

НОЯБРЬ – ДЕКАБРЬ 6/2009

ISSN 0869-7078

НАУКА В РОССИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



**Землетрясения
с космической "точки зрения"**

**Технологии разделения
стабильных изотопов**

**Небезопасные
моющие средства**

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРЕДВЕСТИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Леонид ДОДА, главный специалист,
кандидат географических наук Нина НОВИКОВА,
начальник Центра,
кандидат физико-математических наук Леонид ПАХОМОВ,
начальник отдела тематической обработки,
Иван СТЕПАНОВ, аспирант,
Научный центр оперативного мониторинга Земли
Российского научно-исследовательского института
космического приборостроения (Москва)

**Одними из наиболее опасных по разрушительной силе
и наименее предсказуемых природных явлений
считаются землетрясения.**

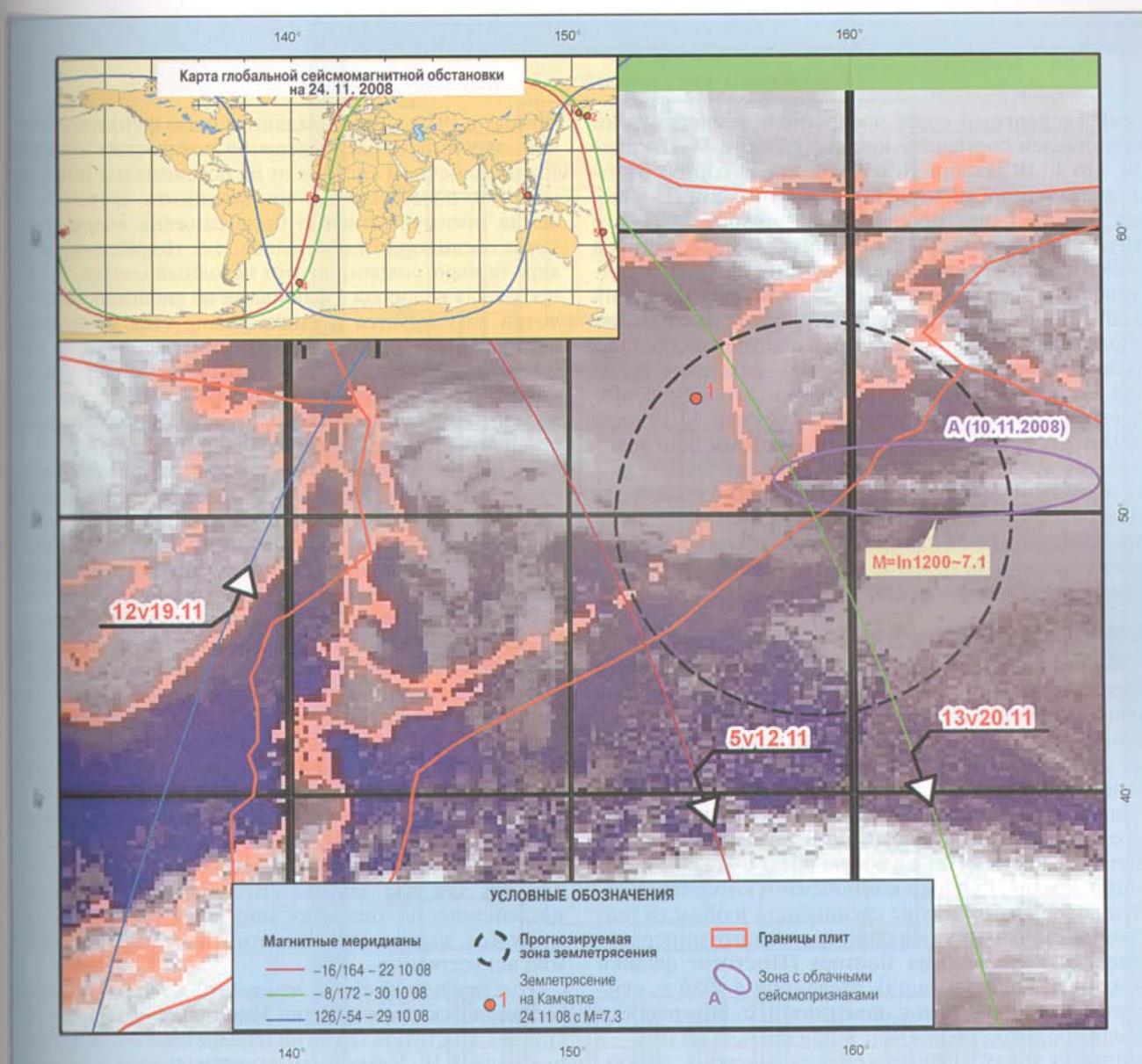
**Только за последние 6 лет от разгула подземной стихии
погибло свыше 600 тыс. человек.**

**К сожалению, попытки определить день и час грозного события
за редкими исключениями терпят неудачу.
Можно ли повысить точность прогноза?**

Первыми в скорбном списке за указанный период стоят катастрофы в Иране, декабрь 2003 г.; на Суматре*, декабрь 2004, март 2005; Пакистане, октябрь 2005; Яве, май, июль 2006; Китае, про-

*См.: Н. Лаверов и др. Катастрофа на Суматре: уроки и прогнозы. — Наука в России, 2007, № 1 (прим. ред.).

