

Г.Г. Матвиенко, В.А. Алексеев*, А.И. Гришин, Г.М. Креков, М.М. Крекова

Исследование флуктуаций электрических и аэрозольных характеристик атмосферы как предвестника тектонической активности

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

** Институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк*

Поступила в редакцию 7.03.2007 г.

Приводятся результаты комплексных исследований флуктуаций электрических и аэрозольных характеристик атмосферы как предвестника тектонической активности земной коры. Экспериментальные измерения проводились в районе Бугазского разлома на Таманском полуострове. Показано, что напряженность электрического поля E и аэрозольный коэффициент рассеяния σ_s за несколько часов до землетрясения начинают возрастать по абсолютному значению, а непосредственно после толчка уменьшаются до фоновых значений. Форма и максимальные значения амплитудных спектров E и σ зависят от временного интервала между периодом измерений и моментом тектонического возмущения. Из полученных данных следует, что аэрозоль существенно влияет на электрические характеристики атмосферы. В результате численного эксперимента, выполненного методом Монте-Карло, определены оптико-метеорологические условия, в которых возможно обнаружение аэрозольных инверсий сейсмогенного происхождения с помощью орбитального лидара.

Введение

Землетрясения были и остаются наиболее масштабными природными катаклизмами, связанными с массовой гибелью людей и большими разрушениями инфраструктуры. Наиболее известные катастрофические землетрясения: Калифорнийское (1906 г.), Ашхабадское (1948 г.), Спитакское (1988 г.), на Аляске (1964 г.), Иранское (1990 г.), в Пакистане (2003 г.), в Индонезии (2006 г.). По статистике за год происходит 20 землетрясений с магнитудой $M > 7$, а также 100–120 потенциально опасных с $M > 5$ и 300 000 малых землетрясений. Поэтому остро стоит вопрос о поиске новых предвестников землетрясений и создании теории их прогноза. Предвестниками землетрясения принято считать различные физические явления, наблюдаемые за несколько часов или дней до толчка, например вариации геофизических полей, аномальное поведение животных и пр., т.е. те явления, которые позволяют решить основную задачу прогноза: предсказание места, времени и интенсивности сейсмического события. Для решения этой задачи необходимы разработка достоверных методов мониторинга предвестников землетрясения, выяснение их природы, создание адекватных моделей, описывающих эти предвестники, и разработка эффективной стратегии прогноза землетрясений.

1. Состояние проблемы и перспективы ее решения

Исследования последних лет убедительно свидетельствуют о существовании связи между процес-

сами, протекающими в земной литосфере, и возмущениями в атмосфере и ионосфере. Известно, что на различных этапах развития тектонических процессов регистрируются многочисленные аномальные вариации полей и параметров атмосферы и околоземного космического пространства. Анализ особенностей этих вариаций совместно с традиционными методами геофизического прогноза создают основу развития методов краткосрочного прогнозирования землетрясений. Уже несколько десятилетий ведутся интенсивные исследования специфических эффектов сейсмогенной природы, проявляющихся в области ионосферы [1–6, 10, 11]. Аномальные вариации ионосферы, ассоциированные с землетрясениями, регистрируются с помощью различных средств радиофизического мониторинга. Для этих целей используются измерения наземных станций вертикального зондирования ионосферы, а также орбитальные ионозонды, установленные на серии спутников, например, таких, как ISIS-2, AUREOL-3, ALOUETTE, ИНТЕРКОСМОС-19, EOS (Aqua and Terra), ENVISAT, и ряде других космических аппаратов [7–9, 10, 11].

Как показано в [6], сейсмоионосферные предикторы землетрясений проявляются в виде отклонений плотности ионосферной плазмы от невозмущенного состояния и наблюдаются в течение нескольких суток — часов перед землетрясениями с магнитудой $M > 5,0$. Эти вариации имеют в основном амплитуду 15–25%, а в определенные моменты могут достигать 100%. Запуск и развитие спутниковых навигационных систем GPS, GLONASS, создание специализированных проектов (ESPERIA, КОМПАС-2) [10, 11], направленных на предсказание

землетрясений и извержений вулканов, бурное развитие всемирной сети GPS-станций положили начало новой стадии в изучении ионосферных вариаций, наблюдаемых до и после сильных землетрясений.

Однако решение проблемы не может опираться на анализ одного класса ионосферных явлений, поскольку сохраняется конечная вероятность принятия ложного решения. Причина в том, что геомагнитные возмущения, обусловленные солнечной активностью и состоянием межпланетной среды, как правило [10], существенно превышают, а следовательно, маскируют слабые сейсмоионосферные эффекты. И хотя последние обладают рядом феноменологических особенностей [6], строгие количественные критерии принятия решения о возможном землетрясении в настоящее время отсутствуют. Тем не менее настоящее направление исследований считается наиболее перспективным, и в ближайшем будущем на орбиту будет выведена новая группа ионосферных спутников [29], а именно: DEMETER, SICH-1M и TIMED. Предполагается, что установленная на них более совершенная аппаратура позволит осуществить регулярный мониторинг сейсмоионосферных проявлений.

Точность прогноза может быть улучшена благодаря комплексному подходу: путем выявления и анализа альтернативных предикторов землетрясений. Так, со спутников GEOS-1 и GEOS-2 было обнаружено аномальное увеличение интенсивности низкочастотных радиоволн над эпицентрами землетрясений с $M > 5,0$. Появились работы [29], которые указывают на корреляцию вариаций потоков заряженных частиц, захваченных геомагнитным полем, с сейсмической активностью. Недавно предложен новый метод прогноза землетрясений на основе линейного анализа космических изображений сейсмоопасных территорий [34].

В последнее время повысился интерес к возможностям оптических методов дистанционного зондирования аномальных явлений в атмосфере, сопровождающих развитие катастрофических тектонических процессов в литосфере. Здесь определилось несколько перспективных направлений. Прежде всего это исследования, связанные с использованием систематических данных спутниковых измерений ИК-радиации, уходящей с поверхности сейсмоопасных регионов земной поверхности [13–16]. В работах А.А. Трониной [13, 14] продемонстрирована связь тепловых аномалий на земной поверхности и сейсмической активности. В Китае этот метод внедряется в практику реального мониторинга [23]. Неясным остается вопрос о механизме возникновения подобных аномалий [15] и надежности их идентификации, особенно в условиях метеорологической нестабильности атмосферы.

В оптическом диапазоне волн интересные методические результаты получены сотрудниками Абастуманской астрофизической обсерватории [17]. Они обнаружили, что за несколько часов до начала землетрясения в Средней Азии в нижней ионосфере – слой E (85–110 км) – над эпицентром возрастает интенсивность эмиссии ОI в линиях

557,7 и 630,0 нм. В рамках интернациональной программы «Space-US» (Россия – Беларусь) [18] разработан малогабаритный спектральный фотометрический комплекс, предназначенный для регистрации излучения атомарного кислорода в схеме лимбовых измерений с борта МКС. Комплекс включает в себя также модуль измерения спектральной интенсивности гидроксила (ОН) в интервале 830–1040 нм. Вариации свечения отражают характер поведения внутренних гравитационных волн.

