

А.А. Романов, Ю.М. Урличич, А.А. Романов
ФГУП «РНИИ КП»
С.А. Пулинец
ИЗМИРАН

ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА САХАЛИНЕ. ПРОГРАММА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В 2007 г.

Введение

Исследования последних лет убедительно показали наличие специфических вариаций параметров атмосферы и ионосферы в период подготовки сильных землетрясений ($M > 5$), наблюдаемых в области подготовки, размеры которой определяются формулой $R = 10^{0,43M}$, где R – радиус области подготовки землетрясения, а M – его магнитуда [1].

Их появление и основные морфологические характеристики, а также взаимосвязь атмосферных и ионосферных аномалий объясняются на основе разработанной недавно комплексной модели связи «литосфера-атмосфера-ионосфера» (LAIC) [2-4]. Активация тектонических структур в области подготовки приводит к увеличению выброса газов на поверхность, в том числе и радона.

Альфа-частицы с энергией порядка 5,8 МэВ, испускаемые радоном, ионизируют молекулы воздуха. Эти вновь образованные ионы становятся центрами конденсации водяного пара, всегда присутствующего в атмосфере. Конденсация (или, точнее, присоединение молекул воды к ионам) делает эти ионы устойчивыми, поскольку высокий дипольный момент молекул воды предохраняет ионы от рекомбинации.

Процессы ионизации и гидратации приводят к целому ряду эффектов, которые и можно идентифицировать как атмосферные и ионосферные предвестники землетрясений. Как результат конденсации уменьшается количество свободных молекул водяного пара в воздухе, что при достаточной интенсивности процесса можно зарегистрировать как уменьшение влажности. Молекулы воды, присоединяясь к ионам, изменяют свое фазовое состояние со свободного на связанное, что сопровождается выделением в окружающее пространство скрытой теплоты испарения, являющейся физической константой ($Q = 40,683$ кДж/моль).

Выделение энергии в атмосферу приводит к повышению температуры воздуха. Несмотря на то, что увеличение концентрации радона в воздухе весьма незначительно, энергетическая эффективность про-

цесса ионизации настолько высока ($> 10^8$), что эти изменения приводят к вариациям параметров атмосферы, регистрируемым с помощью как наземной метеорологической аппаратуры, так и методами дистанционного зондирования с борта искусственных спутников Земли. Вторым немаловажным фактором является размер области подготовки землетрясения. Для сильных землетрясений $M \approx 7$ площадь области подготовки составляет порядка сотен тысяч квадратных километров, что не может остаться незамеченным.

В рамках данной работы будет представлена программа комплексного эксперимента проведенного в рамках первого этапа пилотного проекта по мониторингу предвестниковых явлений в системе «литосфера-атмосфера-ионосфера» в дальневосточном регионе Российской Федерации, а также приведены и проанализированы предварительные результаты, полученные в рамках этих исследований.

Программа эксперимента

Наиболее сейсмически активным регионом на территории России является дальневосточный регион страны, в котором за 10 лет произошло более 500 сейсмических событий разной интенсивности (рис.1).

В 2007 году было принято решение о проведении комплексного эксперимента в рамках 1-го этапа пилотного проекта по опытной эксплуатации образцов аппаратуры, работающей по данным российских и зарубежных навигационных систем по диагностированию предвестников сильных землетрясений, направленного в первую очередь на сбор наиболее полной информации о вариациях различных параметров системы «литосфера-атмосфера-ионосфера» в сейсмически активном дальневосточном регионе Российской Федерации.

Основной целью комплексного эксперимента являлось экспериментальное подтверждение в сейсмоактивном регионе (о. Сахалин и прилегающие зоны) научных принципов комплексного диагноза предвестников землетрясений [2-4] на основе дан-

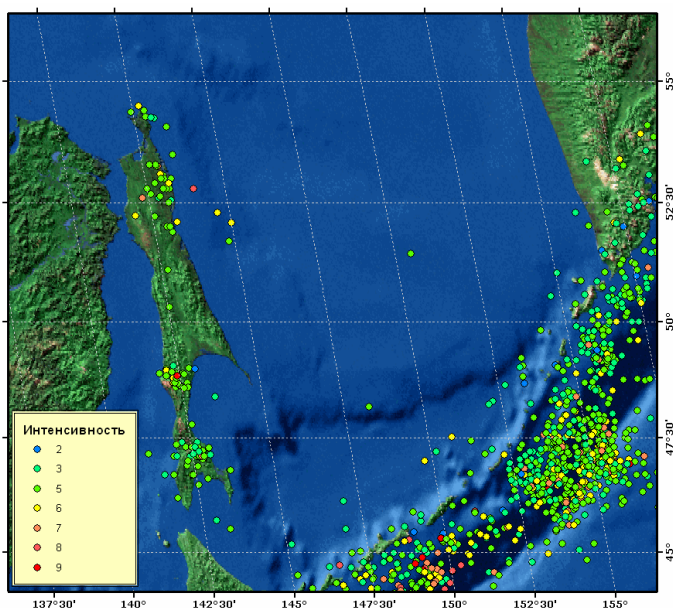


Рис. 1. Распределение землетрясений в Сахалинской области в период 1994-2006 гг.

ных дистанционного зондирования Земли из космоса, методик и алгоритмов сбора, обработки и распространения мониторинговой информации, основанной на данных существующих российских и зарубежных ИСЗ навигационного, метеорологического и природно-ресурсного назначения, а также гелиогеофизических данных.

Для достижения поставленных целей в ходе эксперимента должны были быть решены следующие задачи:

1. Развертывание в сейсмоактивном регионе (о. Сахалин и прилегающие зоны) специализированного оборудования (универсальная томографическая установка в г. Южно-Сахалинск и приемник ГЛОНАСС/GPS МРК-33 в г. Южно-Сахалинск и г. Невельск) и поддержка функционирования уже развернутой томографической цепочки (Ноглики – Поронайск – Южно-Сахалинск).
2. Сбор комплексных гелиогеофизических характеристик системы «гелиосфера – атмосфера – литосфера» для осуществления диагностирования предвестников землетрясений на территории Сахалинской области Дальневосточного региона России в соответствии с программой исследований.
3. Осуществление комплексного исследования полученных экспериментальных характеристик системы «гелиосфера-атмосфера-литосфера» и выделение аномалий, соответствующих сейсмической активности.
4. Адаптация существующих и разработка специализированных методик и алгоритмов обработки данных о состоянии среды.
5. Проведение анализа, систематизации и классификации полученных результатов.

6. Создание методики диагностирования предвестников землетрясений на основе комплексного анализа и совместной обработки атмосферно-ионосферно-магнитосферных данных с сейсмометрической информацией, а также базы алгоритмов предвестниковых явлений.