винция Сычуань, май 2008 г. России в этом перечне нет. Тем не менее в апреле 2006 г. в Корякии, в ноябре 2006 г. и январе 2007-го на Курилах (остров Симушир), июле и ноябре 2008 г. в Охотском море произошли мощные землетрясения с магнитудами 7,6–8,3. К счастью, обошлось без жертв. Однако по дол-



Космокарта сейсмомагнитной обстановки на Камчатке перед землетрясением 24 ноября 2008 г. с $M=7.3$.

госрочному прогнозу отечественных геофизиков и сейсмологов: академика Сергея Федотова, члена-корреспондента РАН Геннадия Соболева (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН), доктора физико-математических наук Петра Шебалина (Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН) и др. в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне в ближайшие 6 лет ожидается разрушительное событие магнитудой больше 8. Разумеется, предвидеть его день и час трудно, но получить доказательства приближения реально. Это можно сделать с помощью космических средств наблюдения, в том числе имеющихся

в распоряжении специалистов Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)*.

Семь лет назад, в октябре 2002 г., один из авторов данной статьи Леонид Дода обратился к создателю и первому директору Центра доктору технических наук Алексею Волкову с предложением организовать лабораторию сейсмического мониторинга и прогнозирования. Алексей Михайлович дал идею «зеленый свет», поручил составить программу эксперимента в Курило-Камчатской зоне. Ее удалось реализовать, и по полученным данным 11 ноября 2002 г. в Россий-

*См.: Н. Новикова и др. Земля: взгляд с орбиты. – Наука в России, 2008, № 4 (прим. ред.).

ский экспертный совет по прогнозу землетрясений представлен соответствующий документ. Мы ожидали, что до 10 декабря того же года в указанном районе должно произойти событие с магнитудой 7,3 и выше. Реально оно произошло 17 ноября 2002 г. с $M=7,3$ на глубине 500 км в Охотском море, попав в расчетную потенциальную зону и не приведя к разрушениям и жертвам лишь из-за глубокого залегания очага. Таким образом, наше предположение в целом оправдалось, что вызвало удивление многих специалистов-геофизиков. К сожалению, разделить успех коллег и, что важнее, критически его осмыслить Алексей Михайлович не успел: он умер 13 ноября 2002 г. Ныне совершенствование системы прогнозирования землетрясений на основе космического мониторинга и анализа их предвестников – одно из приоритетных направлений нашего Центра. Что же представляет собой данная система, в чем ее особенности, каковы результаты применения? На эти вопросы мы попытаемся дать ответы.

КЛЮЧ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

Напомним: прогноз землетрясения предполагает определение даты, места и магнитуды (энергии) будущего события. В НЦ ОМЗ эту задачу решают в рамках разработанной концепции сейсмотектогенеза, учитывающей ряд космо-геофизических закономерностей.

Еще основоположник комплекса современных наук о Земле академик Владимир Вернадский в первой трети XX в. высказал глубокую идею о «газовом дыхании Земли», главным компонентом которого является водород. По оценке специалиста в области геохимии природных газов, доктора геолого-минералогических наук Георгия Войтова (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта), сделанной в 1986 г., суммарный годовой поток последнего с поверхности Земли составляет 6,084 млн т, причем 4,48 из них – в рифтовых зонах*. Общая же масса водорода, дегазованного за всю историю планеты, в сотни раз больше его суммарного количества в коре, атмосфере и гидросфере. Но раз процесс не затухает, то должен существовать источник постоянной подпитки (компенсации) потерь водорода той же мощности. Размышляя над данной проблемой, Вернадский высказал гениальную догадку: «термодинамические и химические условия глубин нашей планеты заставляют нас видеть в них среды, благоприятные для существования водородистых тел, в том числе растворов водорода в металлах».

Развивая эту мысль, доктор геолого-минералогических наук Владимир Ларин, работавший в Геологическом институте АН СССР, на основе фактических

