

УДК 550.468

СОПОСТАВЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ С НАЗЕМНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ КАЛИФОРНИЙСКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РАЙОНА)

@ 2009 А.Л. Харитонов¹, Г.П. Харитонова¹, Труонг Куанг Хао²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Троицк Московской области, e-mail: ahariton@izmiran.ru

²Институт геофизики ВАНТ, Ханой

Проведен анализ результатов пересчета в нижнее полупространство магнитного поля, измеренного в ионосфере, на спутнике МАГСАТ, на средней высоте около 400 км, в моменты возникновения сильных землетрясений в Калифорнийском районе Тихоокеанского сейсмоактивного пояса. Проанализировано образование крупномасштабных магнитных неоднородностей, выделенных по спутниковым данным, связанных с повышенными значениями концентрации радона в атмосфере (высота 0–400 км), над областями эпицентров землетрясений. По спутниковым данным, выделяются симметричные относительно экватора крупномасштабные магнитные неоднородности в мантии Земли, возникающие примерно от 90 минут до нескольких суток до основного толчка, которые вероятно можно рассматривать как краткосрочные предвестники землетрясений.

Ключевые слова: спутник, геомагнитные данные, предвестники землетрясения, концентрация радона.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, связанные с регистрацией концентрации подпочвенного радона и ее изменения во времени, в связи с проблемой поиска предвестников землетрясений, имеет длительную историю. Эти исследования рассматривались в целом ряде научных и прикладных публикаций, наиболее интересными из которых являются (Авсюк, 2002; Дода, 2003; Касахара, 1985; Стейси, 1972; Уткин и др., 1997; Фирстов и др., 2006). В последних работах (Уткин и др., 1997; Авсюк, 2002; Дода 2003; Фирстов и др., 2006) ретроспективно анализируется динамика изменения во времени концентрации радона и ее связи с изменением напряженно-деформационного состояния массива горных пород. Приведем основные выводы этих работ. В работе (Уткин, Юрков, 1997) сделаны важные выводы о зональности выделений радона в зависимости от расстояний до будущего эпицентра землетрясения. При этом, чем больше магнитуда будущего землетрясения, тем больше эпицентральный радиус зоны радона. В работе (Авсюк, 2002) сделан

вывод о том, что приливные воздействия Луны на внешнее ядро Земли создают флуктуации в ротационном режиме Земли, что сказывается на напряженно-деформационном состоянии литосферы. В работе (Дода, 2003) делается вывод о том, что накануне сильного землетрясения ($M > 5$) изменяется циркуляция газовых потоков в атмосфере и флюидо- и газодинамика в литосфере, что способствует повышенной ионизации приземной атмосферы выделениями радона и гелия. В работе (Фирстов и др., 2006) показано, что наблюдается резкое изменение концентрации радона при изменении атмосферного давления и сезонности на Камчатке.

Целью настоящей работы является анализ спутниковых данных о влиянии эксхалций радона на ионизацию приземной атмосферы. Сделана попытка проследить эффект от аномальной концентрации радона в трехмерном, пространственном измерении, когда этот эффект прослеживается в атмосфере до определенной высоты. В ряде работ (Сергеенко, Харитонов, 2005; Хегай и др., 2002) показано, что ионизация радоном приземной атмосферы, приводит к

повышению ее электрической проводимости и, как следствие, к увеличению магнитных неоднородностей в атмосфере. Поэтому в результате решения обратной задачи геомагнитного потенциала – пересчета поля в нижнее полупространство (Серкеров, 1999), из измеренного (в период с 10.11.1979 по 19.05.1980) на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) МАГСАТ геомагнитного поля, выделяются магнитные особенности в структуре мантии или аномальные зоны в атмосфере Земли, которые, по-видимому, могут использоваться в качестве предвестника грядущего землетрясения.

В период работы спутника МАГСАТ первые опубликованные данные об измерении концентраций приземного радона имелись только в пределах Калифорнийского сейсмоактивного района. Поэтому для совместного анализа наземных измерений радона и спутниковых магнитных данных и был выбран именно этот сейсмоактивный район. К сожалению, в период работы на орбите спутника МАГСАТ, с 10.11.1979 по 19.05.1980, в пределах Калифорнийского сейсмоактивного района не наблюдалось значительного количества сильных землетрясений и связанных с ними аномальных эксхалаций радона. Поэтому статистика полученных результатов от совместных спутниковых и наземных исследований пока не велика. Были проанализированы только два достаточно сильных землетрясения (20 января и 5 марта 1980 года) магнитудой 5.8 и 4.0, попадающие в этот период времени. Средняя глубина очагов перечисленных землетрясений соответственно составляет 8.0 и 4.5 км, соответственно.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Геофизические предвестники землетрясений делятся на три группы: долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные предвестники. Данная работа относится к области изучения краткосрочных спутниковых геомагнитных предвестников землетрясений с заблаговременностью примерно от 90 минут до нескольких суток. Для выделения из спутниковых геомагнитных измерений эффектов, связанных с землетрясениями была использована методика, принятая в лаборатории спутниковых геомагнитных исследований ИЗМИРАН (Rotanova et al., 1995), которая, в основном, соответствует международным стандартам обработки спутниковых геомагнитных данных (Langel et al., 1981). Основной принцип этой методики – разделение спутниковой информации на отдельные составляющие, связанные с их физическими источниками (Хассан и др., 2002). Известно, что спутниковые данные