Статистика наблюдений последних лет, как наземных [12, 19, 22, 25], так и орбитальных [20, 21], показывает, что развитие землетрясения сопровождается целым комплексом аномальных отклонений оптико-метеорологических параметров в эпицентральных областях: наблюдаются резкие изменения погоды, падает атмосферное давление, возникает низколежащая облачность необычной конфигурации и динамики (один из древнейших предикторов) [22, 28], повышаются температура и влажность приповерхностного слоя атмосферы [20, 22, 25], происходят резкие колебания содержания O_3 [26, 29], выбросы Ra [24, 25, 27] и других малых и парниковых газов (CH_4 , CO_2 , CO , H_2S , SO_2 , HCl). Современные спутниковые системы EOS и ENVISAT способны измерять концентрацию CO и CH_4 в атмосфере, но пока таких опубликованных данных нет. В то же время многоканальный космический модуль SeaWiFS [30] зарегистрировал аномальные аэрозольные образования в процессе развития землетрясения в Юго-Западной Индии (январь 2001 г.) [21]. Наземные контактные измерения [12, 19] подтверждают, что увеличение концентрации минеральных металлосодержащих частиц отмечается за несколько часов до первых разрушительных толчков.

Из дистанционных методов мониторинга указанного спектра оптико-метеорологических параметров атмосферы наибольшими возможностями как по оперативности, так и по пространственному разрешению обладают средства лазерного зондирования [30]. Отдельно следует отметить перспективность лидарного метода для дистанционного контроля уровня приповерхностного содержания радона как одного из важнейших предвестников землетрясения [33].

Самолетные системы лазерного зондирования показали достаточно высокую эффективность при решении ряда задач метеорологии, экологии, физики атмосферы и океана [31, 32]. Развертывание подобных систем на орбитальных станциях и спутниках позволяет значительно расширить возможности мониторинга, придавая ему глобальный и систематический характер. Речь идет об оперативном контроле пространственного поля основных параметров атмосферы, включая облачные поля, высотную структуру аэрозольного и газового состава тропосферы, экологически опасные выбросы локального масштаба и, наконец, возможные предикторы землетрясения. При этом сохраняется роль лидаров самолетного и стационарного базирования как важного инструмента подспутникового контроля.

Методологические аспекты проблемы лазерного зондирования атмосферы из космоса были проанализированы еще в ранних работах [35, 36]. К настоящему времени осуществлена техническая реализация ряда проектов [37, 38]. В частности, в 1995 г. выполнен цикл исследований Российским космическим лидаром БАЛКАН, установленным на орбитальной станции «Мир». Российско-французский лидар ALISSA в составе модуля «Природа» этой же станции выведен на орбиту в мае 1996 г. В сентябре 1994 г. проведен первый достаточно успешный эксперимент по многочастотному лазерному зондированию всей толщи земной атмосферы с борта космического корабля серии «Shuttle» [39]. Этот орбитальный эксперимент сопровождался синхронными сеансами наземного и самолетного лидарного зондирования.

Обнадеживающая результативность первых лидарных космических экспериментов по изучению облачных полей, профилей аэрозольных характеристик и некоторых параметров подстилающей поверхности ставит на следующем этапе задачу введения этого класса космических лидаров в систему мониторинговых наблюдений Земли. Так, в рамках программы Российского космического агентства «Эталон» реализован ряд проектов, ориентированных на создание сети малых специализированных спутников для обнаружения регионов возможного проявления земных катаклизмов по одному классу предвестников. Поскольку важным предвестником землетрясения является повышенная концентрация крупнодисперсной минеральной фракции аэрозоля в пограничном слое атмосферы [12, 19, 21], один из спутников указанной сети, а именно ТЕСТОНИКА-А, предполагалось оснастить многочастотным лидаром, работающим в долговременном автоматическом режиме [40–42]. В качестве альтернативного варианта развивается идея [43] создания многопрофильного энергоемкого спутника, оснащенного сейсмодетекторами различных типов (электрических, магнитных, оптических и т.д.). Все эти подходы требуют априорной проработки в рамках натурального и теоретико-численного моделирования.

2. Экспериментальные исследования флуктуаций электрических и аэрозольных характеристик атмосферы в районах тектонической активности

2.1. Выбор района экспериментальных исследований

Деформация земной коры вызывает изменения флюидных и аэрозольных потоков и активизацию сейсмических процессов. Тектонические аэрозоли в атмосфере являются ядрами конденсации и вызывают образование облаков вдоль разломов, что неоднократно отмечалось на космических снимках [14]. Таким образом, признаком усиления тектони-

ческой активности является увеличение аэрозольного фона, обусловленного появлением в атмосфере аэрозольных частиц, увлекаемых газовым потоком (H_2 , He_2 , CO_2 , CH_4 и т.д.) в атмосферу через приповерхностные микротрещины. Наблюдаются изменения концентрации, спектра размеров, а также химического состава аэрозольных частиц [12, 13, 16, 19]. Обнаружение и измерение динамики концентрации такого аэрозоля можно осуществлять оперативно в режиме реального времени и дистанционно с помощью техники лазерного зондирования. Интересно отметить [44], что интенсивный аэрозольный выброс вулкана Авача на Камчатке в декабре 1990 г. был единственным достоверным предвестником последующего землетрясения, поскольку данные геофизического мониторинга на основе сейсмограмм не дали различимых указаний.

В то же время аэрозольная компонента приводит к изменению электрического поля Земли, которое также может быть индикатором изменчивости тензометрических характеристик земной коры. Выбор электростатических характеристик Земли в качестве возможного признака землетрясения обусловлен также тем, что известна корреляция аномалий геоэлектрического поля с повышением концентрации газов, в первую очередь радона, в подпочвенных слоях и в атмосфере при деформации земной коры в районах очагов землетрясений [46–48]. В работах [20, 24, 29, 48] отмечается, что радоновые и аэрозольные признаки землетрясений совпадают по времени. Кроме того, в присутствии проводящих аэрозольных частиц резко возрастает ионизационная активность радона и, как следствие, многократно увеличивается напряженность электрического поля. Возможные модели кинетики атмосферных газов и частиц в присутствии радиоактивного радона активно обсуждаются в литературе [24, 29].