7. Оценка информативности существующих измерительных средств космического и наземного базирования, формирование требований к перспективным техническим средствам, а также разработка предложений по созданию региональной системы комплексного мониторинга предвестников землетрясений.

В рамках реализации экспериментальных работ предполагался не только сбор новых данных о предвестниках сильных землетрясений, проявляющихся в вариациях параметров системы LAIC, но и глубокий анализ того экспериментального материала, который был получен для сильных землетрясений в мире, произошедших ранее.

Анализ ретроспективных результатов

На рис. 2 показана корреляция вариаций радона в районе Акапулько (Мексика) и относительной влажности воздуха (текущее среднее по 5-ти суткам), измерявшейся в аэропорту г. Акапулько. Хорошо видно, что минимумы концентрации радона совпадают с максимумами относительной влажности (и наоборот). Естественно, что процесс ионизации не является определяющим, однако явно видна модуляция параметров атмосферы, связанная с ионизацией. Следует также отметить, что процесс

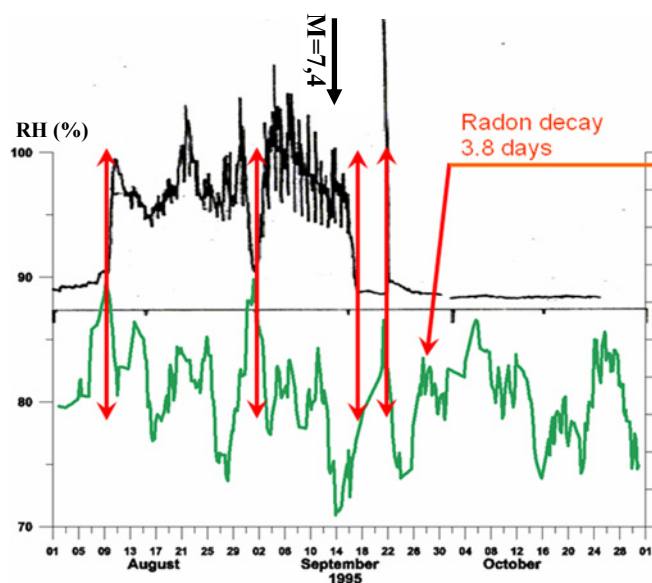


Рис. 2. Вариации радона (верхняя кривая) и текущее среднее относительной влажности воздуха (нижняя кривая) в Акапулько (Мексика) в период подготовки землетрясения в Копале 14 сентября 1995 г. $M=7,4$

подготовки (в виде увеличения концентрации радона) составляет несколько месяцев, а само землетрясение происходит на спаде радоновой аномалии.

Поскольку радон в 6 раз тяжелее воздуха, при выходе на поверхность он стелется вблизи поверхности земли, поэтому спутниковые измерения с помощью инфракрасных радиометров ошибочно ин-

прозрачности 10-12 мкм. Основным источником информации об излучении в этом диапазоне является прибор AVHRR, устанавливаемый на спутниках NOAA. Эта часть инфракрасного спектра не задерживается облаками и уходит во внешнее пространство. Поэтому такой поток называется убегающим потоком длинноволнового излучения (Outgoing Longwave Ra-

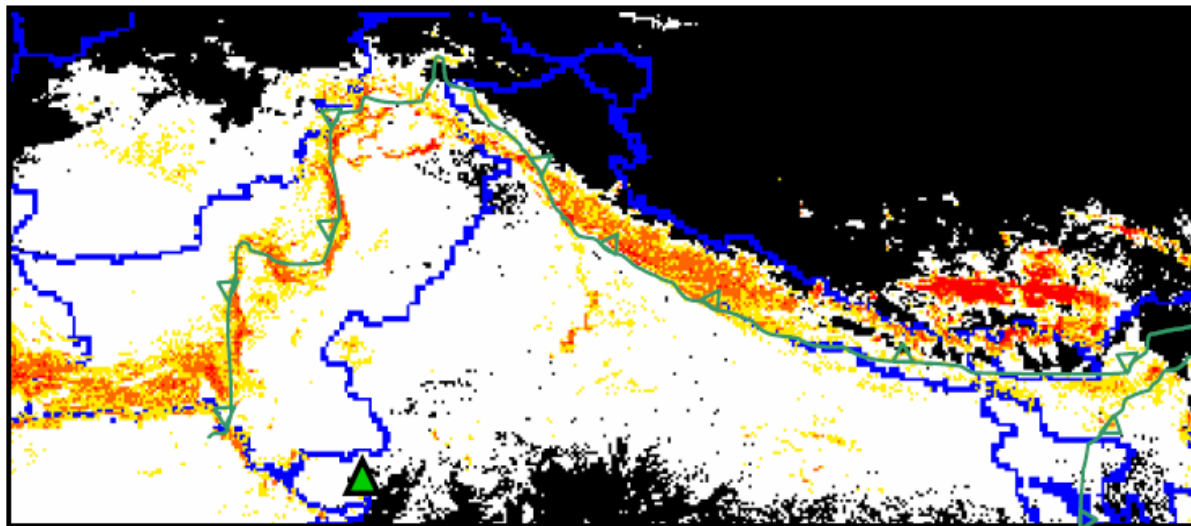


Рис. 3. Распределение поверхностной температуры перед землетрясением в Гуджарате (Индия) $M=7,8$ по данным спутника Meteosat-5. Зеленый треугольник – положение эпицентра землетрясения. Отчетливо видна активация границ тектонических плит и разломов внутри континента

терпретировались как повышение температуры земной поверхности.

На рис. 3 показан пример регистрации поверхностной температуры перед землетрясением в Гуджарате (Индия) 26 января 2001 г. $M=7,8$ [5].

Наиболее убедительными аргументами в пользу тепловых явлений в атмосфере, а не на поверхности земли, являются регистрируемые с помощью спутников аномальные потоки скрытой теплоты испарения [6, 7] и убегающего потока теплового излучения [8]. Поток скрытой теплоты излучения рассчитывается на основании оценки содержания водяного пара в столбе воздуха, что свидетельствует о том, что предложенная модель связи «литосфера-атмосфера-ионосфера» работает. На рис. 4 показан аномальный поток скрытой теплоты испарения, зарегистрированный за неделю перед землетрясением в Кашмире 8 октября 2005 г. $M=7,6$ [9]. Видно, что поток сориентирован вдоль границы между тектоническими плитами.

