемся ответить на вопрос о том, какие механизмы могут обеспечить энергетику детерминированной связи возмущающих космических ритмов со статистически значимыми целочисленными резонансными ритмами.

По современным представлениям главное геомагнитное поле имеет внутриземное происхождение и объясняется существованием в жидком ядре Земли, вращающемся с большей скоростью относительно коры-мантии (западный дрейф), протяженных радиально ориентированных встречных потоков электропроводящего вещества (диполей), т.е. поле связывают с механизмом геодинамо [11, 13, 14]. Геодинамо представляет сложную колебательную систему, характеризующуюся спектром магнитогидродинамических колебаний от долей суток до 10 тысяч лет [7]. В наиболее разработанных моделях геодинамо считается, что основные события генерации магнитного поля происходят в очень узком слое (десятки – сотни метров) на границе хорошо проводящего ядра и плохо проводящей мантии [13]. Хаотично ориентированные электроны ядра за счет силы Лоренца, перпендикулярной оси диполей, начинают дрейфовать к границе ядро-мантия [11]. Магнитная энергия ядра на 3–4 порядка превышает энергию других крупномасштабных движений [13], поэтому, на наш взгляд, *при увеличении скорости вращения ядра после ее уменьшения дрейф электронов к границе ядро-мантия может приобретать лавинный характер*. В этом случае на этой границе появится значительный электрический заряд, который должен быстро разрядиться на границах в верхней мантии и земной коре, где располагаются очаги готовящихся землетрясений. Этот быстро протекающий общепланетарный процесс приведет к появлению вблизи земной поверхности отрицательных аномалий градиента потенциала атмосферного электрического поля в разных зонах Земли и к группированию во времени сильных мировых землетрясений [12, 18, 20, 21]. Описание этого общепланетарного механизма впервые приведено нами в работе [21].

Ближе всего к ядру расположены землетрясения больших глубин. Рассмотрим проявление сейсмического отклика глубоких курило-камчатских землетрясений [18] с 1900 г. ($M \geq 7.3$, $H \geq 340$ км, $N = 13$ событий) на резонансные ритмы. Для этих событий рассчитан полный цикл резонанса **781.746 г.**, равный произведению двух самых продолжительных ритмов, поделенному на модуль их разницы. При делении **781.746 г.** на числа 14, 15, 16, 120, 240 и 320 выявлены один значимый ($P = 0.002$) и 5 высокозначимых резонансных ритмов (55.839 г., 52.1164 г., 48.859125 г. и т.д.). Ритм 781.746 г. / 320 выявлен ранее [18]. Аналогичен отклик глубоких мировых землетрясений с 1973 г. с $M_w \geq 7.4$. Сейсмический отклик на резонансные ритмы глубоких землетрясений служит дополнительным подтверждением их связи с процессами геодинамо в ядре и на границе ядро-мантия.

На основании полученных результатов можно сделать выводы о неслучайности возникновения сильных землетрясений, их связи с процессами геодинамо в жидком ядре Земли и резонансной природе процессов разрушения геосреды. Поэтому нашу планету можно рассматривать как многоритмичный резонатор в гравитационно-устойчивой системе Солнце–Земля–Луна.

Благодарности. Автор выражает признательность учителю математики средней школы г. Топки Кемеровской области, ветерану Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. Анатолию Андриановичу Савкину. Его нацеленность учеников на наиболее простые и нестандартные решения математических задач, доброжелательность в общении со школьниками во многом определили судьбы выпускников. Выражаю признательность коллегам И.Р. Абубакирову, Л.А. Белкиной, Н.В. Большаковой, А.В. Викулину, О.А. Войтенко, В.Н. Волошину, В.Н. Дубровскому, И.К. Дубровской, В.Ю. Иванову, Г.П. Пономареву, В.Г. Романюк, Ю.К. Серафимовой, И.И. Степанову, А.В. Сумакову, П.П. Фирстову, В.Н. Чеброву, Н.В. Широковой и Н.А. Якунину за содействие при проведении исследований. Особую благодарность выражаю А.А. Гусеву и А.Н. Кролевцу за конструктивные советы и важные критические замечания.