представляют собой совокупность магнитных полей, состоящих из главного магнитного поля ядра Земли, полей магнитосферного и ионосферного происхождения и аномального магнитного поля коры и мантии Земли. На первом этапе для разделения на части измеренного со спутника геомагнитного поля была исключена часть, связанная с главным магнитным полем ядра Земли по международной модели сферического гармонического синтеза - MGST(4/81), с количеством гармоник $n = m = 13$ (Langel et al., 1981). Для исключения из измеренного геомагнитного поля, части связанной с влиянием магнитосферного кольцевого тока, использовались аналитические выражения, представленные в работе (Rotanova et al., 1995). Затем оставшееся аномальное магнитное поле пересчитывалось в нижнее полупространство, путем решения обратной задачи магниторазведки (Серкеров, 1999) и по этим данным строились спутниковые геомагнитные разрезы.

ИСХОДНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА

Ретроспективный анализ результатов геофизической интерпретации геомагнитных данных ИСЗ МАГСАТ показал, что в периоды пролета ИСЗ над зоной Калифорнийского сейсмоактивного района Тихоокеанского региона, над местом, в котором впоследствии произошло землетрясение в приземной атмосфере, на высоте h примерно 0–400 км, наблюдались вытянутые вдоль поверхности Земли, изолированные пространственные электромагнитные неоднородности, размером вдоль меридиана до 4000 км (Харитонов и др., 2004). Эти неоднородности вероятно связаны с аномальной эксхалацией радиогенных аэрозолей, которые по современным представлениям являются основными источниками ионизации приземных слоев нейтральной атмосферы в моменты предшествующие землетрясениям (Дода, 2003; Сергеенко, Харитонов, 2005; Rotanova et al., 2004). Теоретически и экспериментально эти аномальные эффекты эксхалации радиогенных аэрозолей, возникающие накануне землетрясений, предсказаны и описаны в ряде научных публикаций (Уткин и др., 1997; Хегай и др., 2002).

Авторы проинтерпретировали спутниковые данные МАГСАТ вдоль витка № 1227, полученных 20 января 1980 г., витков № 1913, № 1914, полученных 4 марта 1980 г. и данных вдоль витка № 1925, полученных 5 марта 1980 г. (табл. 1). Витки спутника МАГСАТ (№ 1295, № 1296) за 25 января, когда произошло землетрясение,

Таблица 1. Координаты центров магнитных неоднородностей в атмосфере, выделенных по данным ИСЗ МАГСАТ над зоной аномальной эксхалиции радона в Калифорнийском сейсмоактивном районе

Виток ИСЗ МАГСАТ	Дата витка МАГСАТ	Магнитуда, M	Координаты центра магнит. неоднородностей	
			Сев. широта, φ_S	Зап. долгота, λ_S
№ 1227	20.01.1980	5.8	37°45'	-128°30'
№ 1913	04.03.1980	4.7	36°47'	-132°00'
№ 1914	04.03.1980	4.7	36°47'	-144°00'
№ 1925	05.03.1980	4.0	36°44'	-127°00'

похожее по своим параметрам на землетрясение 20 января, тоже анализировались, но они проходили достаточно далеко от района исследований и по времени были далеко от момента землетрясения. Поэтому мы не считали их кондиционным материалом для анализа связи спутниковых геомагнитных данных с наземными геофизическими процессами.