Еще более убедительным фактом является регистрация потока тепла над областью подготовки землетрясения на высоте порядка 12 км над облачностью. Очевидно, что никакое тепло с поверхности земли «добраться» до высоты 12 км не в состоянии. Такой поток возможен только в случае выделения тепла непосредственно в атмосфере. Этот поток инфракрасного излучения регистрируется в так называемом окне

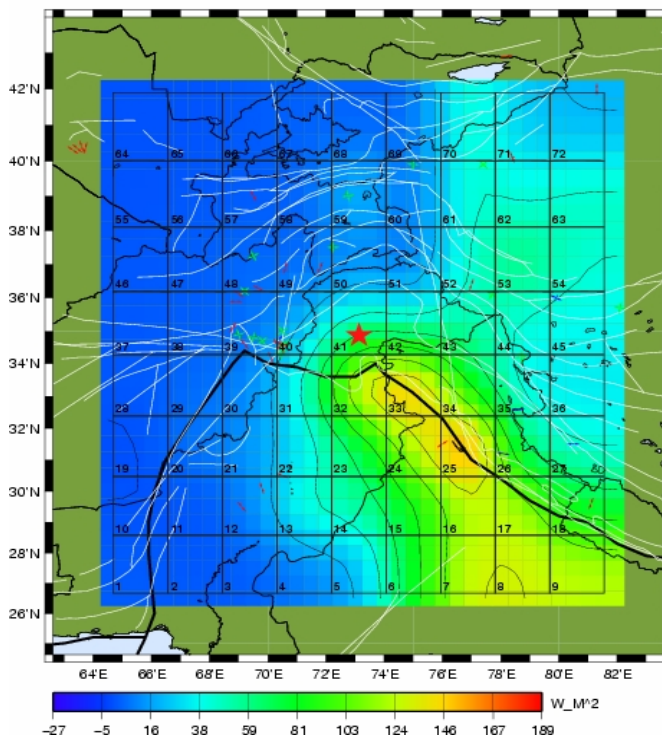
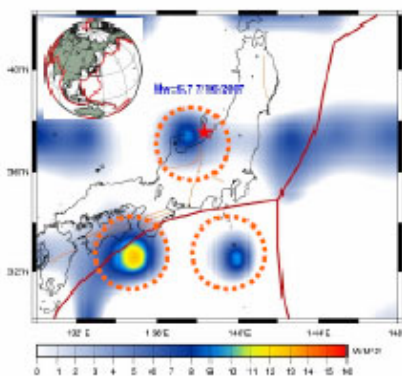


Рис. 4. Поток скрытой теплоты испарения, зарегистрированный за неделю перед землетрясением в Кашмире 8 октября 2005 г. $M=7,6$

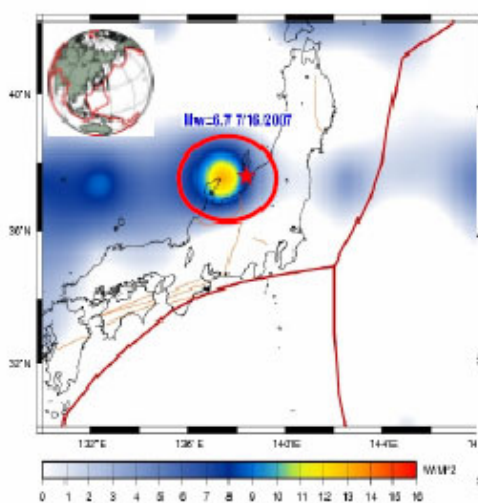
diation, OLR). На рис. 5 показана динамика OLR перед землетрясением в Японии 16 июля 2007 г. $M=6,7$. Видно, что положение источников тепла меняется со временем, но источники концентрируются вдоль активной границы между тектоническими плитами.

Признаками подготовки землетрясения являются не только появление аномалий в атмосфере и ионосфере, но и временная динамика этих аномалий. В частности, для ряда сильных землетрясений была обнаружена определенная форма изменений суточного диапазона температуры воздуха и относительной влажности [4, 11].

04.07.2007



14.07.2007



16.07.2007

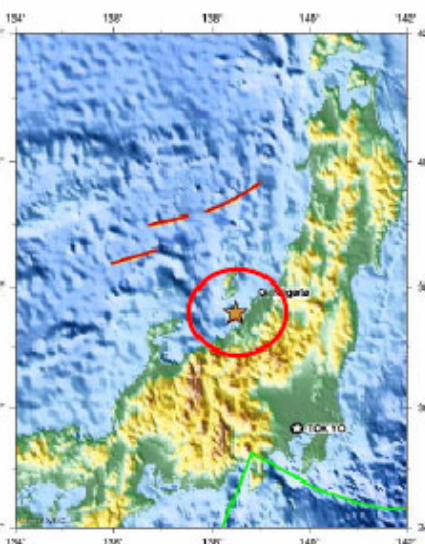


Рис. 5. Динамика OLR перед землетрясением в Японии 16 июля 2007 г. $M=6,7$ [10]

На рис. 6 показано одновременно изменение суточного диапазона температуры (черная кривая) и влажности (синяя кривая) перед землетрясением в Мичоакане (Мексика) 19 сентября 1985 г. $M=8,1$. Видно, что, по крайней мере, суточный диапазон температуры не выходит за пределы изменений в течение месяца, т.е. по сути не является аномалией со статистической точки зрения. Но форма его и временной масштаб максимума перед землетрясением совпадает с тем, что наблюдается для других землетрясений [11], а для влажности наблюдается в то же время абсолютный месячный минимум. Таким образом, в данном случае признаком является не величина изменения параметра (не являющаяся аномальной по отношению к месячным вариациям температуры и влажности), а форма изменений, повторяющаяся для многих землетрясений.

Перейдем теперь к аномалиям в ионосфере и механизму их образования. Ионизация и гидратация

ионов имеют еще одно важное следствие, связанное с атмосферным электричеством, и через глобальную электрическую сеть с ионосферой [12]. При гидратации образуются крупные ионные кластеры, достигающие размеров аэрозолей, что существенно снижает проводимость приземного слоя воздуха вследствие низкой подвижности этих кластеров. В результате увеличивается падение напряжения на эффективном сопротивлении атмосферы и увеличивается потенциал ионосферы относительно земли над областью подготовки землетрясения.

Ионосфера вследствие высокой проводимости

стремится выровнять потенциал над аномальной областью и сделать его равным глобальному. В результате появляется горизонтальная разность потенциалов в ионосфере, что приводит к дрейфу ионосферной плазмы и образованию неоднородностей концентрации плазмы, измеряемых радиофизическими методами, такими как вертикальное зондирование, спутниковая томография, измерение полного электронного содержания и др.