Исходя из этих предпосылок, в октябре 1999 г. были проведены экспедиционные работы на Таманском полуострове в зоне Бугазского поперечного разлома. Данный район был выбран потому, что он находится в сейсмически активной зоне с развивающимся грязевым вулканизмом, тянущейся от Крыма до Средней Азии, в которой мы проводили исследования [45]. Дегазация земли вдоль и поперек разлома неравномерна, поэтому для выявления наиболее активных площадок на Бугазском разломе был применен микролидар, разработанный в ИКИ РАН для измерения аэрозолей на Марсе [54]. Были установлены площадки, где наблюдалась максимальная активность выброса аэрозолей. В процессе съемки установлено, что на оси разлома и вне его аэрозольные потоки различаются более чем на порядок.

Во время экспедиции проводилось картирование по водороду вдоль и поперек разлома, при этом концентрации водорода в приземном слое равнялись 2,6–3,7 ppm. Это позволило в дополнение к лидарным измерениям уточнить выбор наиболее оптимальной площадки, где и проходили измерения коэффициента аэрозольного рассеяния, напряженности электрического поля и электропроводности

атмосферы. Аналогичные исследования были выполнены в штольне вблизи г. Новороссийска, где ведутся постоянные наблюдения дегазации Земли. Сейсмическая обстановка в Краснодарском крае регистрируется на сейсмостанции «Анапа».

2.2. Анализ экспериментальных результатов

В ходе проведения экспедиционных работ измерялись следующие физические характеристики:

- напряженность электрического поля атмосферы при помощи датчика динамического типа, преобразующего постоянное поле Земли в переменное [46];
- электрическая проводимость атмосферного воздуха, измеряемая по времени разряда сетчатого открытого конденсатора;
- объемный коэффициент аэрозольного рассеяния с помощью малогабаритного датчика аэрозоля, измеряющего рассеянное под углом 45° излучение.

Измерительные приборы подключались к портативной ЭВМ Notebook, которая обеспечивала сбор экспериментальных данных, а также их первичную статистическую обработку. В дальнейшем исследовались временные характеристики измеряемых величин, а для коэффициентов аэрозольного рассеяния и напряженности электрического поля также их амплитудные спектры, получаемые при помощи стандартных подготовительных процедур путем преобразования Фурье [51]. При этом спектральному анализу подвергались два типа временных рядов, первый из которых характеризовался полным отсутствием подземных толчков, а второй включал в себя период времени непосредственно перед землетрясением.

При анализе временных электрических и оптических характеристик атмосферы были выявлены флуктуации сигналов, совпавшие по времени с под-

земными толчками. На рис. 1 представлен временной ход коэффициента аэрозольного рассеяния и напряженности электрического поля за период 19–22 октября 1999 г.

Стрелка указывает время, когда местная сейсмическая станция зафиксировала подземный толчок с магнитудой $M = 4,5$ и эпицентром, расположенным в 450 км от сейсмостанции «Анапа». Звезда соответствует наблюдениям в штольне, когда в 300 м от места измерений был проведен взрыв 500 кг аммонита. Из поведения кривых видно, что за несколько часов перед землетрясением наблюдается существенное увеличение по модулю напряженности электрического поля E до величин порядка 170 В/м. После этого непосредственно перед толчком величина E быстро падает до фоновых значений. Значение коэффициента рассеяния за этот период возросло примерно на 50% и осталось практически на постоянном уровне вплоть до толчка, после чего произошел сброс к прежнему уровню.

Интересно, что сотрясение почвы, вызываемое техногенной причиной (взрывом в карьере), не оказывает существенного влияния на временной ход величины E . В то же время сотрясение почвы вызвало осыпание пыли со стенок и потолка штольни, что привело к увеличению коэффициента аэрозольного рассеяния после взрыва.

Исследование спектральных характеристик флуктуаций коэффициента аэрозольного рассеяния σ_s показало, что они существенно зависят от активности земной коры в период измерений. На рис. 2 приведены спектры плотности мощности флуктуаций амплитуды σ , построенные для «спокойного» периода и в интервал времени, непосредственно предшествующий землетрясению. Анализ данных показывает, что максимальные значения спектров флуктуаций амплитуд приходится на период перед

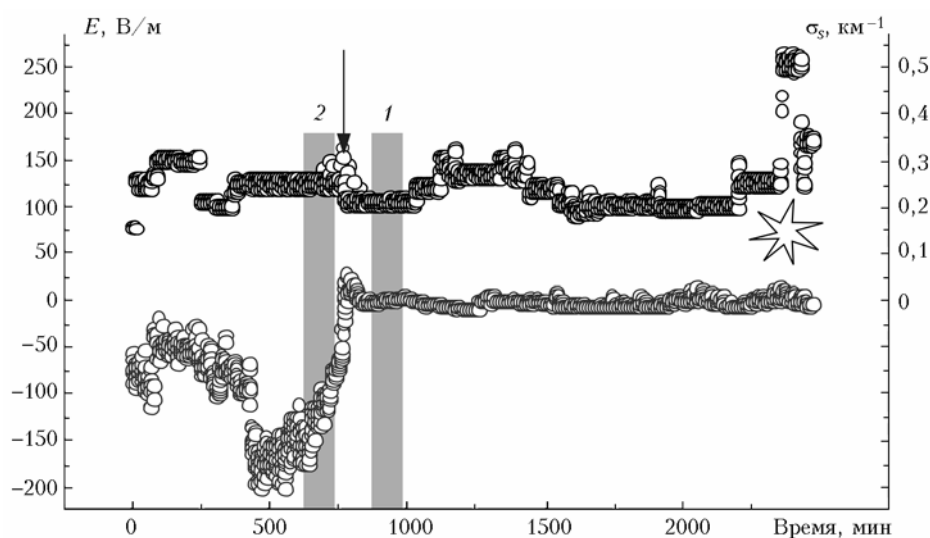


Рис. 1. Временной ход напряженности электрического поля E (нижние кружки) и коэффициента рассеяния σ_s (верхние кружки). Стрелка соответствует моменту землетрясения, звезда — моменту взрыва при измерениях в штольне. 1 — измерения при отсутствии толчков, 2 — непосредственно перед землетрясением

землетрясением, при этом максимумы спектров отличаются более чем в 2 раза. Кроме того, амплитудный спектр флуктуаций σ для активного периода отличается большим диапазоном изменчивости величины $S_\sigma(f)$.

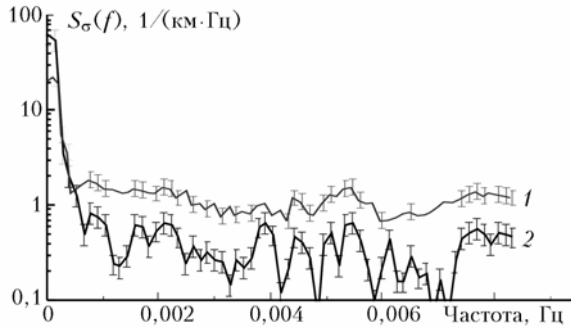


Рис. 2. Амплитудные спектры флуктуаций коэффициента рассеяния σ , в спокойный период (кривая 1) и перед землетрясением (кривая 2). Вертикальные отрезки указывают на доверительный интервал для вероятности 0,9

Спектры флуктуаций напряженности электрического поля $S_E(f)$ также существенно зависят от времени проведения измерений. На рис. 3 приведены спектры флуктуаций амплитуд величины E для периодов «спокойной» земной коры и перед землетрясением.