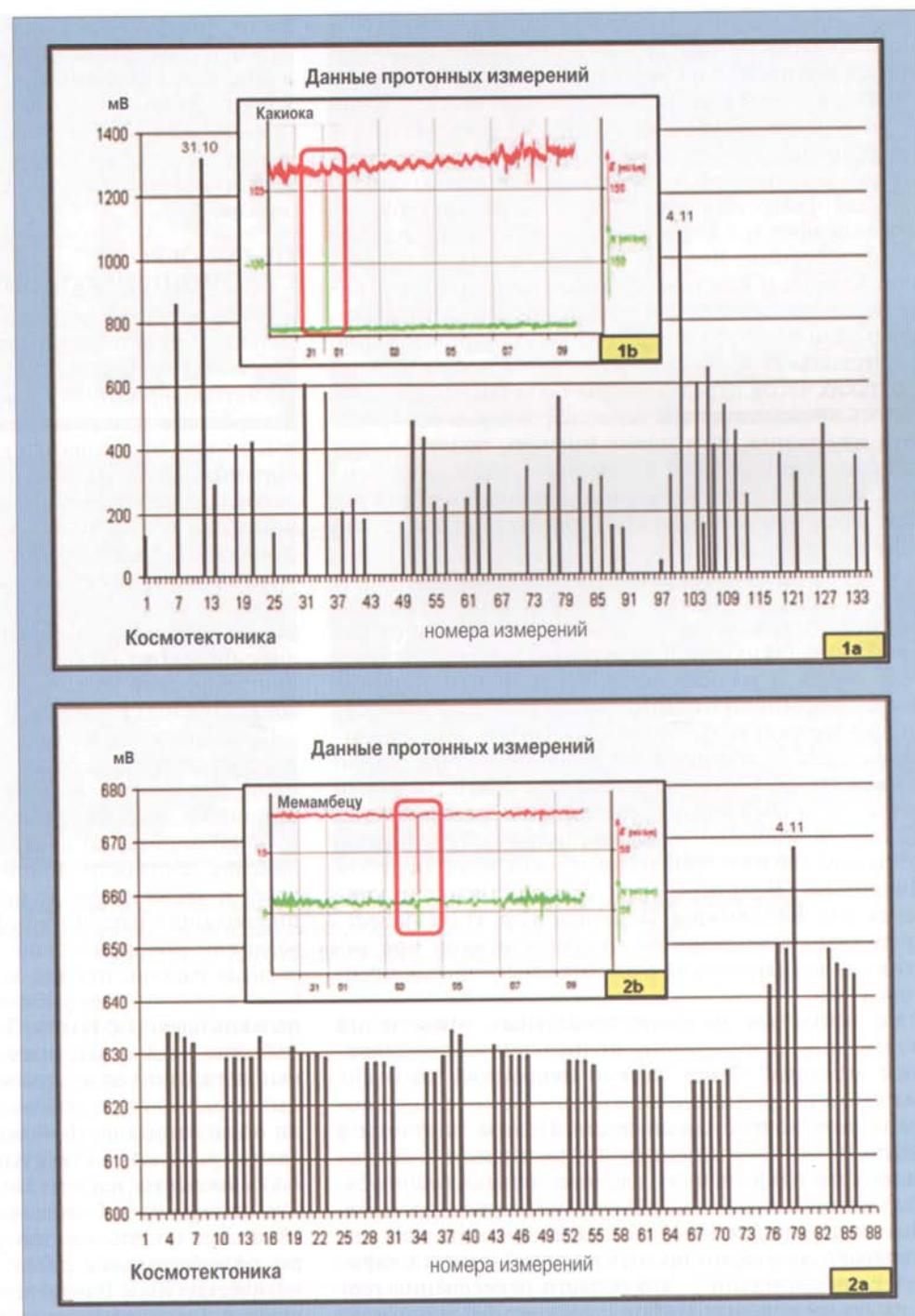
*Рифт – линейно вытянутая (на несколько сотен и тысяч км) щелевидная или ровообразная структура растяжения земной коры шириной от нескольких десятков до нескольких сотен км, ограниченная разломами. Рифтообразование – закономерная стадия развития земной коры (прим. ред.).

данных в 1970-х годах выдвинул идею функциональной зависимости распределения химических элементов в Солнечной системе от их потенциалов ионизации. Это позволило ему предположить: изначально Земля преимущественно была сложена водородистыми соединениями металлов, т.е. гидридами, и ее ядро поныне сохранило этот исходный состав. А вынос оттуда водорода с флюидами во внешние геоболочки регулируется и синхронизируется ротационным режимом планеты, насыщение же данным химическим элементом геоматериала изменяет физико-химические свойства последнего. В частности, железо «охрупчивается», у других материалов иной становится пластичность, проводимость.

Транспорт водорода из глубин на поверхность происходит прежде всего в зонах с нарушением сплошной структуры материала – по мантийным каналам, границам тектонических плит и блоков, разломам земной коры*. В силу отмеченной выше проникающей способности этого химического элемента на участках большой протяженности благодаря «оводораживанию» изменяются механические свойства взаимодействующих плит и блоков, возникают напряжения и деформации. Накопление же потенциала последних в количестве, достаточном для сброса сейсмотектонической энергии, – необходимое условие запуска землетрясения. Их проявления в различных геофизических полях обычно и называют предвестниками или признаками грядущих событий. Впрочем, очень часто даже при обнаружении предвестников землетрясение не происходит, так как для запуска его механизма требуется воздействие на опасную зону электромагнитного импульса, вызванного геомагнитным возмущением или искусственно.