В зависимости от интенсивности выделения радона изменения в атмосферном электричестве могут тоже иметь различную степень интенсивности. В ионосфере могут образовываться как интенсивные крупномасштабные аномалии, так и наблюдаться мелкомасштабные неоднородности плотности плазмы. Но оба вида неоднородностей проявляются с тем же временным масштабом, что и атмосферные аномалии (рис. 7), что также говорит об их взаимосвязи. Статистически установлено, что в среднем

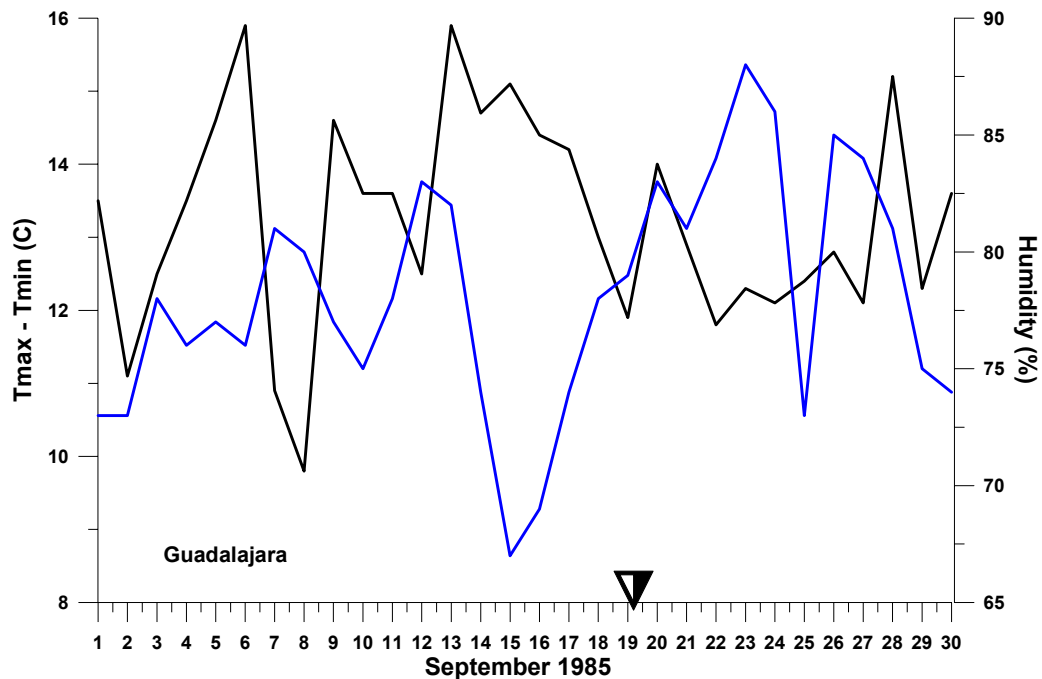


Рис. 6. Изменение суточного диапазона температуры (черная кривая) и влажности (синяя кривая) перед землетрясением в Мичоакане (Мексика) 19 сентября 1985г. M=8,1

ионосферные аномалии появляются за 5 суток до сейсмического толчка [13]. Для выявления ионосферных аномалий, связанных с землетрясе-

ниями, был разработан индекс локальной ионосферной изменчивости, который позволяет идентифицировать сейсмо-ионосферные аномалии даже на

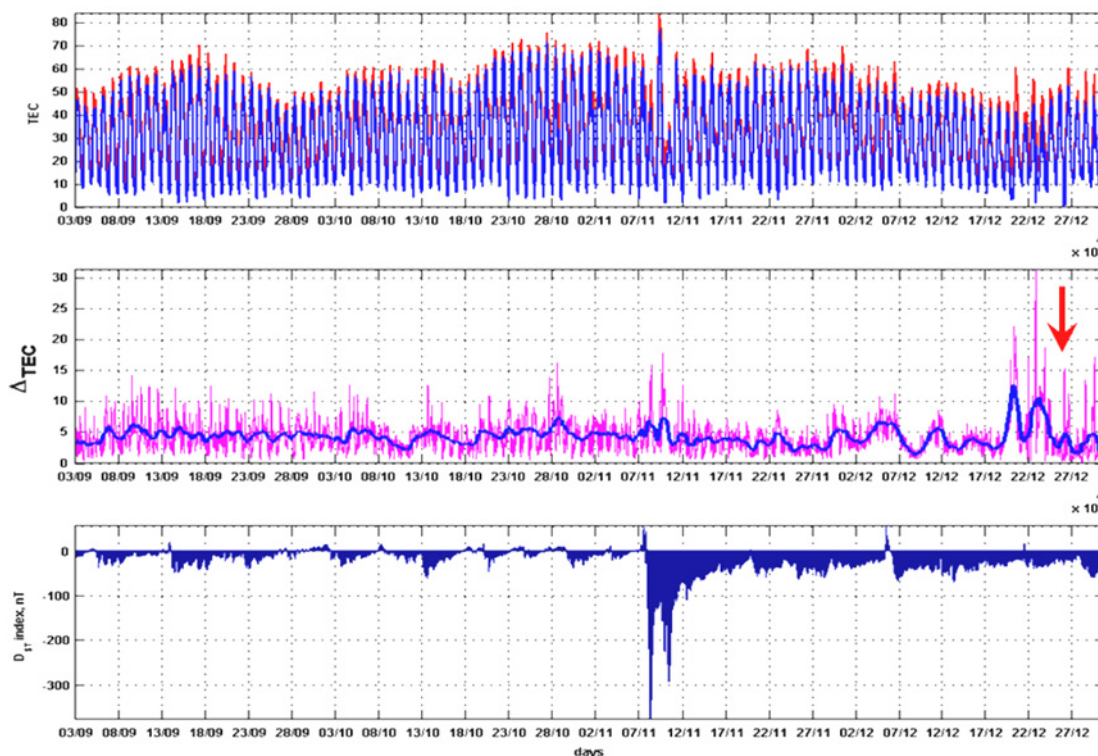


Рис. 7. Индекс региональной ионосферной изменчивости (средняя панель) в регионе Суматры (сентябрь-декабрь 2004 г.). Верхняя панель – максимальные значения (красная линия) и минимальные значения (синяя линия) полного электронного содержания для сети приемников GPS в регионе Суматры. Нижняя панель – глобальный индекс геомагнитной активности Dst