Оказалось, что вблизи расположения эпицентров землетрясений, произошедших 20 января и 5 марта 1980 г. в Калифорнийском сейсмоактивном районе соответственно с магнитудой и географическими координатами эпицентров (табл. 2): $M = 5.8$, $\varphi_e = 37^\circ 45'$, $\lambda_e = -121^\circ 57'$ и $M = 4.0$, $\varphi_e = 36^\circ 44'$, $\lambda_e = -121^\circ 18'$, на геомагнитных разрезах наблюдаются магнитные неоднородности, изолированные от остальной атмосферы, как по амплитуде изолиний трансформированного вниз со спутника поля, так и его топологии. Центры этих магнитных неоднородностей на координатах витка № 1227 спутника МАГСАТ: $\varphi_S = 37^\circ 45'$, $\lambda_S = -128^\circ 30'$ и координатах витка № 1925: $\varphi_S = 37^\circ 00'$, $\lambda_S = -127^\circ 00'$, корреляционно связаны с аномальной эксхалицией радона в атмосферу, отмеченной в эти дни наземными службами на станциях №№ 3, 4, 9, 10, 30, 43 и других (табл. 3) (Уткин, Юрков, 1997). Латинскими символами «s» отмечены параметры, полученные по данным спутника МАГСАТ, а символами «e» отмечены параметры, относящиеся к наземным данным о произошедшем землетрясении в исследуемом районе.

Значение географической широты (φ_e) эпицентра землетрясения и географической широты (φ_S) наблюдаемых на спутнике изолированных электромагнитных неоднородностях практически соответствует друг другу, а значения долгот (λ_S) спутника и эпицентра землетрясения (λ_e) с максимумом радоновых эксхалиций отличается на 6-7°. Авторы данной статьи предполагают, что слаборадиоактивные аэрозоли, поступающие в атмосферу из района расположения эпицентра землетрясения, также вытягиваются вдоль широты, как и вдоль меридиана до 40°, а может быть

Таблица 2. Параметры сильных землетрясений ($M > 4.0$) в Калифорнии за период орбитальной магнитной съемки 10.11.1979-19.05.1980 спутника МАГСАТ

Дата землетрясения	Магнитуда землетрясения	Координаты эпицентра землетрясения	
		Сев. широта, φ_e	Зап. долгота, λ_e
20.01.1980	5.8	37°45'	-121°57'
25.01.1980	5.3	37°45'	-121°57'
05.03.1980	4.0	36°44'	-121°18'
10.04.1980	4.7	36°47'	-121°22'

Таблица 3. Координаты расположения наземных станций наблюдений за изменением концентрации радона в пределах Калифорнийского сейсмоактивного района. Номера станций даны в соответствии с (Уткин, Юрков, 1997)

№ станций зафиксировавших аномальные эксхалиции радона	Координаты станций наблюдения	
	Сев. широта, φ	Зап. долгота, λ
3	36°48'	-121°29'
4	36°47'	-121°27'
9	36°43'	-121°23'
10	36°42'	-121°21'
30	35°48'	-120°16'
43	37°30'	-122°21'

и более по широте за счет постоянно существующих в атмосфере широтных ветровых течений.

В качестве примера приведены наиболее характерные пространственные сейсмоактивные структуры мантии на геомагнитных разрезах вдоль витков спутника № 1913 и № 1914, выполненные 4 марта 1980 г. (рис. 1, 2). Высота витков ИСЗ варьирует в пределах от 350 до 550 км.

Эти спутниковые геомагнитные разрезы (рис. 1, 2) показывают, что примерно за сутки, накануне обычного землетрясения, с магнитудой $M = 4.0$, произошедшего 5 марта 1980 г. в тектоносфере сформировалась достаточно устойчивая по времени, наблюдаемая в течение 90-180 минут, квазисимметричная (контрастная по знаку аномального поля, то есть квазисимметричные неоднородности в минимуме и максимуме поля) относительно географического экватора магнитная структура мантии. Эта структура проявляет себя в виде двух квазисимметричных относительно экватора, но противоположных по величине (минимум и максимум), восходящих от границы ядро-мантия ($d = 2900$ км) вертикальных полосовидных неоднородностей. При этом минимальные значения электромагнитных вертикальных полосовидных неоднородностей поля в средней и верхней мантии, вызваны, по-видимому, электромагнитными неоднород-

СОПОСТАВЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

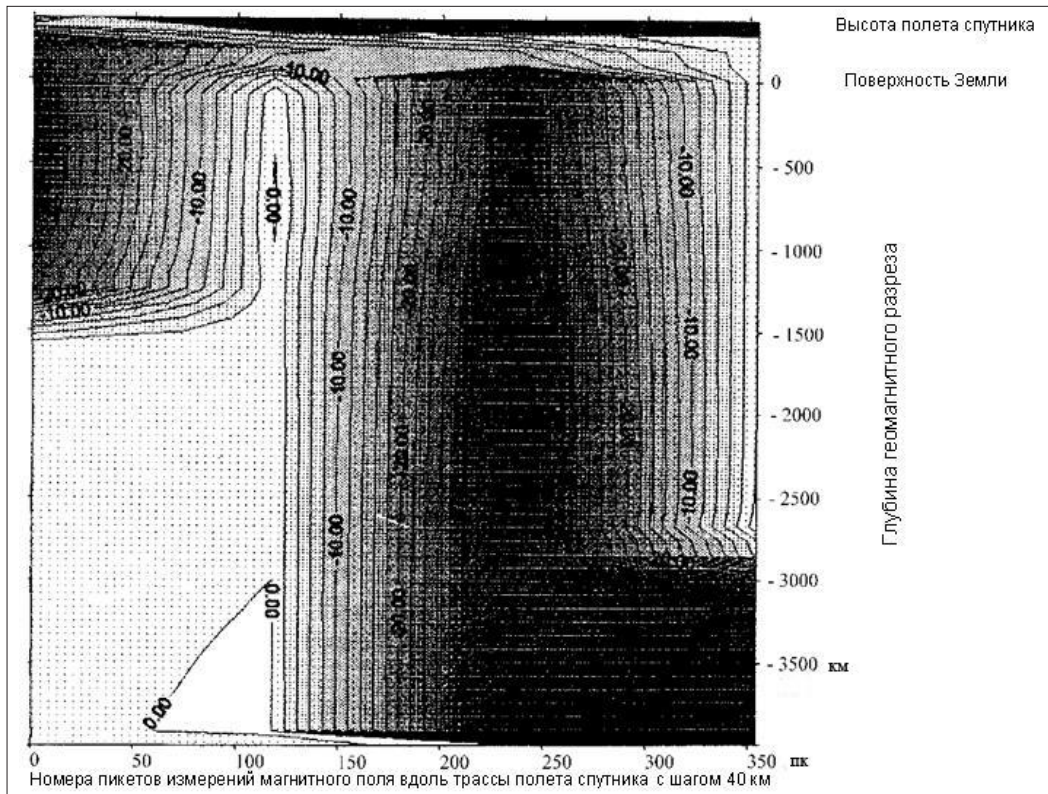


Рис. 1. Одновременный геомагнитный разрез трех геосфер Земли: ионосферы, атмосферы и мантии, в Калифорнийском сейсмоактивном районе Тихоокеанского региона по данным витка № 1913 спутника МАГСАТ от 04.03.1980. Изолинии Z-компоненты аномального магнитного поля на спутниковых геомагнитных разрезах приведены в нТл.