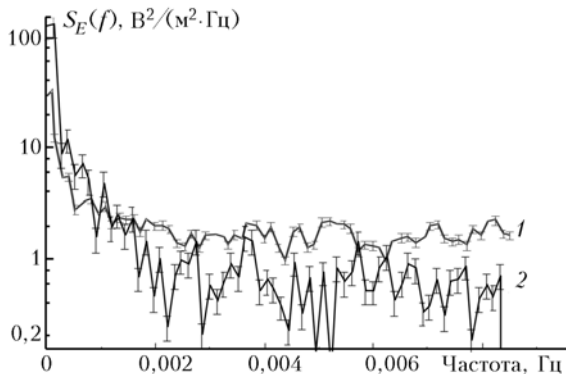


Рис. 3. Амплитудные спектры флуктуаций напряженности E в спокойный период (кривая 1) и перед землетрясением (кривая 2). Вертикальные отрезки указывают на доверительный интервал для вероятности 0,9

Видно, что максимальные значения спектров амплитуд для разных ситуаций отличаются более чем на порядок! Столь значительное отличие показывает, что в формировании структуры электрического поля данного региона весьма значительную роль играют тектонические процессы земной коры. На рис. 4 показан временной ход электрической проводимости атмосферы.

Моментам толчков предшествует увеличение проводимости атмосферы, что можно объяснить увеличением концентрации в воздухе заряженных частиц. Из сравнения рис. 1 и 4 видно, что непосредственно перед толчком увеличиваются как коэффициент рассеяния, так и электрическая проводимость атмосферы, поэтому возникает вопрос

о взаимосвязи аэрозольных и электропроводящих свойств атмосферы. Приблизительно оценить влияние аэрозоля на концентрацию заряженных частиц n можно из следующего уравнения [52]:

$$\frac{dn}{dt} = \nu - \alpha n^2 - \beta Nn,$$

где ν — интенсивность ионообразования; α — коэффициент рекомбинации; β — коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам; N — концентрация аэрозольных частиц. Для равновесного состояния при $dn/dt = 0$ дифференциальное уравнение превращается в уравнение второго порядка и легко решается относительно n . Из решения следует, что влияние аэрозольных частиц на концентрацию ионов существенно при $\beta N \gg \alpha \nu$.

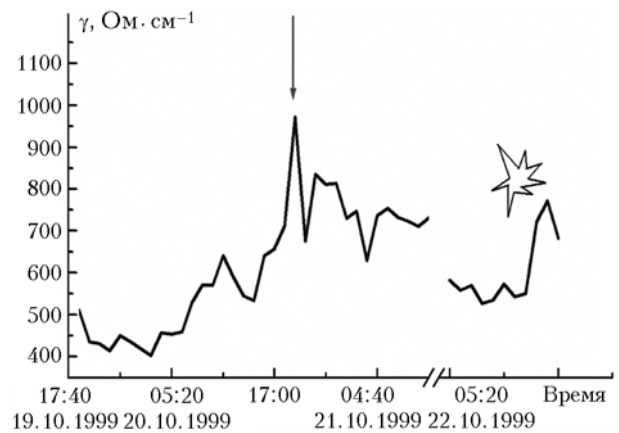


Рис. 4. Временной ход проводимости атмосферного воздуха γ с 19 по 22 октября. Стрелка соответствует моменту толчка, звезда — взрыву при измерениях в штольне

Данное условие в приземном слое атмосферы выполняется всегда, поэтому учет аэрозольного компонента необходим при расчетах электростатических характеристик атмосферы. Кроме того, из анализа статистических данных многолетних измерений электрических характеристик атмосферы следует, что со временем электропроводность атмосферы медленно падает, что связывается с увеличением концентрации аэрозоля антропогенного происхождения [53]. Так как в нашем случае наблюдается обратный процесс, можно сделать вывод, что в атмосфере выделяется значительное количество ионов.

3. Численный эксперимент по зондированию аэрозольных инверсий в пограничном слое атмосферы орбитальным лидаром

Далее приводятся результаты численного эксперимента, направленного на исследование потенциальных возможностей орбитального лидара для целей обнаружения и идентификации аэрозольных инверсий сейсмогенного происхождения в пограничном слое атмосферы. Расчеты выполнены путем решения нестационарного уравнения переноса методом Монте-Карло, позволяющего получать оценки

сигналов с разделением по кратностям взаимодействия и углам прихода фотонов на детектор. Это дает основу для детального анализа структуры локационного сигнала в зависимости от оптико-геометрических условий эксперимента.

Решение уравнения переноса находится для начальных и граничных условий, соответствующих функциональной схеме космического лидара ТЕСТОНІСА-А [40–42]. Предполагается, что лидар удален от поверхности Земли на расстояние H_0 , а источник излучает изотропно в конусе $2\pi(1 - \cos\varphi_i)$, где φ_i – угол расходимости. Отраженный сигнал регистрируется приемником в угловом конусе $2\pi(1 - \cos\varphi_d)$, ограниченном апертурой детектора φ_d . Основные технические характеристики лидара, необходимые для выполнения расчетных оценок, приведены ниже.

Высота орбиты H_0 , км	400–600
Рабочие длины волн λ_i , мкм	1,064; 0,532; 0,355
Расходимость луча φ_i , мрад	1,0; 0,4; 0,4
Длительность импульса τ_i , нс	27, 27, 30
Апертура детектора φ_d , мрад	1–20
Пространственное разрешение Δh , км	0,1–1

Значительный диапазон угла поля зрения (до 20 мрад) обусловлен предполагаемым использованием многосекционного разворачиваемого в космосе приемного зеркала [42].

Отметим только, что используемые математические алгоритмы [55, 56] позволяют рассчитать пространственно-временную трансформацию оптического сигнала в условиях, максимально приближенных к реальным. Это подразумевает возможность учета многокомпонентного состава атмосферы до высот $h = 90$ км в приближении подробной слоисто-неоднородной модели. Оптические свойства рассеивающей среды описываются индикатрисой рассеяния $g(\vartheta)$, коэффициентом ослабления $\sigma_{ext}(h)$, вероятностью выживания кванта $\Lambda(h)$. В расчетах эти характеристики заданы для требуемого набора длин волн в соответствии с фоновой моделью [57]. Она основана на осреднении многочисленных ста-

тистических данных о концентрации и микрофизических свойствах атмосферного аэрозоля.