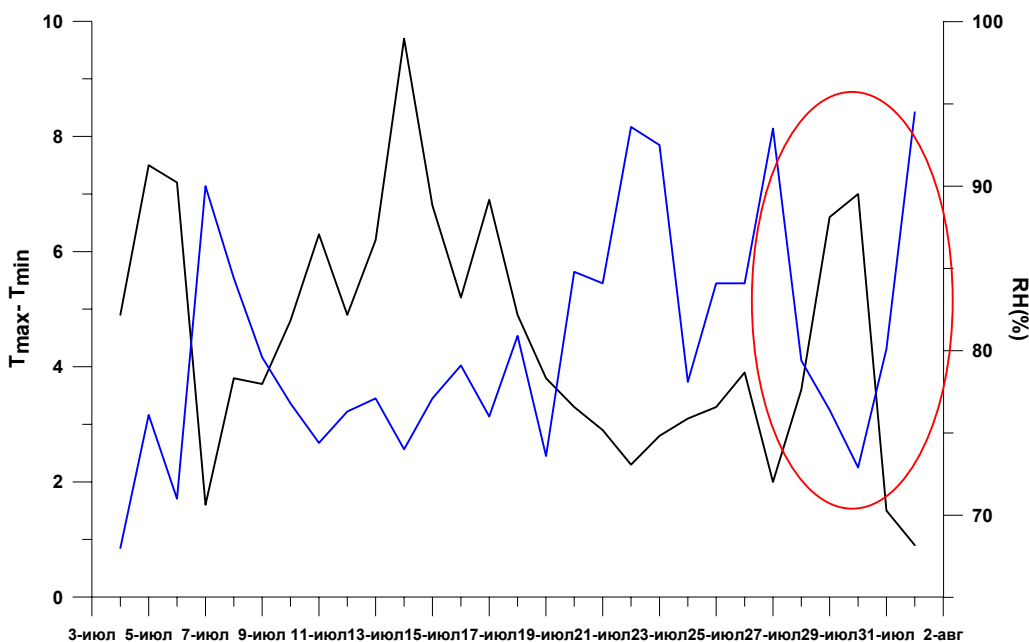


Рис. 8. Изменение суточного диапазона температуры (черная кривая) и влажности (синяя кривая) в г. Невельске перед землетрясением в Невельске (о. Сахалин) 2 августа 2007 г. M=6,3

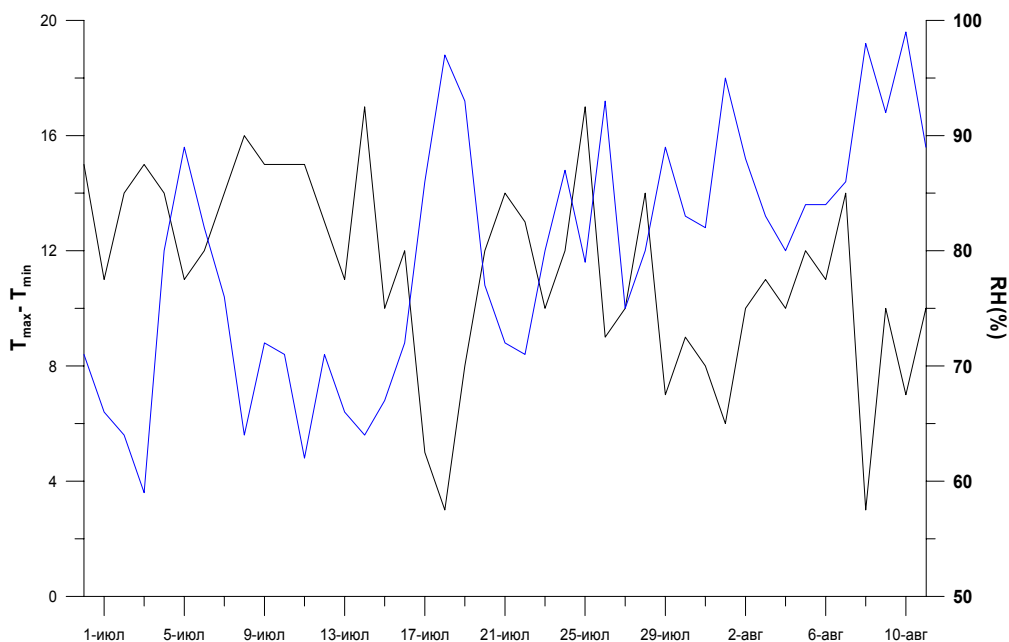


Рис. 9. Изменение суточного диапазона температуры (черная кривая) и влажности (синяя кривая) в г. Хабаровске перед землетрясением в г. Невельске (о. Сахалин) 2 августа 2007 г. M=6,3.

фоне геомагнитных возмущений и бурь [14].

На рис. 7 показан индекс ионосферной изменчивости, рассчитанный по данным сети приемников GPS вблизи эпицентра крупнейшего из недавних землетрясений на Суматре 26 декабря 2004 г. M=9,0 [15].

Как видно из рисунка, за несколько суток до землетрясения на Суматре индекс значительно

превышает величину индекса во время крупнейшей магнитной бури 7 ноября.

Результаты комплексного эксперимента

Перейдем теперь к анализу данных об атмосферных и ионосферных вариациях в период землетрясения в Невельске на Сахалине 2 августа 2007 г. Нами были проанализированы вариации температу-