Отметим в этой связи, что в 1980-х годах кандидат географических наук Лидия Морозова (в то время сотрудник Института геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева АН Узбекистана), изучая космоснимки облачности над полигонами испытаний ядерного оружия – Семипалатинск (Казахстан) и Лоб-Нор (Китай), – обнаружила определенное сходство линейных облачных структур, вызванных подземными ядерными взрывами (т.е. техногенного явления), и атмосферных признаков подготовки и запуска природного катаклизма. Нами же это сходство расширено на более широкий класс признаков в лито-атмо-ионосфере (далее это будет показано на примере подземного ядерного взрыва, проведенного КНДР 25 мая 2009 г.). Пожалуй, впервые удалось обнаружить отклики такого взрыва, а также проанализировать их взаимосвязь одновременно в нескольких геоболочках. Более того, выявлен новый класс облачных сейсмотектонических индикаторов, имеющих четырехугольную форму.

*См.: Б. Соколов. Проникая в глубины прошлого; Н. Павленкова. Незыблевые бастионы континентов. – Наука в России, 2005, № 1 (прим. ред.).



В соответствии с названной концепцией глобальный сейсмоконтактический процесс имеет геомагнитно-меридиональную направленность. Это легко обнаруживается по цепочкам землетрясений, регистрируемых соответствующими станциями в магнитно-меридиональной полосе, охватывающей примерно 7° (более 750 км) и простирающейся от южного к северному магнитному полюсу. Разрушительные события происходят, как правило, в зонах пересечения

указанных полос с границами тектонических плит и блоков. Такие сейсмоцепочки «запускаются» в среднем на 14 и/или 21 сутки после явлений на Солнце, вызывающих геомагнитные возмущения. Проведенная нами проверка гипотезы о связи последних с сейсмикой для мощных землетрясений с магнитудой свыше 6, произошедших с 1994 по 2008 г., подтвердила статистическую значимость этой гипотезы на уровне 95%. Данная закономерность позволяет опре-

делять ориентированную дату прогнозируемого грозного события на основе наземно-космического мониторинга процессов на Солнце и в геоболочках.

Как уже отмечалось, ротационный режим Земли определяет и регулирует потенциал напряжений и деформаций, его критические предсбросовые параметры, косвенно регистрируемые с помощью приборов для измерений земных токов, гравиметров, деформографов и т.д. Так, по данным станций наблюдения в Греции, Японии, в нашей стране на Северном Кавказе и Камчатке, разнесенных на многие тысячи километров и проводивших мониторинг в лито-, атмо- или ионосфере в 2004–2009 гг., одновременно на нескольких из них в интервале от 2 месяцев до нескольких часов перед основным событием фиксировалось аномальное поведение параметров контроля. Эти измерения, по нашему мнению, подтверждают связь нестабильностей вращения и обращения Земли*, являющихся причиной и аномалий земных токов, и сейсмотектонического процесса как следствий этих нестабильностей.

Отмеченная закономерность приводит к выводу: по сути предвестниками землетрясений служат локальные проявления глобальных геофизических аномалий, таких как перемещение масс вещества в теле Земли и геоболочках, геомагнитные бури. А поскольку они вызываются внешними, космическими факторами, то по механизму запуска и сами землетрясения – космические явления. Кстати, такой подход не нов и разрабатывался в XX в. многими отечественными исследователями – основоположником гелиобиологии Александром Чижевским, доктором геолого-минералогических наук Борисом Личковым (Ленинградский государственный университет), Владимиром Ларином и др. И по существу их идеи ставят под сомнение определение предвестников землетрясений в рамках классических представлений.

Но тогда, как на фоне глобальных возмущений можно локализовать зону подготовки надвигающегося бедствия? Ответ на этот непростой, но очень важный для организации наземно-космического мониторинга вопрос специалисты Центра получили в результате многочисленных экспериментов и анализа массива геофизических данных, предварявших самые разрушительные события недавнего времени. Оказалось, вероятные потенциально опасные локальные территории проявления глобальных геофизических аномалий – это области пересечения геомагнитных силовых трубок с границами сейсмотектонических зон, в которых наблюдаются изменения электротеллурических (земных) токов, отличные от фоновых (т.е. средних) значений. Наиболее возмущенная из-за геомагнитной бури совокупность этих трубок рассчитывается по специальной методике на основе наземных и космических измерений параметров межпланетного и геомагнитного полей. Пересечение силовой трубы с границами сейсмотектонических зон указывает на потенциально опасные об-

*См.: В. Жаров, Л. Зотов. Сейсмичность и вращение Земли. – Наука в России, 2006, № 1 (прим. ред.).