Список литературы

1. *Бялко А.В.* Наша планета – Земля. Библиотечка Квант. Вып. 29. М.: Наука, 1989. 240 с.
2. *Вайнберг Д.В., Писаренко Г.С.* Механические колебания и их роль в технике. М.: Наука, 1965. 276 с.

3. Викулин А.В., Викулина С.А. Закономерности размещения очаговых областей в районе желоба Нанкай / Петропавловск-Камчатский: Камчатская геофизическая станция ИФЗ АН СССР. Препринт № 5. 1989. 43 с.
4. Викулин А.В., Кролевец А.Н. Чандлеровские колебания полюса и сейсмотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. № 6. С. 996–1009.
5. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность, сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С.109–119.
6. Гусев А.А., Петухин А.Г. О возможной синхронизации сильных землетрясений лунным 18.6-летним циклом, его долями и кратными // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 64–79.
7. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 415 с.
8. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии. М.: Физматгиз, 1961. 494 с.
9. Ламакин В.В. О периодичности байкальских землетрясений // ДАН СССР. 1966. Т. 130. № 2. С. 210–213.
10. Омори Ф. Каталог описаний сильных землетрясений Японии (на японском языке) // Южно-Сахалинск: Фонды ИМГИГ ДВО РАН. 1913. Том 68 (В). 180 с.
11. Расулов Д.Х. Геомагнетизм и геоэлектричество. Происхождение и взаимосвязь. Ташкент: Изд. «ФАН» АН Республики Узбекистан, 2007. 235 с.
12. Руленко О.П., Широков В.А., Маратулец Ю.В. и др. Отрицательные аномалии атмосферного электрического поля у поверхности земли на станции «Карымшина» в августе 2009 г. и их связь с активизацией планетарной сейсмичности // Сборник докладов V Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 2–7 августа 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2010. С. 424–427.
13. Соколов Д.Д. Геодинамо и модели генерации геомагнитного поля (обзор). Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Том 44. № 5. С. 579–589.
14. Френкель Я.И. Земной магнетизм // Известия АН СССР. Сер. физ. 1947. № 6. С. 607–616.
15. Широков В.А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западной части Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 103–115.
16. Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений с магнитудой $M = 6-7.8$ по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГИГ ДВО РАН, 2001. С. 95–116.
17. Широков В.А. О ключевой роли целочисленных резонансов при изучении причин возникновения 11- и 22-летних циклов солнечной активности и сильных мировых землетрясений // Материалы Четвертой региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», г. Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н.Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 210–214.
18. Широков В.А. О ключевой роли резонансных ритмов при подготовке глубокого Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г., $M_w = 8.3$ // Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2014. С. 139–144.
19. Широков В.А. О резонансной природе наиболее сильных извержений вулканов Земли и их прогноз на ближайшие десятилетия по данным наблюдений с 1700 г. // Труды Пятой научно-технической конференции "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России", г. Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 г. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 306–310.
20. Широков В.А., Фирстов П.П., Макаров Е.О., Степанов И.И., Степанов В.И. Возможный подход к краткосрочному прогнозу сильнейших землетрясений на примере Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г., $M_w = 9.0$ // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 5–22.
21. Широков В.А., Широкова Н.В., Бузевич А.В. О причинах появления «удаленных» геофизических предвестников, регистрирующихся на заключительной, около недели, стадии подготовки сильных мировых землетрясений // Сборник докладов V Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 2–7 августа 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2010. С. 478–482.
22. Laplace P.S. Theorie des satellites de Jupiters (suite) // Memories de Academic Royale des Sciences de Paris. France. Berlin. 1789. P. 237–296.

ПРОГНОЗ МАГНИТУДЫ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДЕПРЕССИИ УНЧ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Щекотов А.Ю.¹, Потанин М.Е.², Кобзев В.А.²

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, oldresident@yandex.ru*

²*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, geofizik@emsd.ru*

Введение

Лаборатория геофизических исследований Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит геомагнитные наблюдения с использованием трехкомпонентного магнитометра-вариометра, установленного на комплексной геофизической обсерватории (КГО) «Карымшина» (52.827° с.ш., 158.132° в.д.) (рис. 1). Цель работ – поиск геомагнитных предвестников землетрясений.