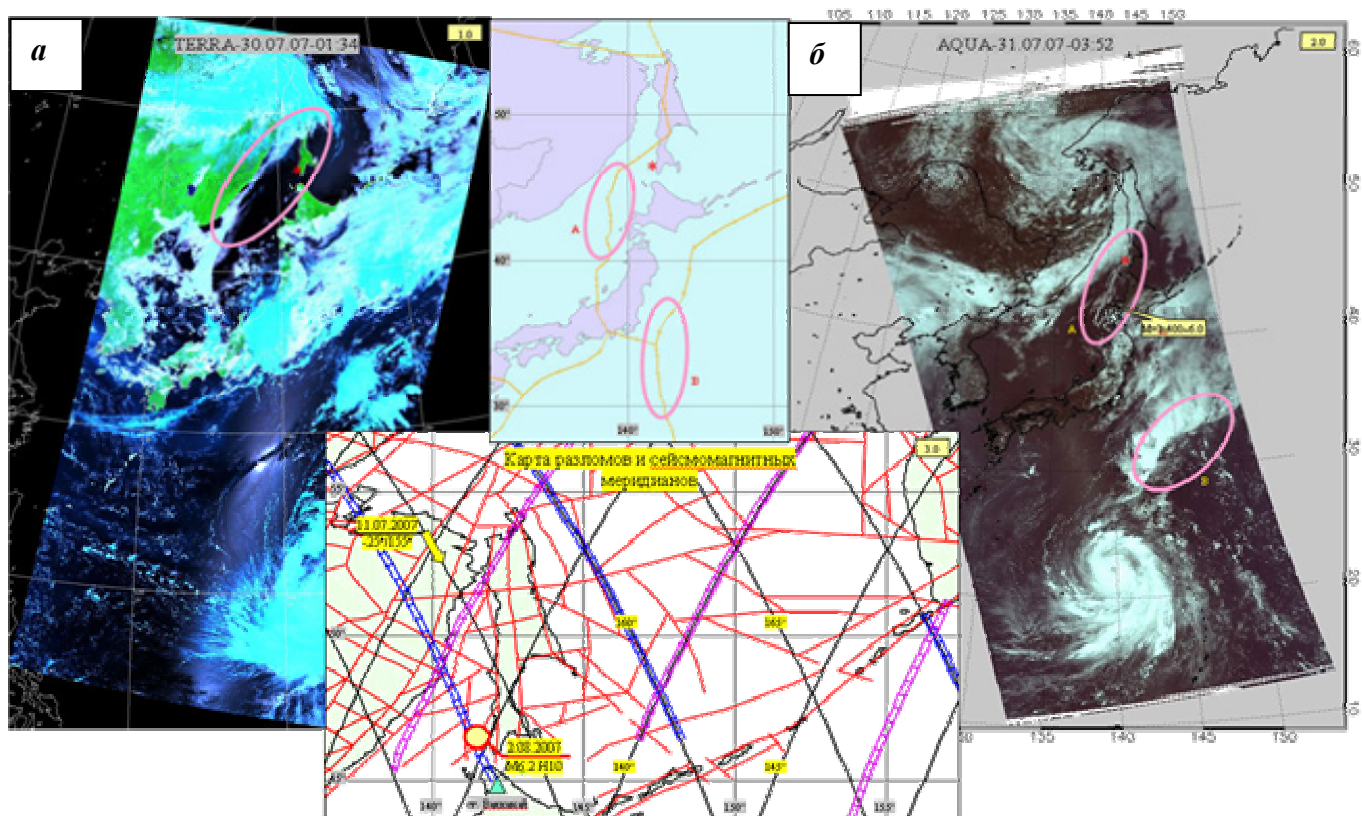


Рис. 10. Аномальные облачные структуры 30.07.2007 (а) и 31.07.2007 (б) по данным КА TERRA и AQUA соответственно

ры и влажности, спутниковые данные об OLR (Dimitar Ouzounov, NASA), данные об аномальных облачных структурах, полученных со спутников TERRA и AQUA, информация о вертикальном распределении электронной концентрации, которая была получена с использованием томографической цепочки станций, развернутой на о. Сахалин в меридиональном направлении [16], и данные GPS TEC для четырех дальневосточных станций.

На рис. 8 показаны вариации суточного диапазона температуры и влажности в Невельске для июля-августа 2007 г. Можно видеть, что ни диапазон температур, ни влажность не демонстрируют аномальных значений, и находятся в пределах месячных вариаций, но форма вариаций перед землетрясением соответствует типичной форме для других землетрясений, так же, как и временной масштаб появления максимума дневного диапазона и минимума влажности – четверо суток до землетрясения. Следует отметить, что вариации в Хабаровске (рис. 9) находятся практически в противофазе с Невельском, что соответствует выводам работы [17] о зонах выделения радона. Подобный эффект наблюдался в Мексике перед землетрясением в Мичоакане 1985 г. [11], где территория страны была разделена на зоны с противоположными по фазе вариациями атмосферных па-

раметров. Такие зоны соответствуют повышению и понижению концентрации радона, по сравнению с

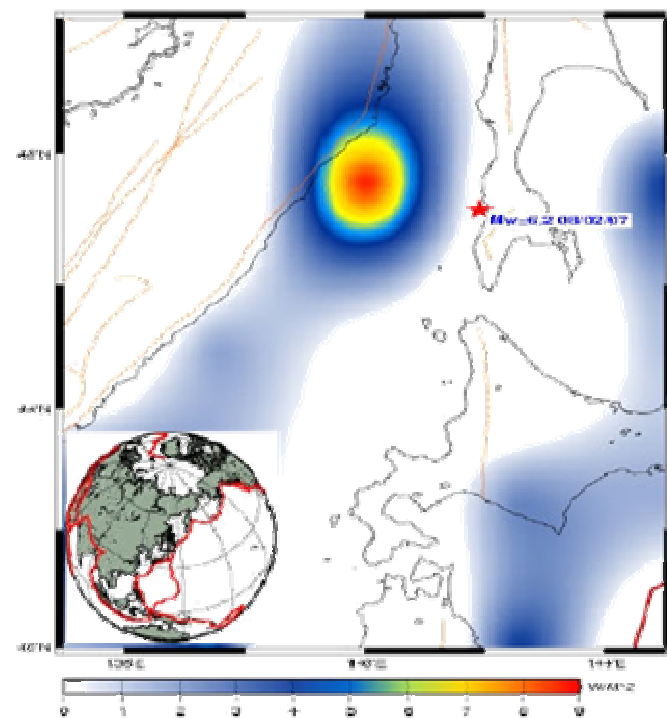


Рис. 11. Месячная аномалия (июль 2007 г.) потока OLR по данным дистанционного зондирования [10]

невозмущенным уровнем, что сказывается на вариации атмосферных параметров.

По информации, полученной с американских метеорологических спутников TERRA и AQUA, были отчетливо видны аномальные облачные структуры в виде треугольного *a* и вытянутого *b* облаков, которые локализовались над областью подготовки землетрясения (рис. 10).

По данным спутников NOAA был проанализирован поток OLR. На рис. 11 показан интегральный поток OLR в течение июля 2007 г. Явно видна аномалия на границе тектонических плит. Исходя из результатов, представленных на рис. 11, необходим более детальный анализ динамики аномалии OLR в этой области по времени приближения сейсмического толчка.

Для четырех станций дальневосточного региона (Петропавловск-на-Камчатке, Южно-Сахалинск, Хабаровск и Шинтоцукава (Япония) были рассчитаны вариации полного электронного содержания по данным GPS и в соответствии с [14] был рассчитан также индекс региональной ионосферной изменчивости.

Учитывая, что Петропавловск-Камчатский находится в более высоких широтах достаточно далеко от эпицентра, индекс рассчитывался только для трех более низкоширотных станций. Результат представлен на рис. 12. Как видно из рисунка, в течение недели перед сейсмическим толчком наблюдалось повышение индекса сейсмической активности (текущее среднее – жирная синяя линия показывает это повышение). Второй максимум после основного толчка связан с афтершоками, которые наблюдались еще в течение длительного времени. Следует отметить, что вариации индекса не очень велики, что говорит о низкой концентрации радона в этой области. Тем не менее, хорошо видно, что даже во время сильной магнитной бури в конце августа амплитуда индекса ниже, чем в период перед землетрясением.