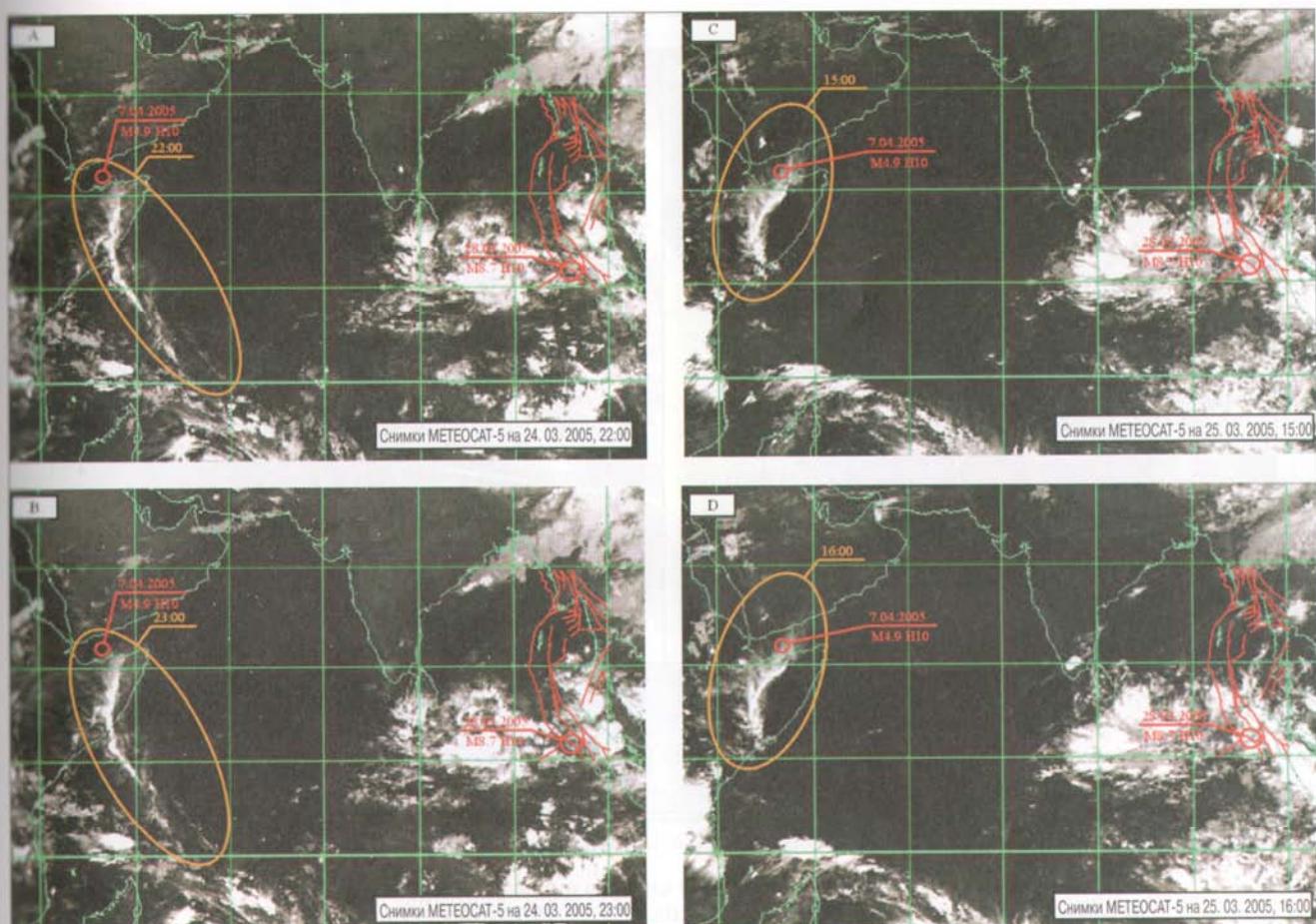
ласти – именно в них надо проводить мониторинг геофизических полей наземно-космическими средствами, выявляя аномалии и сейсмоиндуктивные отклики. Радиус зоны мониторинга первоначально принимается 7°. Ее локализация (корректировка) осуществляется на основе комплексного анализа выявленных аномальных лито-атмо-ионосферных признаков.

ОБЛАКА В РОЛИ СЕЙСМОИНДИКАТОРОВ

Наиболее информативными признаками при определении места и магнитуды прогнозируемого землетрясения оказались облачные сейсмоиндикаторы. На активизированных участках границ литосферных плит, блоков или разломов они повторяют их контуры, а часто проявляются в виде линейных или углубленных структур. Впервые на связь необычных облаков с активизацией процессов в разломах обратил внимание геолог и географ, организатор и первый руководитель службы постоянных сейсмических наблюдений в России Иван Мушкетов (1850–1902), неоднократно наблюдавший этот феномен во время экспедиций в Средней Азии. Формирование прямолинейных гряд облачности он объяснял локальной концентрацией ионов, обусловленной радиацией в зонах крупных разломов.