Магнитометр-вариометр включает в себя три идентичных по конструкции индукционных датчика поля. Принцип индукционного датчика основан на явлении электромагнитной индукции – возникновении ЭДС в измерительной катушке при изменении проходящего через ее контур магнитного потока. Изменение потока в катушке может быть связано с вариациями величины или направления измеряемого поля во времени.

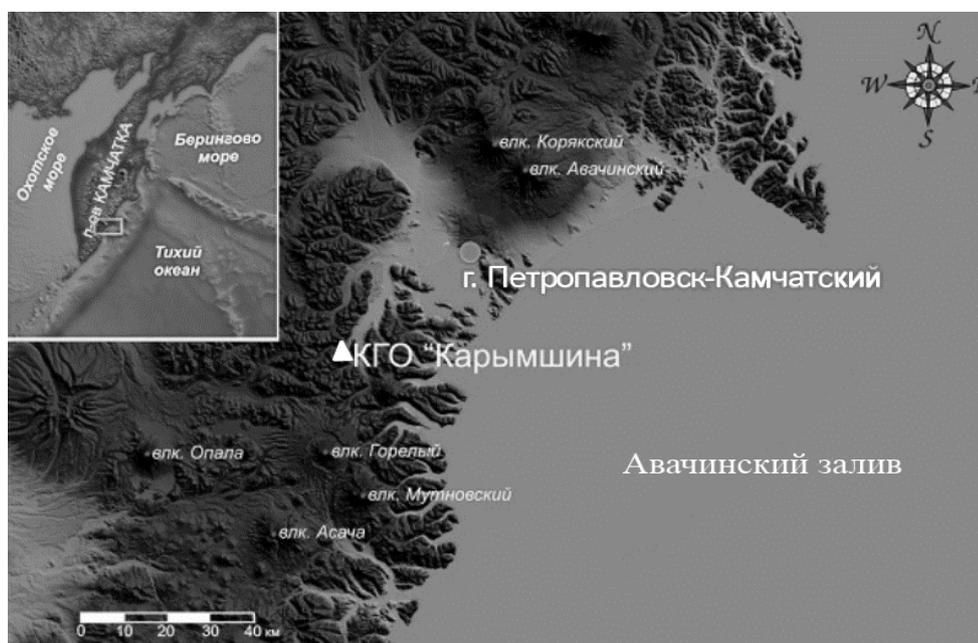


Рис. 1. Карта-схема расположения КГО «Карымшина»

Каждый датчик помещен в пластиковый, ударопрочный, влагозащищенный корпус и состоит из индукционной катушки с сердечником из аморфного сплава и предварительного усилителя. Использование усилителя позволяет значительно понизить уровень шумов на частотах ниже 10 Гц. Параметры всех трех датчиков идентичны с отклонением менее 3% в абсолютных величинах коэффициента преобразования и не более 2° по фазе.

Для подавления сейсмических, ветровых, акустических и других видов помех датчики помещены в бетонный бокс, наполненный сухим песком. Датчики горизонтальных компонент H и D были ориентированы вдоль магнитного меридиана и перпендикулярно к нему. Датчик Z регистрирует вертикальную компоненту геомагнитного поля.

В качестве АЦП с 2011 г. используется регистратор GSR-24, который находится на удалении 100 м от места закладки датчиков в защитном сооружении и подключен к датчикам кабельной линией. 16 октября 2013 г. запущена новая система передачи геомагнитных данных на приемный центр в г. Петропавловске-Камчатском, обеспечивающая их получение в режиме реального времени. Аналоговый сигнал от магнитометра по кабельной линии передается на АЦП, где оцифровывается с частотой 100 Гц. Далее через канал Wi-Fi данные передаются на стационар КГО «Карымшина», где

они временно хранятся на кольцевом буфере обмена, и затем передаются по каналам Internet на приемный центр КФ ФИЦ ЕГС РАН. Данные передаются и хранятся на буфере обмена в формате MSEED и затем помещаются в архив данных, который хранится в лаборатории геофизических исследований. Оператором осуществляется ежедневный контроль качества данных геомагнитных наблюдений и их передача в ИФЗ РАН для дальнейшей обработки и анализа с целью выделения сигналов подготовки землетрясений.