Ход кривой индекса ионосферной изменчивости, полученного на основе анализа сигналов глобальных навигационных систем, имеет три четко выраженных максимума в течении 7 дней, предшествующих сейсмическому событию. На рис. 13

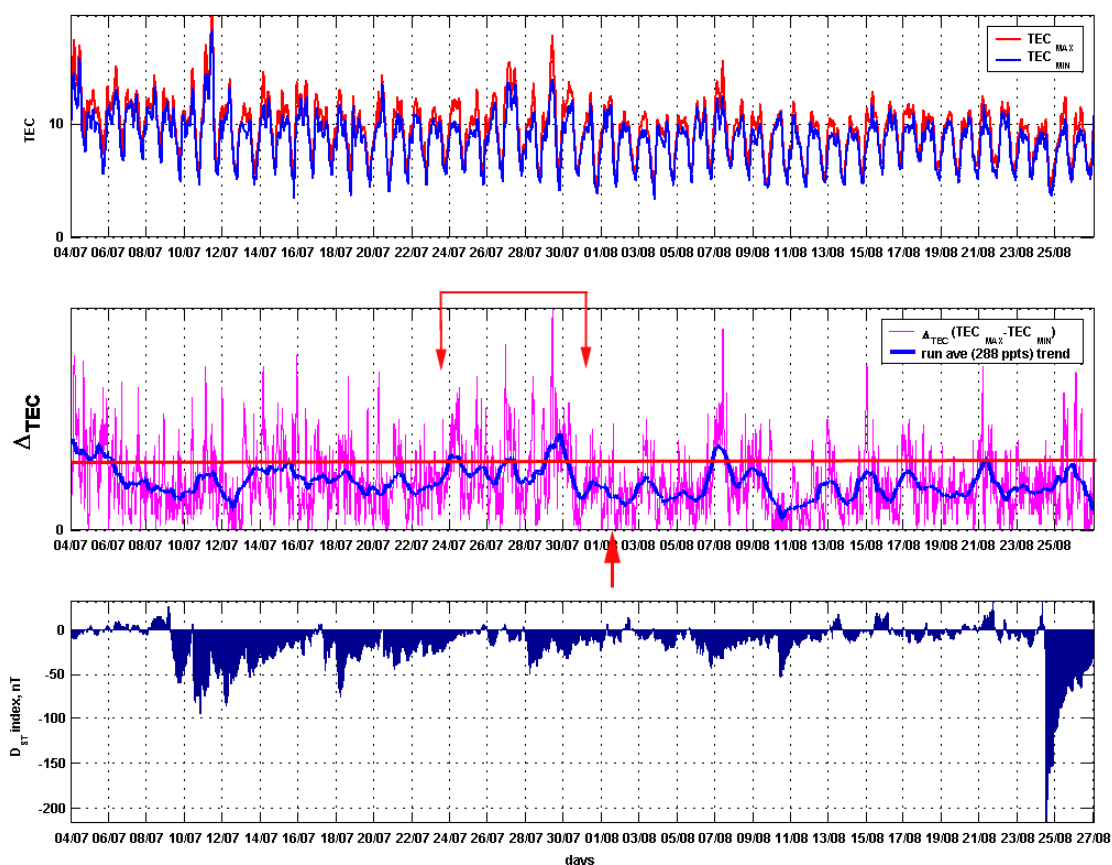


Рис. 12. Индекс региональной ионосферной изменчивости (средняя панель) по данным приемников GPS в регионе о. Сахалин (июль-август 2007 г.). Верхняя панель – максимальные значения (красная линия) и минимальные значения (синяя линия) полного электронного содержания для сети приемников GPS в данном регионе. Нижняя панель – глобальный индекс геомагнитной активности Dst

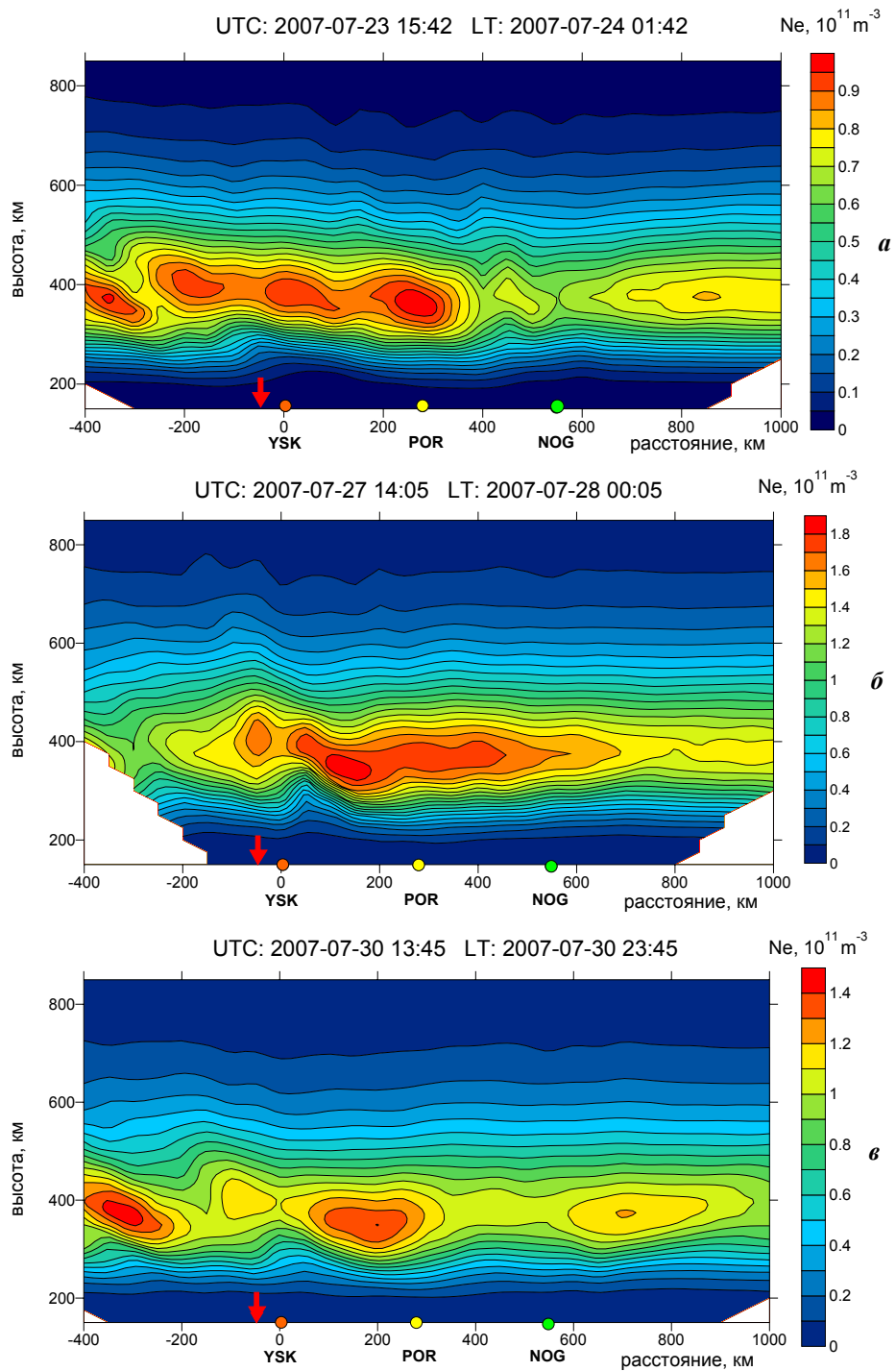


Рис. 13. Вертикальное распределение электронной концентрации, полученное по данным российских низкоорбитальных навигационных спутников Земли. Регистрации проведены 24.07.2007 (а), 28.07.2007 (б) и 30.07.2007 (в)

представлены аномалии электронной концентрации в ионосфере, реконструированные методом фазоразностной томографии во время ночных пролетов спутников.