По современным представлениям, механизм образования облачных сейсмоиндикаторов, их связь с зонами подготовки землетрясений обусловлены инжецией в атмосферу радона – источника дополнительной ионизации воздуха гамма-излучением. Увеличение плотности ионов и заряженных аэрозолей ведет к увеличению количества центров конденсации водяного пара в атмосфере над разломом и образованию специфической облачности. А продукты распада радона, прежде всего альфа-частицы, вступают в реакции рекомбинации, образуя молекулярные комплексы с водой. Тurbулентное и регулярное действие воздушных масс разносит пространственный заряд по толще атмосферы, создавая аномальный электродный слой на больших площадях, а также облака повышенной ионизации, которыми и являются указанные структуры.

Специалисты нашего Центра обнаружили сейсмоиндикаторы 3- и 4-угольной формы. Их образование объясняет модель электротеплового пробоя литосферы, разработанная в 2003 г. кандидатом физико-математических наук Владимиром Натягановым (кафедра газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова). Согласно этой модели потоки тепла из недр Земли, локализуясь, образуют условную перевернутую пирамиду. Вершина ее находится в зоне подготовки землетрясения, конвективные потоки тепла распространяются по граням, а стороны основания в атмосфере образуют зоны повышенной конденсации указанной формы. Но без выбросов глубинного водорода процесс не обходится. Его заряженные струи в атмосферном электрическом поле «привязывают» облачные структуры к литосферным разломам, границам плит и блоков.



Специфические облачные структуры (обозначены в овалах), трассирующие продолжение Эфиопского рифта.

Снимки со спутника «Meteosat» (США) 24.03.2005, 22:00 (A); 24.03.2005, 23:00 (B);
25.03.2005, 15:00 (C); 25.03.2005, 16:00 (D).

Впрочем, облачность необычной формы возникает и как следствие подземных ядерных испытаний. Характерный пример – сейсмоиндикаторы, появившиеся после упомянутого события на территории КНДР и обнаруженные нашими специалистами на космоснимках. Нам удалось установить логарифмическую связь между максимальной протяженностью (D) облачной структуры, трассирующей участок активной сейсмотектонической области, и вероятной магнитудой $M = \ln D$. Заметим, сторона квадрата этой структуры составила примерно 110 км. По приведенной формуле потенциальная магнитуда сейсмического отклика составила $M = \ln 110 \sim 4,7$, что совпало с реальностью рукотворного землетрясения.

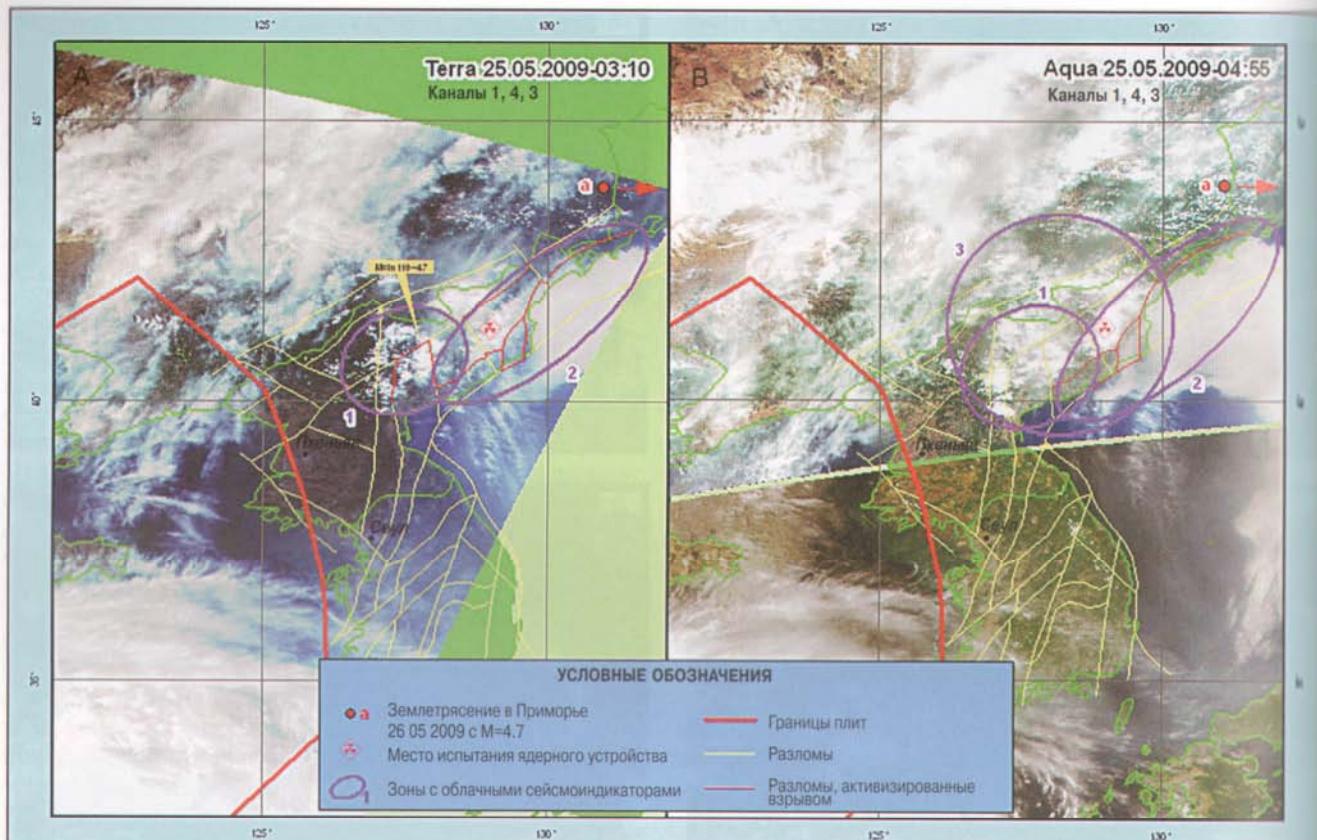
На космоснимках, получаемых прежде всего с геостационарных спутников, облачные структуры, обладающие такими признаками, удается выделить и обработать по специальной методике. В НЦ ОМЗ сформирован уникальный банк из более 1000 космоснимков облачных сейсмоиндикаторов самых мощных землетрясений 2002–2009 гг., отмеченных нами в начале статьи. Этот электронный архив – основа формируемой у нас геоинформационной системы