Оценка магнитуды землетрясения по величине депрессии вариаций УНЧ магнитного поля

Депрессия – это ослабление компонент геомагнитного поля по данным регистрации магнитометром-вариометром. В качестве меры депрессии использовалась величина обратная минимальной усредненной спектральной плотности P_{xx} в полосе 0.01–0.1 Гц: $Dep_x = 1/P_{xx}$, где x – одна из горизонтальных компонент; или ее нормированная вариация $dDep = (Dep - \text{mean}(Dep))/\text{mean}(Dep)$. Время усреднения выбиралось в несколько суток, таким, чтобы устранить влияние дрейфа поля, связанного с геомагнитной активностью. Впоследствии величина $dDep$ не использовалась в связи с ее неопределенностью в оценке эффекта из-за неоднозначности времени усреднения.

На рис. 2 показан пример депрессии перед землетрясением с магнитудой $M_s = 6.6$. На левой панели показаны эволюция геомагнитной активности (K_p), сейсмической активности (K_s – энергетический класс землетрясения) и депрессии dD во временной окрестности землетрясения ± 15 сут.

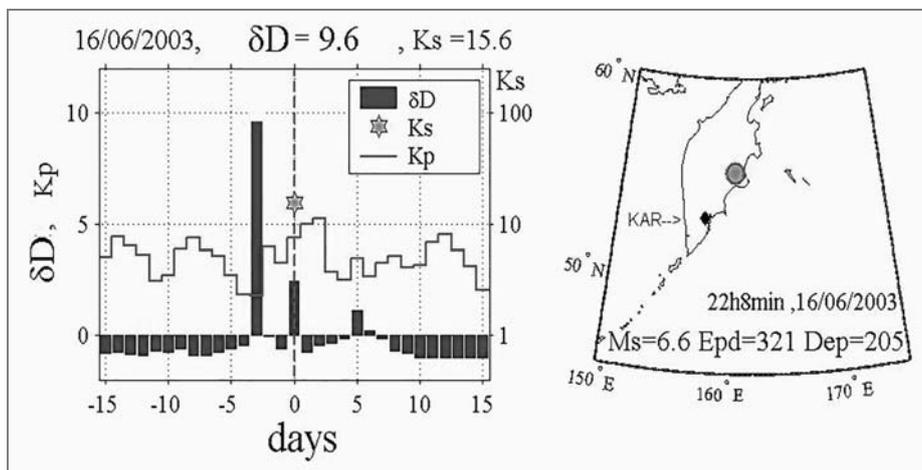


Рис. 2. Левая панель – эволюция депрессии, геомагнитной и сейсмической активности в окрестности землетрясения. Справа – карта региона с параметрами землетрясения

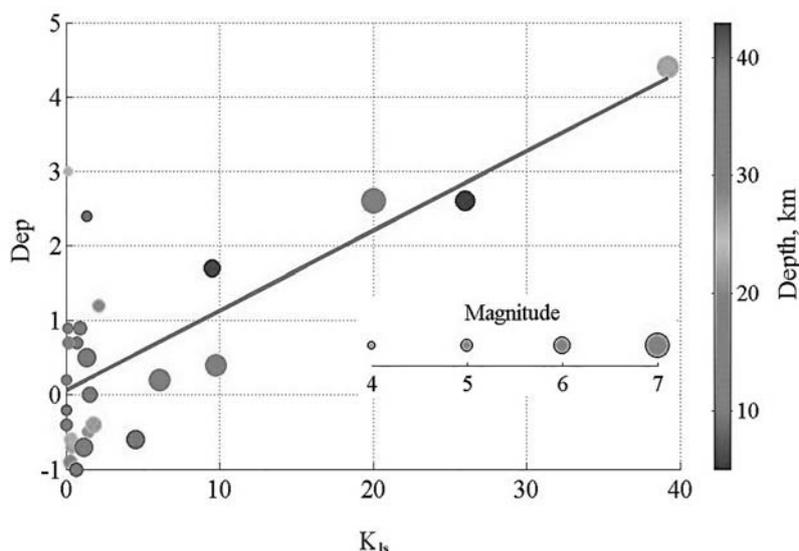


Рис. 3. Зависимость амплитуды депрессии от локальной сейсмичности

Основное свойство депрессии – примерно линейная зависимость ее амплитуды от локальной сейсмичности [1], величина которой оценивается коэффициентом локальной сейсмичности K_{LS} , введенным О. Молчановым и равным:

$$K_{LS} \sim \frac{10^{0.75ML}}{10(R+100)}, \quad (1)$$

где ML – локальная магнитуда, R – эпицентральное расстояние, км.