При извлечении информации из результатов лазерного зондирования рассеивающей среды необходимо иметь достаточно полное представление прежде всего о структуре локационного сигнала, зависящего как от вариаций оптических свойств среды, так и геометрических условий приемопередающей системы. Кроме того, необходима оценка ожидаемого уровня помехи многократно рассеянного излучения в различных экстремальных, с точки зрения оптической погоды, ситуациях. В данном сообщении мы представляем результаты расчетов, касающиеся этих основных, при лидарном зондировании, вопросов. Все нижеприведенные оценки выполнены для лидара, расположенного на высоте $H_0 = 400$ км относительно поверхности Земли.

Для удобства масштабирования временные развертки относительной скалярной интенсивности отраженного сигнала приведены на рис. 5 для ограниченных интервалов высот, начиная от поверхности Земли ($h = 0,0$ км). На рис. 5, *а* показаны вертикальные профили коэффициентов ослабления, включающих в себя молекулярное рассеяние и поглощение озоном, а на рис. 5, *б, в* профили сигналов обратного рассеяния $P(h)$ для рабочих длин волн лазера на гранате.

Результаты показывают, что возможны проблемы с регистрацией сигнала ИК-диапазона в условиях чистой безоблачной атмосферы. Структура сигнала $P(h)$ представлена на рис. 5, *в* для $\lambda = 0,35$ и 1,06 мкм. Результаты расчетов различных функционалов приведены на рис. 5 в зависимости от величины h , которая эквивалентна накопленному пробегу или времени пребывания фотона в заданном угловом интервале рассеивающей среды. При этом $h = ct/2$, где c – скорость распространения света. Гистограммы функционалов построены при осреднении в интервале стробирования $\Delta h = 0,5$ км до высоты 3 км над поверхностью Земли и далее с интервалом $\Delta h = 0,1$ км.

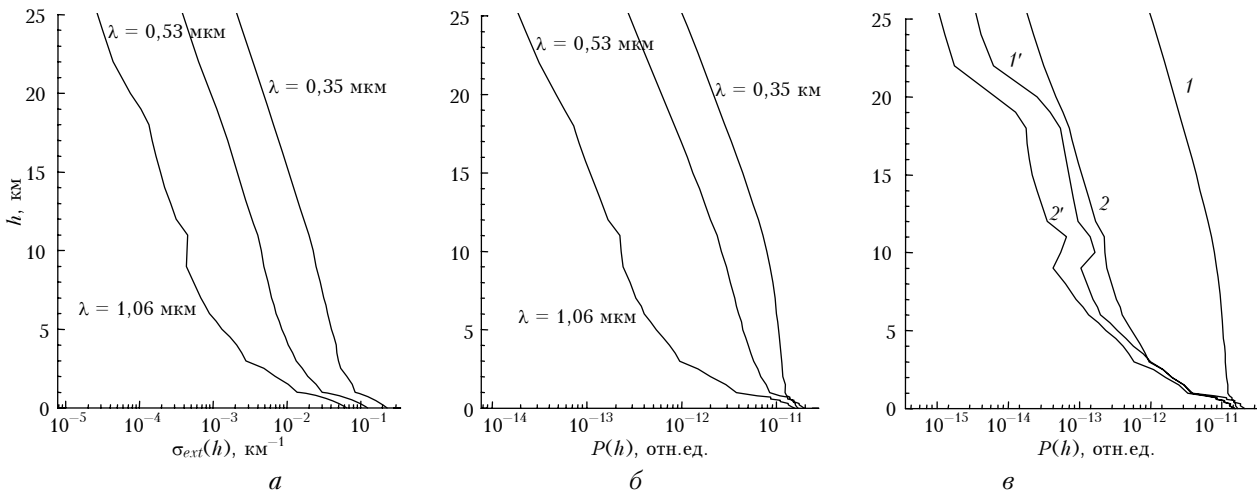


Рис. 5. Высотные профили коэффициента ослабления $\sigma_{ext}(h)$ для используемых длин волн лазерного зондирования (*а*); оценки отраженного сигнала $P(h)$ для лидара с углом приема $\varphi_d = 10$ мрад (*б*); кривые 1', 2' – аэрозольные составляющие $P(h)$ сигнала на длинах волн 0,35 и 1,06 мкм соответственно; 1, 2 – полный сигнал (*в*)

При фоновом состоянии аэрозольной атмосферы отраженный сигнал $P(h)$ на $\lambda = 0,35$ мкм практически полностью определяется молекулярно рассеянным излучением. Аэрозольная составляющая сигнала становится сопоставимой с молекулярной лишь в нижнем слое тропосферы до высоты примерно 0,2 км. С увеличением длины волны до 1,06 мкм аэрозольная составляющая сигнала становится определяющей в уровне $P(h)$, начиная с расстояния 4–5 км над поверхностью Земли.

Одной из целей космического лидарного комплекса TECTONICA-A является обнаружение и прогнозирование естественных и антропогенных катаклизмов, сопровождающихся экстремальным выбросом аэрозоля в нижнем слое тропосферы. В частности, из измерений [12, 19], выполненных в Гвадалахаре (Мексика) в период землетрясения 9 октября 1995 г., следует, что за несколько часов до первого толчка в пограничном слое атмосферы заметно (в 1,5–2 раза) увеличивается счетная концентрация крупнодисперсной фракции аэрозольных частиц. В составе частиц отмечается повышенное содержание Si, Ca, Fe, что характерно для природы минералов, эмитируемых с поверхности, а возможно, и из глубины почвы.

Таблица [19] отражает динамику изменения спектра частиц по размерам в приповерхностном слое атмосферы в процессе развития землетрясения в Гвадалахаре. Приводимые цифры показывают относительные значения концентрации частиц различного размера $\Delta N d_i / \overline{\Delta N d_i}$ в процентах, нормализованные относительно средней концентрации, измеренной ранее в стабильных метеоусловиях. Обращает на себя внимание резкое, практически до нуля, уменьшение концентрации мелкодисперсной фракции частиц диаметром $0,4 \leq d \leq 0,5$ мкм. После первого толчка катастрофически возрастает концентрация крупнодисперсной фракции минеральных частиц с $d \geq 1,0$ мкм.

d_i , мкм	8 октября				9 октября		
	21:00	22:00	23:00	24:00	9:20	10:10	11:00
>10	73	81	88	136	579	684	263
10–7	100	139	65	125	544	596	772
7–4	67	144	152	122	237	204	51
4–2	64	102	140	131	281	324	234
2–1,5	64	136	153	137	129	150	296
1,5–1,0	76	157	166	126	118	495	75
1,0–0,9	97	145	95	102	101	118	63
0,9–0,8	68	143	82	229	63	251	190
0,8–0,7	149	193	163	90	133	170	174
0,7–0,6	101	143	132	106	100	96	80
0,6–0,5	120	71	103	99	77	88	60
0,5–0,4	90	36	89	42	0	0	0
0,4	108	105	123	98	92	115	93

Результаты [12, 19] по своему уникальны, представляют несомненный интерес и были использованы нами в численном эксперименте. Трансфор-

мированные спектры аэрозольных частиц позволили пересчитать необходимые параметры аэрозольного светорассеяния. Мы предположили, что область повышенного замутнения тропосферы достигает высоты $h = 3,5$ км. Соответствующие профили коэффициентов ослабления показаны на рис 6, а. На рис. 6, б приведены результаты расчетов сигналов обратного рассеяния $P(h)$.