для решения задач сейсмического мониторинга и прогнозирования.

Пример разработанного в НЦ ОМЗ тематического продукта – космокарта с нанесенными в виде информационных слоев признаками подготовки мощного землетрясения, произошедшего 24 ноября 2008 г. с $M=7,3$ в Охотском море. Почти за полмесяца до этого события, 12 ноября 2008 г. в Сейсмосовете России был зарегистрирован прогноз, разработанный совместно экспертами НЦ ОМЗ и инновационного фонда «Подземные электрические технологии» (Петропавловск-Камчатский). Он подтвердился по всем трем параметрам – дате, месту и магнитуде – в пределах точности используемого нами метода.

ПРОГНОЗ В ЗЕРКАЛЕ ГЕОИНФОРМАТИКИ

Какова же технология получения тематического прогнозного продукта? На картографическую основу наносят геоинформационные слои с границами тектонических плит и предварительно рассчитанными по специальной методике сейсмомагнитными меридианами, а также с космоснимком облачных структур,



Облачные сейсмоиндикаторы испытаний ядерного устройства в КНДР 25 мая 2009 г. на снимках с космических аппаратов «Терра» 25.05.2009, 03:10 (А) и «Аквa» 25.05.2009, 04:55 (Б).
Землетрясение в Приморье с M=4,7, «наведенное» взрывом (а).
Красным цветом обозначены разломы, отраженные в облачных структурах.

имеющих сейсмоиндуктивные признаки. Количество слоев может наращиваться в зависимости от решаемых задач. Например, для составления программ мониторинга с использованием космических средств требуется сведения о трассах спутников. Пересечение трассы и прогнозируемой опасной зоны определяет пространственно-временные параметры включения научной аппаратуры. На карте-врезке представляются сейсмомагнитные меридианы с потенциальными возможностями запуска цепочек землетрясений. Их список дается в разделе «Условные обозначения».

Подобная аналитическая работа с графиками измерения земных токов и потока протонов была нами проведена по данным пространственно разнесенных японских станций Какиока и Мемамбену и станции «Космометеотектоника» в Петропавловске-Камчатском. Синхронность аномалий этих показателей, зарегистрированных 31 октября и 4 ноября 2008 г., указывала на глобальный характер вызвавшей их причины. Факт сигнализировал о подготовке мощного землетрясения — оно и произошло, как упоминалось выше, 24 ноября 2008 г. с M=7,3 в Охотском море на глубине 600 км. Событие случилось в прогнозируемой зоне, тем самым подтвердив правильность расчета. А вероятную дату события 13 или 20 ноября (± 2 суток) «подсказал»

сейсмомагнитный меридиан (14 или 21 сутки после геоэффективных явлений на Солнце 30 октября 2008 г.).

В своих расчетах наши специалисты используют также гелиофизическую информацию о вспышках на Солнце, индексы его активности, скорость солнечного ветра, параметры межпланетного и геомагнитного полей. Задействуем мы и базы данных сейсмомагнитных меридианов, сведения о параметрах вращения Земли, измерения земных токов и потока протонов на станциях в Греции, Японии, Камчатке и других регионах. Учитываем параметры состояния ионосферы по измерениям ионозондов, наземных станций и спутников GPS, ГЛОНАСС*.

Пополнение информационного гелиогеофизического «банка», формируемого благодаря научным приборам, установленным на различных космических аппаратах, также одна из важных задач нашего Научного центра.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ «ВЧЕРА» И «ЗАВТРА»

После катастрофического землетрясения на Суматре (Индонезия) 26 декабря 2004 г. Суматрано-Яван-

*См.: Ю. Носенко и др. ГЛОНАСС сегодня и завтра. — Наука в России, 2008, № 5 (прим. ред.).