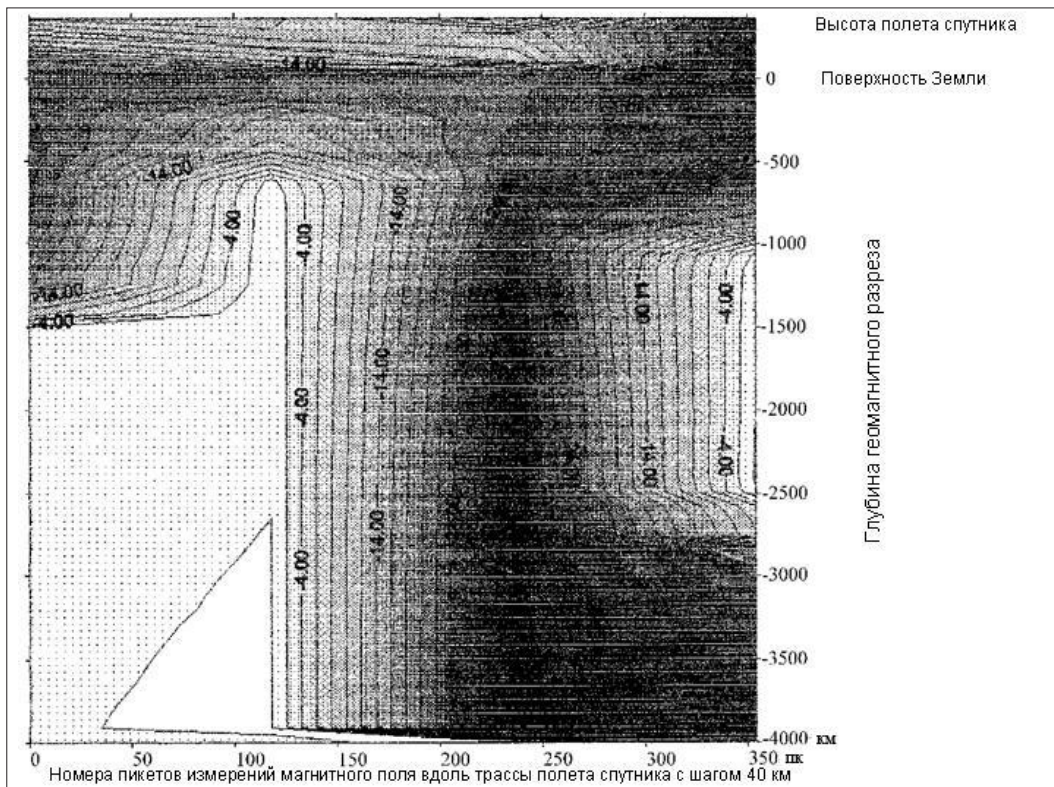


Рис. 2. Одновременный геомагнитный разрез трех геосфер Земли: ионосферы, атмосферы и мантии, в Калифорнийском сейсмоактивном районе Тихоокеанского региона по данным витка № 1914 спутника МАГСАТ от 04.03.1980. Изолинии Z-компоненты аномального магнитного поля на спутниковых геомагнитных разрезах приведены в нТл.

ностями, имеющими свое начало в жидком ядре Земли, на глубине d более 2900 км (рис. 1, 2). Можно назвать эту полосовидную структуру с минимальными, но положительными значениями поля и ее зеркальное отражение относительно экватора, с максимальными отрицательными значениями поля — электромагнитными зонами напряжений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, результаты проведенной интерпретации спутниковых данных МАГСАТ подтверждают теоретические представления (Авсюк и др., 2002; Стейси, 1972) и математические расчеты (Надаи, 1969) о существовании глобальной экваториальной симметрии напряженного состояния тектоносферы Земли и возможно даже, в мантии, и жидком ядре. Над электромагнитной структурой в мантии с положительными значениями поля и возник эпицентр землетрясения и максимум эксхалации радона.

Наши выводы об устойчивости пространственной структуры электромагнитных неоднородностей в мантии, в течение как минимум 1-3 часов (Харитонов и др., 2004), полученные по спутниковым данным, подтверждают ранее выполненные исследования, проведенные под руководством академика РАН Ф.А. Летникова (1990). В соответствии с его исследованиями показано, что Земля, как и любая планета, является самоорганизующейся диссипативной термодинамической системой, которую непрерывно покидает энергия и она постепенно стареет. Энергия покидает глубины Земли согласно синергетической теории Ф.А. Летникова (1990) в виде очень быстрых (1-5 минут) выбросов, горячих высокоминерализованных и, следовательно, высокопроводящих флюидов по активным, в данный момент времени и в данном месте на поверхности Земли, глубинным тектоническим разломам. Такие выбросы энергии, согласно (Летников, 1990), повторяются примерно с периодом 90 минут. То есть, как только в пределах некоторого глубинного разлома образуется щель из глубины мантии на поверхность Земли, то сразу образуется градиент давления, и газы под большим давлением снизу вырываются на поверхность Земли. Кроме того, над активными тектоническими разломами с выбросами флюидов (аэрозолей) в атмосферу, возникает электромагнитное поле экранирующие распространение аэрозолей, потому что высокоминерализованные флюиды и гидротермальные воды являются хорошим электролитом и очень быстро проводят электрические токи, генерируемые в глубинах мантии (Новик, Ершов, 2001).

Проведенный анализ полученных результа-

тов геофизической интерпретации спутниковых геомагнитных данных (Сергеенко, Харитонов, 2005; Харитонов и др., 2004; Rotanova et al., 2004) показал, что выделенные в атмосфере, над сейсмоактивными районами известных тектонических разломов Сан-Андреас, Хайвард, Калаверас (рис. 3) в восточной части Тихоокеанского региона, пространственные электромагнитные неоднородности (рис. 1, 2), могут быть связаны с повышенным содержанием радиогенного радона в приземной атмосфере (Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2006; Хегай и др., 2002; Berglet et al., 1986; King, 1980). Наличие таких неоднородностей в атмосфере подтверждается независимыми исследованиями (Дода, 2003).

Радон диффундирует в геологических породах однородной проницаемости, с постоянной скоростью, вследствие радиоактивного распада природных ураносодержащих элементов, содержащихся в недрах исследуемого региона. Изменение скорости диффузии радона в регионе с породами однородной проницаемости и его выделение в атмосферу с поверхности почвы (эксхалация) зависит от нескольких факторов, доминирующим из которых является трещиноватость горных пород. В свою очередь, трещиноватость геологических пород очень сильно зависит от напряженно-деформационного состояния пород исследуемого региона. То есть, при возникновении деформационных напряжений сжатия геологических пород исследуемого региона снижается их проницаемость, а при возникновении напряжений растяжения — проницаемость геологических пород увеличивается. Вследствие этого, аналогичным образом изменяется кажущийся коэффициент диффузии радона (Berglet et al., 1986; King, 1980).