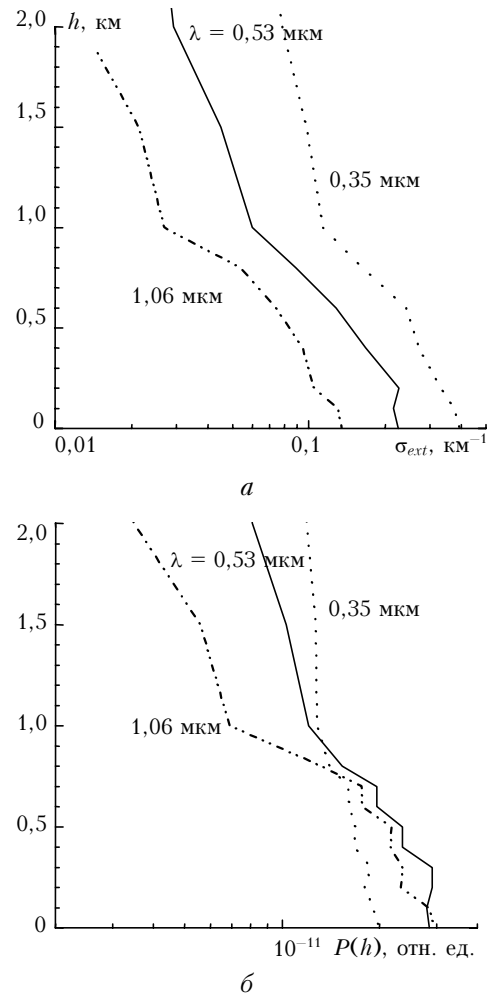


Рис. 6. Результаты численного эксперимента по зондированию пограничного слоя атмосферы при повышенной концентрации аэрозольных частиц: а – модельные профили коэффициентов ослабления $\sigma(h)$; б – высотные профили сигнала лидара $P(h)$ для заданных длин волн. Апертура детектора $\varphi_d = 8,8$ мрад

Обращает на себя внимание тот факт, что, в отличие от примера незамутненной атмосферы (см. рис. 5, б), изменился не только уровень локационных сигналов, но и их соотношение по спектру длин волн. Следует ожидать, и это подтверждают результаты расчетов, что более уверенно будут идентифицироваться локализованные по высоте слои повышенной замутненности. Характерно, что подобные аэрозольные слои с оптической толщиной, достигающей величины $\tau = 0,3$, регистрировались космическим модулем SeaWiFS в период

мощного землетрясения в Гуджарате 26 января 2001 г. [21]. На рис. 7,а подобная ситуация моделируется десятикратным увеличением коэффициента аэрозольного ослабления в слое 1 км на высоте $h = 1,0$ км. Результаты соответствующих расчетов показаны на рис. 7,б. Характерно, что резко возрастает эффективность инфракрасного канала зондирования. Это приводит к тому, что спектральное поведение локационных сигналов меняется на альтернативное (рис. 7,в). Такой эффект, на наш взгляд, может служить качественным критерием обнаружения аномальных аэрозольных слоев терригенного происхождения.

В данной ситуации, однако, возникает вопрос распознавания сигналов, отраженных облачностью нижнего яруса и аэрозольными инверсиями. Облачность отличается, как правило, достаточно высокой оптической плотностью. Сравнительные результаты расчетов сигнала $P(h)$, отраженного облаком, туманом и аэрозольной инверсией, показаны на рис. 7,г. Коэффициент ослабления $\sigma(h)$ для облака и тумана был принят равным 5 км^{-1} , т.е. задано одно из минимально возможных значений для жидкокапельных образований.

Расчеты показали, что амплитуда локационного сигнала $P(h)$, отраженного облаком или туманом, как минимум на два порядка выше, чем от аэрозольной инверсии, даже при увеличении ее оптической плотности в два-три раза. Однако спектральная зависимость сигнала $P(h)$, отраженного жидкокапельным аэрозолем, практически нейтральна и не имеет аномальных особенностей. Это обстоятельство объясняется слабым изменением индикатрисы рассеяния $g(\pi)$ облачного аэрозоля в заданном спектральном интервале, а кроме того, при космической схеме зондирования, как было показано в [55, 58], форма индикатрисы рассеяния не играет определяющей роли в формировании локационного сигнала.

Следует также ожидать, что поляризационные характеристики сигнала обратного рассеяния от жидкокапельных и минеральных образований будут заметно отличаться. Определяющим критерием идентификации аэрозоля сейсмогенного и вулканического происхождения может служить аномальный характер спектра частиц по размерам [19]. Однако для космических схем зондирования этот вопрос требует дополнительного изучения.