Аномалии электронной концентрации (рис. 13) регистрировались 24.07.2007, 28.07.2007 и 30.07.2007, что полностью соответствует датам

регистрации максимумов индекса ионосферной изменчивости, полученного по данным систем ГЛОНАСС/GPS.

Заключение

В 2007 году на территории Сахалинской области Российской Федерации был проведен уникальный

эксперимент по комплексному диагностированию предвестниковых явлений с использованием данных, полученных на основе методов и средств дистанционного зондирования Земли из космоса.

Научная программа комплексного эксперимента в рамках пилотного проекта по опытной эксплуатации образцов аппаратуры, работающей по данным отечественных и зарубежных космических навигационных систем, для автоматизированного диагностирования предвестников землетрясений в основном выполнена.

Была собрана и проанализирована информация о состоянии атмосферы, ионосферы, выявлены аномалии следующих параметров системы «литосфера-атмосфера-ионосфера», подтверждающих модель взаимодействия, представленной в [2-4]. Характер соответствующих по времени вариаций температуры и влажности воздуха приземного слоя нижней атмосферы в различных населенных пунктах (г. Невельске и г. Хабаровске) соответствует выводам работы [16] о зонах выделения радона, где анализируется подобный эффект, имевший место в Мексике перед землетрясением в Мичоакане 1985 г.

Распределение интегрального OLR за июль 2007 г. в исследуемом регионе показывает наличие значимой аномалии над зоной тектонического разлома. Характер выявленных особенностей уходящего потока длинноволнового излучения показывает необходимость дальнейшей обработки (расчета динамики OLR за период подготовки землетрясения) и более тщательного анализа полученных результатов. Вариации индекса ионосферной изменчивости, подтверждаемые измерениями вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере по данным низкоорбитальных навигационных спутников, соответствуют выявленным аномалиям индекса перед землетрясением на Суматре в 2004 году и являются значимыми даже на фоне сильных магнитных бурь, имевших место в Дальневосточном регионе России.

На основе собранной информации, а также приведенного в работе анализа можно заключить, что морфология обнаруженных вариаций атмосферных и ионосферных параметров перед землетрясением на острове Сахалин 2 августа 2007 г. полностью соответствует признакам, обнаруженным ранее для других сильных землетрясений. Это говорит об общности физического механизма. В то же время следует отметить, что амплитуда зарегистрированных вариаций как в атмосферных, так и в ионосферных параметрах довольно невелика. Скорее всего, это можно объяснить геологией региона, которая обуславливает низкую концентрацию радона в земной коре.

Авторы выражают огромную признательность С.В. Трусову, Л.Н. Доде, Д. Узунову, Л. Чираоло и А. Коцаренко за предоставление данных и помощь в обработке экспериментального материала при подготовке публикации.

Работа проведена при поддержке РФФИ (проект № 06-07-08022).

Литература

1. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pageoph.*, 1979. – 117. – P. 1025-1044. (Dobrovolsky I.P. Theory of the tectonic earthquake preparation. / I.P. Dobrovolsky. – Moscow: UIPE RAS, 2000. – 134 p.)
2. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A. Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer, Berlin, Germany, 315 p., 2004.
3. Pulinets S. A., Ouzounov D., Doda L. N. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling. Main principles and practical validation, AGU Fall Session, San Francisco, T34B-02 INVITED, December, 2006.
4. Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K. A., Pokhmelnikh L. A. The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes, *Physics and Chemistry of the Earth.* – 2006. – №31. – P.143-153.
5. Genzano N., C. Aliano, C. Filizzola, N. Pergola, V. Tramutoli, A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj-Gujarat earthquake, *Tectonophysics.* – 2007. – №431. – P.197-210.
6. Dey S., Singh R. P., Surface latent heat flux as an earthquake precursor, *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 3, 2003. – Pp. 749-755.
7. Dey, S., Sarkar, S., Singh, R.P., Anomalous changes in column water vapor after Gujarat earthquake. *Advances in Space Research.* – 2004. – №33 (3). – P. 274-278.
8. 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. – № 431. – P.211- 220.
9. Multisensor approach of Analyzing Atmospheric // Ionospheric EM signals connected with major earthquake activities, XXIV IUGG General Assembly / D. Ouzounov, S. Pulinets, G. Cervone. – Perugia, ITALY, 2-13 of July, 2007.
10. Ouzounov D. NASA/GSFC/SSAI/GMU. Private communication.
11. Pulinets S. A. and Dunajcka M. A., Specific variations of air temperature and relative humidity around the time of Michoacan earthquake M8.1 Sept. 19, 1985 as a possible indicator of interaction between tectonic plates, *Tectonophysics.* – 2007. – № 431(1-4). – P. 221-230.
12. Pulinets S. A., Natural Radioactivity, Earthquakes and the Ionosphere, *EOS.* – May 15 2007. – Volume 88. – Number 20. – P. 217-218.
13. Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., Tsai Y. B., Chen Y. I., Pulinets S. A., Yu S. B., Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, *Anales Geophysicae.* – 2004. – 22 (5). – P. 1585-1593.
14. Pulinets S. A., Kotsarenko A. N., Ciralo L., Pulinets I. A., Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation, *Adv. Space Res.* – 2007. – 39 (5). – P. 970-977.
15. Atmospheric and Ionospheric Effects Observed around the Time of Sumatra Megathrust Earthquakes of 26 Dec 2005 and 28 March 2005 // International Workshop on Early Warning and Monitoring Earthquake by Using Electromagnetism Detecting Satellite / S.A. Pulinets, D. Ouzounov, M. Parrot. – Jakarta, 2007.
16. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение / Ю.М. Урличич, А.А. Романов, А.А. Романов. – 2006. – №1. – С. 167-172.
17. Уткин В. И. Радон и проблема тектонических землетрясений // Соросовский образовательный журнал / В. И. Уткин. – 2000. – Т.6. – №12, С. 64-70.