Анализ научной литературы (Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2006; Gasparini et al., 1984) показал, что вне зон активной сейсмической деятельности радон постепенно образуется в небольших количествах из ураносодержащих (^{238}U) пород (гранитов, гипералкалиновых риолитов, океанических толеитовых базальтов). То есть, радон является составной частью некоторых минералов и горных пород (гранитов — 16%, цирконосодержащих пород — 12%, биотитов — 3%), поровых флюидов, и подземных вод.

Обычно миграция радона из глубин к поверхности Земли осуществляется посредством диффузии. Коэффициенты диффузии радона в воздухе находятся в диапазоне $1.5-6.8 \times 10^{-2}$ (см²/сек). Коэффициенты диффузии в воздухе чувствительны к содержанию влажности, уменьшая до 5×10^{-3} см²/сек при влажности воздуха 17%. Концентрация радона (C_h) в воздухе, на расстоянии — (h) от поверхности Земли определяется по формуле (Gasparini, Mantovani, 1978):

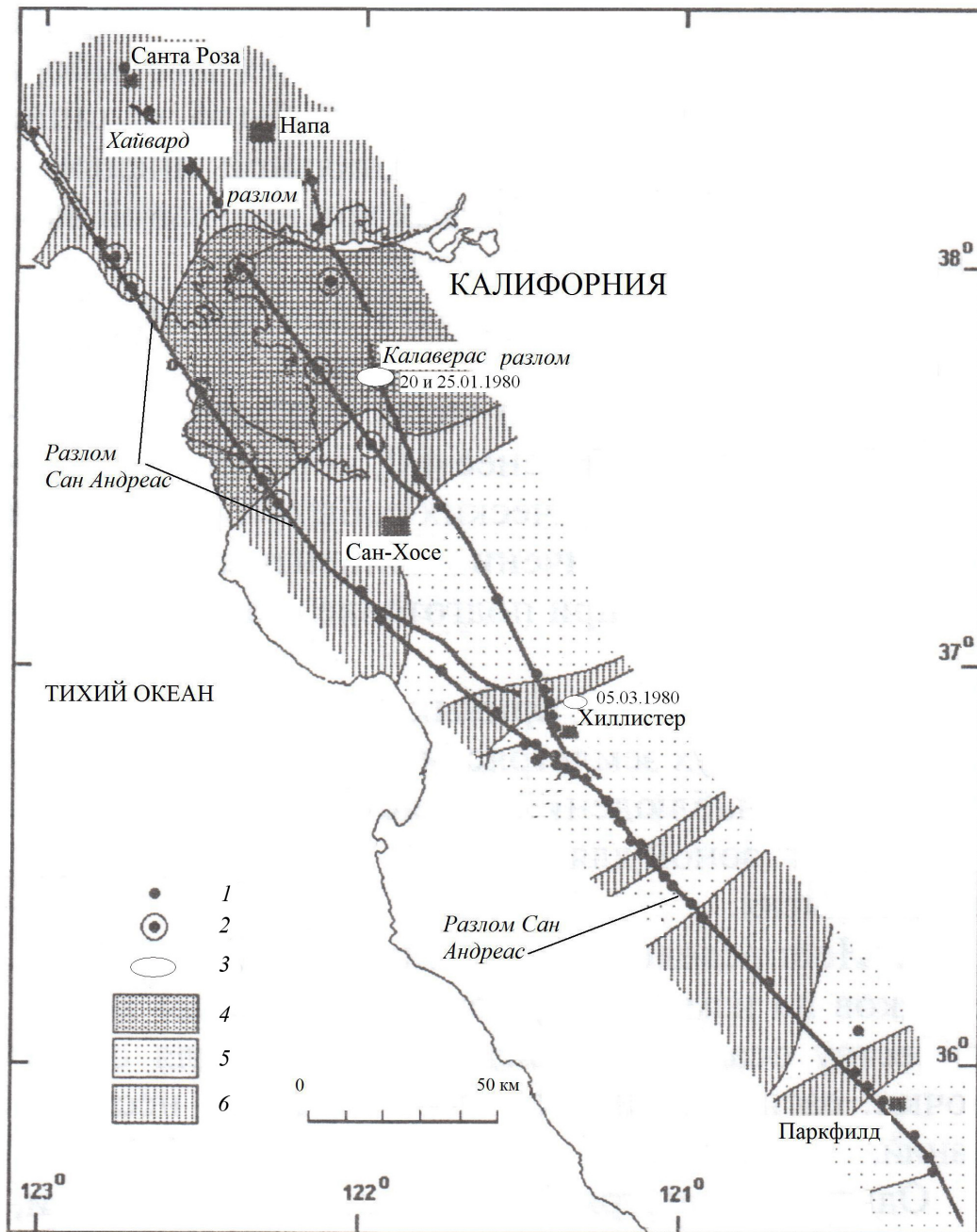


Рис. 3. Обзорная схема района исследований. Рисунок выполнен с использованием данных (Уткин, Юрков, 1997). 1 - наблюдательная станция, 2 - наблюдательная станция, в которой фиксировалось землетрясение, 3 - эпицентры землетрясений, 4 - зона динамического уменьшения концентрации радона перед землетрясением (ближняя зона), 5 - зона динамического увеличения концентрации радона перед землетрясением (дальняя зона), 6 - промежуточная зона.