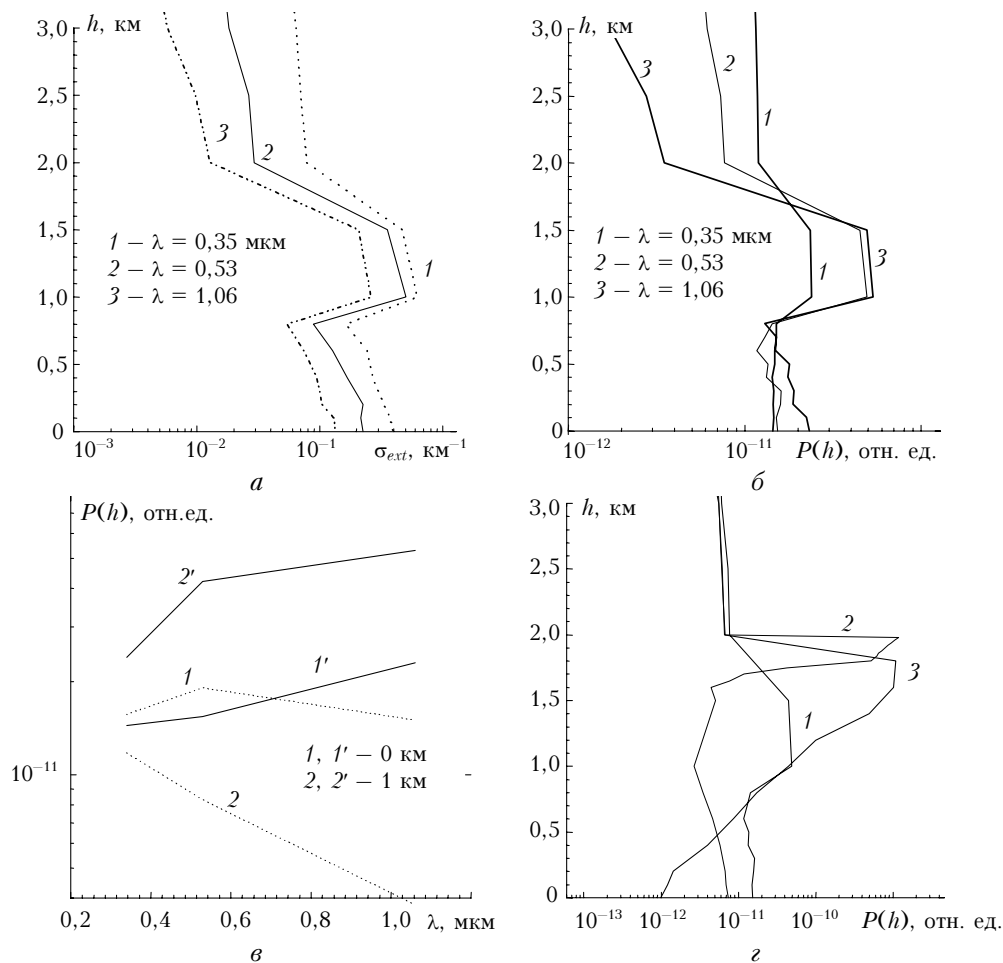


Рис. 7. Результаты зондирования аэрозольной инверсии в приземной атмосфере: а – модельные профили $\sigma(h)$; б – высотные профили $P(h)$; в – спектральное поведение сигнала лидара от двух участков высот: 2, 2' – в зоне инверсии и 1, 1' – вне ее; г – сопоставление сигналов, отраженных аэрозольной инверсией (1), облаком (2) толщиной $\Delta h = 0,2$ км и слоем тумана (3) с $\Delta h = 1$ км. Расчеты приведены для апертуры $\varphi_d = 8,8$ мрад

Заключение

Измерения напряженности электрического поля показали, что за несколько часов до землетрясения величина E начинает возрастать по абсолютному значению, а непосредственно перед толчком уменьшается до фоновых значений. Коэффициент аэрозольного рассеяния перед землетрясением увеличивается в 1,3–1,5 раза, а сразу после начала землетрясения начинает спадать. Форма и максимальные значения амплитудных спектров зависят от величины временного интервала между периодом измерений и моментом толчка. Особенно сильные различия наблюдаются для спектров флуктуаций величины напряженности электрического поля E . Из полученных данных следует, что аэрозоль существенно влияет на электрические характеристики атмосферы. Частотные характеристики флуктуаций напряженности электрического поля и коэффициента аэрозольного рассеяния попадают в диапазон частот собственных колебаний Земли.

Методом Монте-Карло выполнены расчеты сигналов многочастотного орбитального лидара TECTONIKA-A, предназначенного для обнаружения аэрозольных инверсий в пограничном слое атмосферы. Оценки получены для длин волн $\lambda = 1,06, 0,53$ и $0,35$ мкм (для излучения трех гармоник лазера YAG:Nd-лазера) и граничных условий, отражающих реальные особенности приемопередающей системы лидара. Базовая оптическая модель соответствовала условиям фонового состояния в допущении стратифицированной неоднородности. Модель допускает включение аэрозольных инверсий любой природы, естественной и антропогенной. Полученные результаты позволяют судить о динамическом диапазоне сигнала в заданном спектральном интервале для различных оптических ситуаций, в том числе в условиях аэрозольных выбросов тектонической природы. Предложены качественные критерии идентификации подобных выбросов по спектральному поведению отраженных сигналов.

1. *Davies E., Baker D.M.* Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. N 9. P. 2251–2253.
2. *Leonard R.S. and Barnes R.A.* Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. P. 1250–1253.
3. *Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А.* Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
4. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* / Ed. by M. Hayakawa, Tokyo: Terra Scientific Publ. Comp., 1999. 996 p.
5. *Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов* / Под ред. В.Н. Страхова. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 176 с.
6. *Pulinets S.A., Boyarchuk K.* Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 315 p.
7. *Larkina V.I., Migulin V.V., Molchanov O.A., Kharikov I.P., Inchin A.S., Schvetcova V.B.* Some statistical resultant on very low frequency radio wave emis-

- sions in the upper ionosphere over earthquake zone // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1989. V. 57. P. 100.
8. *Chmyrev V.M., Isaev N.S., Bilichenko S.V.* Observations by space borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over the earthquake centre // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1989. V. 57. P. 110.
9. *Molchanov O.A., Hayakawa M.* Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // *J. Geophys. Res.* A. 2004. V. 103. N 8. P. 17489–17504.
10. *Krankowski A., Zakharenkova I.E. and Shagimuratov I.I.* Response of the ionosphere to the Baltic Sea earthquake of 21 September 2004 // *Acta Geophys. Pol.* 2006. V. 54. N 1. P. 90–101.
11. *Захаренкова И.Е., Шагимуратов И.И., Кранковски А., Лаговский А.Ф.* Ионосферные аномалии, наблюдаемые в GPS TEC измерениях перед землетрясением в Греции 8 января 2006 г. (M6.8) // *Электрон. ж. «Исследовано в России».* 2006. Т. 110. С. 1047–1055. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/110.pdf>
12. *Иевлев Л.С., Давыдова В.И., Варгас О.А., Мартинес А.* Изменчивость характеристик аэрозолей, озона и сернистого газа в приземном слое при землетрясении в западной Мексике // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11. № 5. С. 490–495.
13. *Tronin A.A.* Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in China // *Int. J. Remote Sens.* 2000. V. 21. N 6. P. 3169–3177.
14. *Tronin A.A.* Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in Japan and China // *J. Geodynamics.* 2002. V. 33. P. 519–534.
15. *Ouzounov D., Bryant N., Logan T., Pulinets S., Taylor P.* Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquake in 1999–2003 // *Phys. and Chem. of the Earth.* 2006. V. 31. P. 154–156.
16. *Choudhury S., Dasgupta S., Saraf A.K.* Remote sensing observations of preearthquake thermal anomalies in Iran // *Int. J. Remote Sens.* 2006. V. 27. N 20. P. 4381–4396.
17. *Фишкова Л.М., Торошелидзе Т.И.* Полярные сияния и свечения ночного неба. М.: Наука, 1989. № 33. С. 17–23.
18. <http://www.isprs.org/publication/related/ISPRS/html/papers/526.pdf>
19. *Kondratyev K.Ya., Ievlev L.S., Krapivin V.F., Vaortsov C.A.* Atmospheric Aerosol Properties. Chichester UK: Springer Praxis Publ., 2006. 622 p.
20. *Dey S., Sarkar S., Singh R.P.* Anomalous changes in column water vapor after Gujarat earthquake // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. N 3. P. 274–278.
21. *Okada Y., Mukai S., Singh R.P.* Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001 // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. N 3. P. 254–258.
22. *Shou Z., Harrington D.* Earthquake Vapor, A reliable precursor // *Geophys. Res. Abstr.* 2005. V. 7. P. 02175.
23. *Quang Zuji, Du Le-Tian.* Earth degassing, forest fire and seismic activities // *Earth Sci. Front.* 2001. V. 8. N 2. P. 235–345.
24. *Liperovsky V.A., Meister C.V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F.* On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquake // *Natur. Hazards and Earth System Sci.* 2005. V. 5. P. 783–789.
25. *Dunajacka M.A., Pulinets S.A.* Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquake in Mexico // *Atmosfera.* 2005. V. 18. N 4. P. 235–247.