Величина R оценивается по положению источника атмосферного КНЧ-излучения на частотах от единиц до десятков Гц, полагая, что это излучение вызвано инъекцией газов из зоны подготовки землетрясения. На рис. 4 показана темно-серой толстой линией область пересечения основного лепестка излучения с областью глубоководного желоба. Эпицентр корового землетрясения, как правило, располагается к западу от этой области на небольшом расстоянии. Подставляя величину R в выражение (1), можно оценить K_{LS} для известных событий.

Как уже упоминалось, амплитуда депрессии линейно зависит от величины K_{LS} . Следовательно, по величине депрессии можно оценить K_{LS} будущего события, а по КНЧ излучению – расстояние до эпицентра R и оценить магнитуду будущего события по формуле:

$$M_L = (\log_{10}(K_{LS}) + 1 + \log_{10}(100 + R)) / 0.75 \quad (2)$$

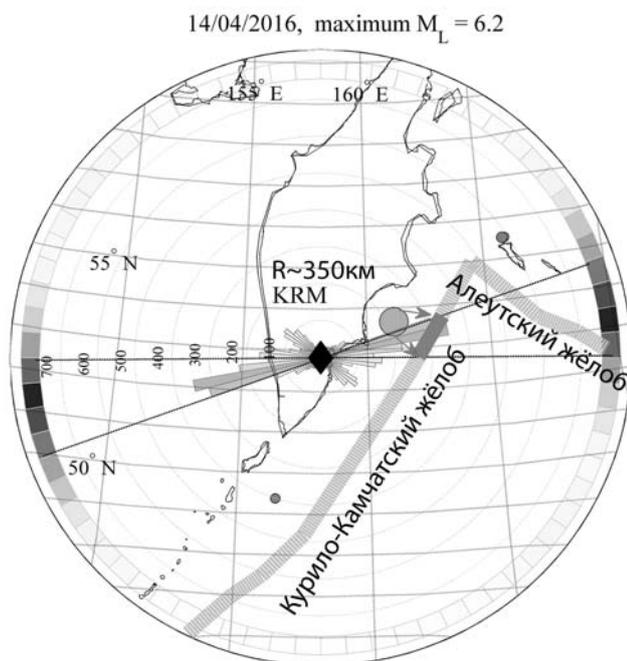


Рис. 4. Карта региона с азимутальным распределением излучения. Положение источника показано толстой серой линией

Алгоритм оценки магнитуды

Фиксируем максимальную депрессию (рис. 5). В данном случае $Dep_{max} = 27$. Из графика зависимости K_{LS} от максимальной депрессии (рис. 6), находим среднее, минимальное и максимальное значения K_{LS} для Dep_{max} . С помощью функции Matlab, реализующей вычисление по формуле (2), оцениваем магнитуду будущего события. В данном случае с вероятностью 67%, получаем $ML = 6 \pm 0.3$. В действительности, магнитуда землетрясения 14 апреля 2016 г. составила $ML = 6.2$.

Заключение

Описанный алгоритм прогноза магнитуды дает достаточно хорошую ее оценку, по крайней мере, для неглубоких и близких к желобу землетрясений, что подтверждается, в частности, приведенным примером.

Одна из возможных причин ошибочных прогнозов магнитуды связана с оценочным характером величины R – расстояния до эпицентра. Такие ситуации возникают, во-первых, в случае подготовки глубоких и далеких от желоба событий и для очень близких событий, особенно, если они находятся примерно на той же широте, что и магнитометр. В случаях, когда азимутальное распределение излучения пересекает не только Камчатский, но и Алеутский желоб, то также

возникает неопределенность в положении источника, а, следовательно, и в оценке положения очага будущего землетрясения. Две последние причины могут быть устранены при регистрации геомагнитных вариации на сети пунктов.