$$(C_h / C_o) = \exp\left[h \left(-\sqrt{k/D}\right)\right], \quad (1)$$

где концентрация радона на поверхности Земли (C_o), D – коэффициент диффузии, k – постоянная распада.

Отношение (C_h / C_o) становится равным величине 0.01, только после расстояния 710 см диффузии радона от поверхности Земли через воздушный слой, в соответствии с коэффициентом диффузии в воздухе $D = 5 \times 10^{-2} \text{ см}^2/\text{сек}$. Простые диффузные процессы не могут продуцировать значительные аномалии радона, подобные тем,

которые иногда наблюдаются на Камчатке на вулкане Карымский (Gasparini, Mantovani, 1978). Радон также часто накапливается в сейсмоактивных районах, в ловушках глинистых горных пород, в верхней части природных резервуаров подземных вод. Для пород с гидравлической проницаемостью между 10^{-7} и 10^{-8} см^2 , конвективные движения в слое несколько сотен метров толщиной могут быть спусковым механизмом нормальных температурных градиентов, при которых концентрация радона (C) на расстоянии

(h) определяется по формуле (Gasparini, Mantovani, 1978):

$$(C_h / C_o) = \exp \left[h \left((V / 2D) - \sqrt{(V^2 / 4D^2) + (k / D)} \right) \right] \quad (2)$$

где V – скорость движения флюидов.

В результате можно предположить, что использование изменений кажущегося коэффициента диффузии радона будут отражать изменения напряженно-деформационного состояния массива геологических пород, вследствие изменения трещиноватости пород накануне возникновения основного толчка землетрясения.

Проведенные американскими исследователями площадные наземные измерения кажущегося коэффициента диффузии радона, посредством трековых детекторов, установленных в приповерхностном слое почвы, в мелких скважинах глубиной около 1 метра, в шестидесяти наблюдательных пунктах, в зоне пересечения сейсмоактивных разломов Сан-Андреас, Хайвард, Калаверас (Berglet et al., 1986; King, 1980) показали, что имеется определенное соответствие величины кажущегося коэффициента диффузии радона и моментов возникновения тектонических землетрясений с $M > 4.0$, произошедших в радиусе 300 километров и более (рис. 3). Все эксхалиции радона были разделены на три основные зоны: ближняя, дальняя и промежуточная.

Были построены карты пространственного распределения эксхалиций радона (Berglet et al., 1986) в этом районе Тихоокеанского региона. По данным эксхалиций радона на построенных картах были выделены «ближняя» и «дальняя» зоны предполагаемого эпицентра землетрясения (Berglet et al., 1986), которые соответствуют зонам сжатия и растяжения этих участков земной коры, возникающих накануне землетрясения, вокруг его эпицентра. То есть, в центральной части района землетрясения, вокруг его эпицентра возникает заметное снижение концентрации радона, а вокруг этой центральной зоны наоборот наблюдается значительное повышение концентрации радона. Эффект от этой протяженной области аномально высокой концентрации радона авторы данной статьи и наблюдали на ряде витков спутника МАГСАТ.

В настоящее время предложенная методика сопоставления спутниковых геомагнитных данных с наземной фиксацией ионизирующих аэрозолей (в том числе и радона) начинает применяться на территории Вьетнама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных авторами данной статьи исследований позволяют сделать следующие

выводы:

1. Эксхалиция (плотность потока) радона зависит от количества ураносодержащих (^{238}U) минералов в горных породах, и остается почти постоянной в асейсмичных регионах. В сейсмоактивных районах, при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород на последней стадии подготовки землетрясений, сток радона в атмосферу аномально увеличивается.

2. Геомагнитные разрезы по данным спутника МАГСАТ позволили выделить в атмосфере магнитные неоднородности, в окрестности эпицентральной зоны Калифорнийского землетрясения, связанные по времени с периодами аномальной эксхалиции радона.

3. Ежедневный спутниковый мониторинг магнитного поля над сейсмоактивными районами всей Земли может позволить выделять характерные магнитные неоднородности одновременно в трех геосферах (в ионосфере, атмосфере и мантии Земли), которые могут служить временными и пространственными краткосрочными предвестниками готовящихся землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-05-90300 Вьет_а.