ская сейсмогенная зона и обрамляющие Индийскую плиту тектонические области стали для специалистов Центра своеобразным полигоном по отработке технологий космического мониторинга. Интерес к отмеченной территории резко возрос после внезапного образования в 2005 г. в зоне Афарской депрессии (восточная Африка, Эфиопия) глубокого разлома шириной 8 м и длиной до 60 км, обнаруженного на снимках из космоса. Решающую роль в его внешнем образовании, на наш взгляд, сыграло, помимо указанного, еще одно трагическое событие на той же Суматре 28 марта 2005 г. По утверждению геологов, разлом возник в зоне подвижки тектонических плит, смещающихся со скоростью ~16 мм/год. Рискнем предположить: в недалеком геологическом будущем, через несколько миллионов лет, на этом месте будет играть волной океан, Африканский Рог станет самым островом, часть Афарской впадины и Эфиопского рифта превратится в залив. Подобный сценарий, по мнению доктора геолого-минералогических наук Владимира Казьмина (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН), 15 млн лет назад привел к тому, что расположенный в Азии Аравийский полуостров откололся от Африки, сформировались рифты Красного моря и Аденского залива.

Возвращаясь в день сегодняшний, отметим: эксперты и аналитики Центра заподозрили возможность сейсмических событий в данном регионе после обнаружения специфических облачных структур, трассирующих Эфиопский рифт (как затем оказалось, за 3-4 суток до мартовского 2005 г. землетрясения на Суматре). По космоснимкам время жизни этих облаков мы оценивали более чем в 22 ч, что указывало на активизацию сейсмотектонических процессов. Реконструкция по указанным структурам по тектонических напряжений на обрамлении Индийской плиты позволила высказать предположение о возможном мощном землетрясении (оно и грянуло 28 марта 2005 г. с $M=8,6$ на Суматре). Кстати, наши опасения усиливало и то, что с января 2005 г. в зоне же облачных структур по измерениям спектрорадиометра MODIS, установленного на космическом аппарате «Тerra» (США), периодически регистрировалось повышенное инфракрасное излучение поверхности теплового потока. И в этом нет ничего удивительного, ведь рифтовые зоны являются мощными каналами дегазации (прежде всего водорода) и выноса к поверхности мантийного вещества.

Отмеченные факторы позволяют высказать осторожное предположение о расширении границ рифтовой зоны в Индийский океан с дальнейшим развитием событий по изложенному ранее сценарию.

ПЛЮСЫ СОТРУДНИЧЕСТВА

Важная составляющая деятельности Центра по сейсмической тематике – сотрудничество с ведущими научными организациями страны: МГУ им. М.В.

Ломоносова, Московским инженерно-физическим институтом (МИФИ), Институтом космических исследований РАН, предприятиями Роскосмоса. Так, на космическом аппарате «Ресурс-ДК1» установлена научная аппаратура «Арина», разработанная в МИФИ, предназначенная для изучения прогнозистических характеристик всплесков высокоэнергичных частиц – предвестников землетрясений. Прием и обработку данных «Арины» осуществляет наземный комплекс нашего Центра, научную информацию анализируют специалисты МИФИ. По результатам совместных экспериментов удалось выявить признаки подготовки нескольких мощных землетрясений, а также открыть новое явление, связанное с аномальными траекториями тайфунов и высыпанием электронов из радиационных поясов Земли.

Примером объединения усилий специалистов Российского научно-исследовательского института космического приборостроения, НЦ ОМЗ, Центра им. Годдарда (США) и др. для исследования проблемы землетрясений стал Сахалинский сейсмомониторинговый эксперимент в июле-августе 2007 г. В ходе его исследовали процессы подготовки и запуска разрушительного события в структуре лите-атмо-ионосферных связей, отрабатывали наземно-космические элементы региональной системы комплексного мониторинга предвестников землетрясений, в том числе сети ионосферных станций, разработанных Институтом космического приборостроения. В результате установлена пространственно-временная взаимосвязь лите-атмо-ионосферных признаков, зафиксированных 30-31 июля перед катастрофой в городе Невельск (Сахалин) 2 августа 2007 г.

И в заключение о перспективах развития сейсмического мониторинга в нашем Центре. В соответствии с «Федеральной космической программой до 2015 г.» предусмотрен запуск космических аппаратов «Метеор-М», «Электро», «Канопус-В»*. В рамках Федеральной целевой программы «Геофизика» предполагается развернуть орбитальную группировку «Ионозонд», состоящую из пяти аппаратов. Установленная на них научная аппаратура позволит получать геофизические данные с признаками подготовки землетрясений. Прием, обработку и анализ информации будет вести и наземный комплекс НЦ ОМЗ.

*См.: О. Закутная. Космический мониторинг Земли. – Наука в России, 2008, № 2 (прим. ред.).

Иллюстрации предоставлены авторами