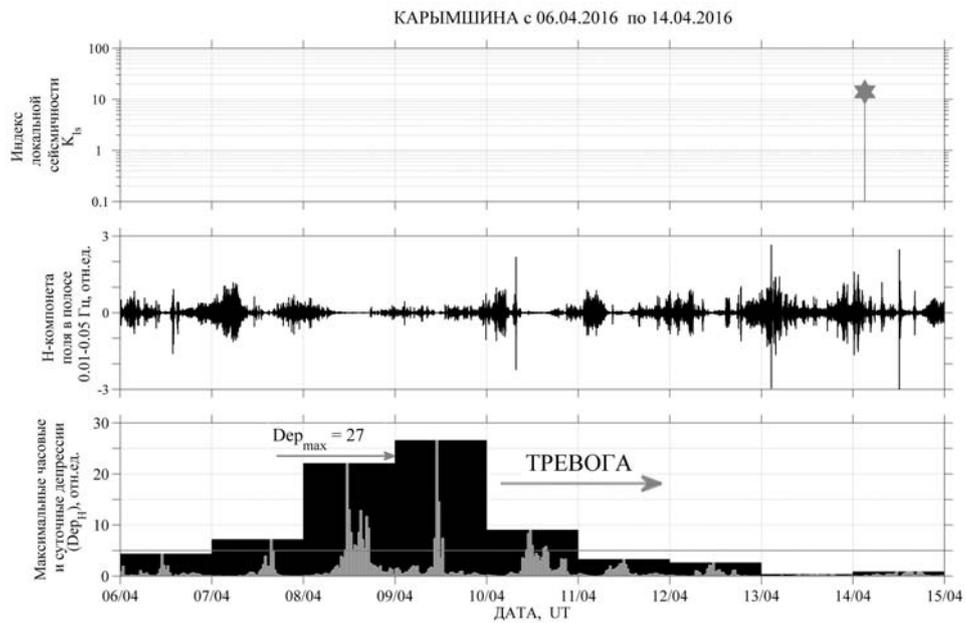


Рис. 5. Эволюция сейсмичности и депрессии

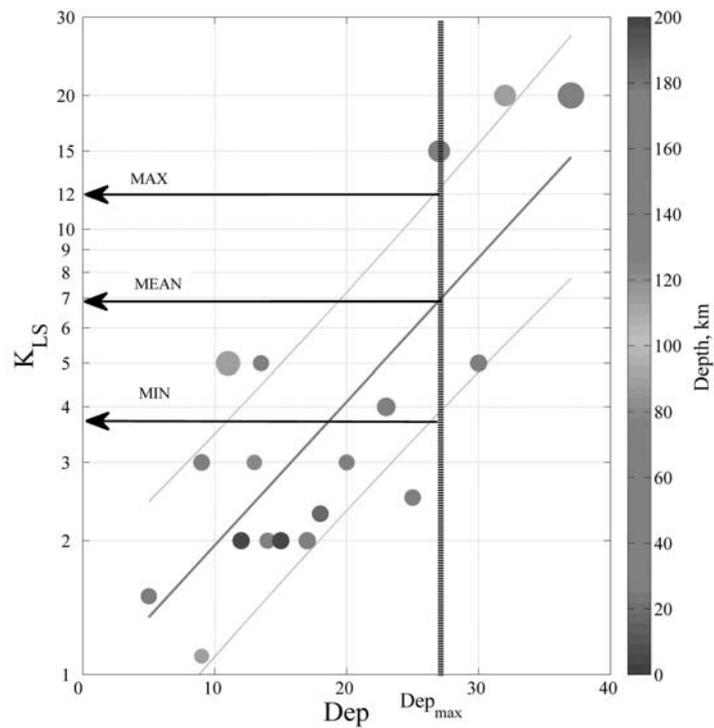


Рис. 6. Зависимость K_{LS} от максимума депрессии

Список литературы

1. *Schekotov A., Molchanov O., Hattori K. et al.* Seismo-Ionospheric Depression of the ULF Geomagnetic Fluctuations at Kamchatka and Japan // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V. 31. P. 313–318.