Список литературы

- Авсюк Ю.Н., Худзинский Л.Л., Суворова И.И. Связь сейсмичности Земли с приливным воздействием Луны и Солнца // Проблемы теоретической сейсмологии и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. 2002. Вып. 33. С. 311-336.
- Дода Л.Ю. Геосейсмическое эхо солнечных бурь // Новости космонавтики. 2003. Т. 13. № 6 (245). С. 56-59.
- Касахара К. Механика землетрясений. М: Мир, 1985. 263 с.
- Летников Ф.А. Синергетика. Иркутск: Недра, 1990. 150 с.
- Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир, 1969. Т. 2. 863 с.
- Новик О.Б., Ершов С.В. Электромагнитные и тепловые сигналы из недр Земли (физика предвестников землетрясений). М.: Круглый год, 2001. 255 с.
- Сергеенко Н.С., Харитонов А.Л. Краткосрочные магнитосферно-ионосферные предвестники катастрофических землетрясений // Исследование Земли из космоса. 2005. № 6. С. 61-68.
- Серкерев С.А. Гравиразведка и магниторазведка. 1999. М.: Недра. 437 с.
- Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.

- Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 84-92.
- Фирстов П.П., Рудаков В.П.* Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997-2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 33-43.
- Фирстов П.П., Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Бузевич А.В.* Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2006. №1. Вып. 7. С. 102-109.
- Хассан Г.С., Харитонов А.Л., Серкеров С.А.* Закономерности изменения основных трехмерных статистических характеристик потенциальных полей восточной Азии по спутниковым данным и их связь с эпицентрами землетрясений // Исследование Земли из космоса. 2002. № 5. С. 29-38.
- Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкеров С.А.* Изучение глубинных неоднородностей тектоносферы и мантии Земли по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исследование Земли из космоса. 2004. № 3. С. 81-87.
- Хегай В.В., Легенька А.Д., Пулинец С.А., Ким В.П.* Изменения в F2-области ионосферы перед катастрофическим землетрясением на Аляске 28.03.1964 г. по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 2002. Т. 42. № 3. С. 360-365.
- Berglet H., Militzer H., Stolz W.* Der radon exhalation von Festgesteinsproben under Druckenwirung // Gerlands. Geophysik. 1986. V. 95. № 1. P. 75-82.
- Gasparini P., Mantovani M.S.M.* Radon anomalies and volcanic eruptions // J. of Volcanology and Geothermal Research. 1978. № 3. P. 325-341.
- Gasparini P., Mantovani M.S.M., Ribeiro F.B.* Temperature dependence of radon diffusion from some rocs and minerals // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 1984. V. 26. P. 135-141.
- King C-Y.* Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes // J. of Geophys. Research. 1980. V. 85. № 6. P. 3065-3078.
- Langel R.A., Berbort J., Jennings T., Horner R.* MAGSAT data processing: a report for investigators // NASA Technical Memorandum 82160. 1981. 330 p.
- Rotanova N.M., Kharitonov A.L., Frunze A.Kh.* Anomaly crust fields from MAGSAT satellite measurements: their processing and interpretation // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. № 1. P. 179-190.
- Rotanova N.M., Oraevsky V.N., Kharitonov A.L.* MAGSAT vector and scalar anomalous magnetic fields over Russian-Indian area // J. Geomagnetism and Geoelectricity. 1995. V. 47. № 1. P. 284-299.

CROSS ANALYSIS OF SATELLITE GEOMAGNETIC DATA AND GROUND MEASUREMENTS OF RADON CONCENTRATION TO DETERMINE EARTHQUAKE PRECURSORS (CASE STUDY FOR THE CALIFORNIA SEISMIC ACTIVE REGION)

Kharitonov A.L.¹, Kharitonova G.P.¹, Truong Quang Hao²

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Troitsk, e-mail: ahariton@izmiran.ru*

²*Institute of Geophysics VAST, Hanoi*

The authors analyzed a recalculation results in the lower half-space of the magnetic field. The field was measured in ionosphere by MAGSAT satellite during the strong earthquakes within the California region in the Pacific seismic belt; the mean height comprised about 400 km. Besides, the authors analyzed the formation of large magnetic heterogeneities revealed on the satellite images. The heterogeneities are connected with the increased values of radon in atmosphere (0-400 km) above the epicenters of earthquakes. The satellite images reveal symmetric about equator large magnetic heterogeneities inside the Earth mantle developing from 90 minutes up to a few days prior to the main shock. We may consider them as short-term earthquake precursors.

Keywords: satellite, geomagnetic data, earthquake precursors, radon concentration.