26. Ласуков В.В. Озонный, перколяционный и аэрозольный механизмы электромагнитного предвестника землетрясений // Изв. вузов. Физ. 2000. № 2. С. 69–75.
27. Pulnits S. Ionospheric precursors of earthquakes: Recent advances in theory and practical applications // Technol. Abber. Optimigation. 2004. V. 15. N 3. P. 413–435.
28. Морозова Л.И. О современных тектонических процессах Туранской плиты и ее горного обрамления (по динамике линейных облачных аномалий над разломами) // Изв. РАН. Физ. Землн. 1997. № 5. С. 65–67.
29. Seismo-electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling / Ed. by M. Hayakawa. Tokyo: TERRAPUB, 2002. 477 p.
30. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеонздат, 1990. 319 с.
31. Renger W., Kieme C., Schreiber H.-G., Wirth M., Moerl P. Airborne backscatter lidar measurements at 3 wavelengths during ELITE / Final Results Workshop Proc. (IROE-CNR, Florence, Italy). 1995. P. 15–19.
32. Шаманаев В.С. Применение самолетного лидара для зондирования морских акваторий // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 165–168.
33. Parvin P., Davoud-Abadi G.R., Kariminezhad H. Radon monitoring for earthquake prediction using hybrid UV lidar-Prosvich system // 23-th Int. Laser Radar Conf. Proc. July 24–28. Nara, Japan. 2006. P. 245–247.
34. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линейных элементов // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 3. С. 37–52.
35. Zuev V.E., Krekov G.M., Naats I.E. Determination of aerosol parameters of the atmosphere by laser sounding from space // Acta astronaut. 1974. V. 1. P. 93–103.
36. Лазерное зондирование атмосферы из космоса / Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеонздат, 1988. 213 с.
37. Balin Y.S., Burkov V.V., Znamenskii I.V. Spaceborne aerosol lidar «Balkan-1» // 15th Int. laser radar conf. Abstract. July 23–27, 1990. Tomsk, USSR. P. 12–13.
38. McCormick M.P., Winker D.M., Browell E.V. Scientific investigations planned for the lidar in-space technology experiment (LITE) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1993. V. 74. P. 205–214.
39. Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В. Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром БАЛКАН // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 333–352.
40. Matvienko G.G., Kokhanenko G.P., Shamanaev V.S., Alekseev V.A. Project of the spaceborne lidar TECTONICA-A // Int. Symp. Remote Sens. Conf. Abstract. Barcelona, 1998. P. 37–38.
41. Matvienko G.G., Krekov G.M., Alekseev V.A., Polushkovskii Ju., Chernjavskii G.M. Simulation of the multiwavelength satellite lidar for detection of aerosol inversions in the lower atmosphere // 36th Sci. Assembly of COSPAR: Abstract. Beijing, China, 16–23 July, 2006. P. 147.
42. Крекова М.М., Матвиенко Г.Г. Моделирование работы многочастотного лидара «Тектоника-А» // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 8. С. 729–736.
43. <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/1-25.pdf>
44. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Муравьев Я.Д. Аэрозольный предвестник извержения Авачинского вулкана в январе 1991 // Докл. РАН. 1995. Т. 345. № 5. С. 667–670.
45. Alekseev V.A., Alekseeva N.G. Investigation of metal transfer in the biosphere during gaseous emission in zones of tectonic activity using methods of nuclear physics // Nucl. Geophys. 1992. V. 6. N 1. P. 99–110.
46. Донченко В.А. Электрооптические эффекты при распространении оптического излучения в аэрозольной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 1. С. 46–54.
47. Andreson R.V., Larson R.E. Atmospheric electric and radon profiles over a closed basin and open ocean // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. N 24. P. 3432–3435.
48. Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction // Geophys. Res. Lett. 1976. V. 3. N 3. P. 185–188.
49. Alekseev V.A., Alekseeva N.G., Ichankuliev J. On relation between fluxes of metals in waters and radon in Turkmenistan region of seismic activity // Radiat. Measurement. 1995. V. 25. N 1–4. P. 637–639.
50. Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction // Geophys. Res. Lett. 1976. V. 3. N 3. P. 185–188.
51. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
52. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеонздат, 1973. 384 с.
53. Шварц Л.М., Огуряева Л.В. Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорол. и гидрол. 1987. № 7. С. 59–64.
54. Алексеев В.А., Ляш А. Первый опыт дистанционного зондирования разломов с помощью микролидара // Тр. 2-й Междунар. конф. «Малые спутники, новые технологии, микроминиатюризация». Королев, 1999. С. 1–15.
55. Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В. Оценка сигналов орбитального лидара при зондировании слоистых облаков // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 6. С. 77–83.
56. Креков Г.М., Кавьянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 173 с.
57. Зув В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеонздат, 1986. 256 с.
58. Креков Г.М., Крекова М.М. Структура сигнала орбитального лидара, отраженного верхней кромкой облаков // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 1. С. 46–54.

G.G. Matvienko, V.A. Alekseev, A.I. Grishin, G.M. Krekov, M.M. Krekova. Study of electric and aerosol characteristic fluctuations in atmosphere as predictors of tectonic activity.

Results of complex investigations of fluctuations of electric and aerosol characteristics of the atmosphere as a predictor of the tectonic activity of the Earth's crust are presented. Experimental measurements were conducted near the Bugaz break at the Taman peninsula. It is shown that the absolute values of the intensity of the electric field E and the aerosol coefficient σ_s begin to increase several hours before the earthquake and decrease to the background values immediately after the quake. The shape and maxima of the amplitude spectra of E and σ_s depend on the magnitude of time interval between the measurement period and the moment of the tectonic disturbance. The obtained data show that aerosol significantly affects the electric characteristics of the atmosphere. Optical-meteorological conditions, in which the aerosol inversions of the seismogenic origin can be found with the help of orbital lidar, were determined in the numerical Monte-Carlo experiment.