

УДК: 551.515.9; 550.343

DOI: [10.46698/VNC.2020.29.41.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.29.41.004)

Оригинальная статья

Облачные аномалии и землетрясения

Л. И. Морозова¹, А. В. Николаев², С. А. Пулинец³

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; e-mail: nefgeo@yandex.ru

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10;

³Институт космических исследований РАН, Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, e-mail: pulse1549@gmail.com

Статья поступила: 16.07.2020, доработана: 19.08.2020, одобрена в печать: 21.08.2020

Резюме: Актуальность работы. В работе делается попытка обобщить результаты наблюдений еще до конца не понятого явления, обычно называемого «линейные облачные аномалии» (ЛОА), наблюдаемого над областями подготовки сильных землетрясений или интенсификации тектонической активности. В англоязычной литературе можно найти более лаконичное название «earthquakeclouds». Несмотря на достаточно богатую литературу по этому вопросу, до сих пор остается не выясненной физическая природа ЛОА. **Цель работы.** Именно выяснения физического механизма формирования ЛОА перед землетрясениями приставляет собой наиболее актуальную задачу. В данной работе мы делаем шаг вперед в данном направлении, потому что основной целью нашего исследования является поиск источников формирования ЛОА. **Методы исследования.** Нами получены экспериментальные доказательства, что ЛОА всех типов имеют зародышевые структуры в нижней атмосфере на уровне порядка 100 м от поверхности Земли, что доказывает связь генезиса ЛОА с процессами, инициируемыми в земной коре. Источником информации, используемой для проверки процессов формирования ЛОА, являются метеорологические данные, получаемые из ассимилятивной модели GEOSFP, получаемые вблизи поверхности земли. **Результаты работы.** Сделана попытка проследить генезис ЛОА от поверхности земли до уровня сформировавшейся облачной структуры, и предложен физический механизм генерации ЛОА, в том числе поддержания их геометрической линейности в условиях турбулентной атмосферы. Данная работа была задумана совместно с ушедшим от нас А. В. Николаевым, мы постараемся включить в работу всё, что обсуждалось с ним при её подготовке, в том числе с учетом его принципиального мнения, что «неясность физических принципов не может быть причиной недоверия к экспериментальным результатам».

Ключевые слова: линейные облачные аномалии, землетрясение, облачная гряда, прогноз землетрясений.

Для цитирования: Морозова Л. И., Николаев А. В., Пулинец С. А. Облачные аномалии и землетрясения. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 57 – 78. DOI: 10.46698/VNC.2020.29.41.004.

DOI: [10.46698/VNC.2020.29.41.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.29.41.004)

Original paper

Cloud anomalies and earthquakes

L. I. Morozova¹, [A. V. Nikolaev²](#), S. A. Pulinets³

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 3 Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation;

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (IPE RAS), 10/1 Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: nefgeo@yandex.ru

³Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), 84/32 Profsoyuznaya Str, Moscow 117997, Russian Federation, e-mail: pulse1549@gmail.com

Received: 16.07.2020, revised: 19.08.2020, accepted: 21.08.2020

Abstract: Relevance. An attempt is made in present paper to generalize the results of observations of the not yet fully understood phenomenon, usually called “linear cloud anomalies” (LCA), observed over the areas of impending strong earthquakes or intensification of tectonic activity. In the English-language literature, you can find a more concise name “earthquake clouds”. Despite the fairly rich literature on this issue, the physical nature of LCA remains unclear. **Aim.** It is the identification of the physical mechanism of the formation of LCA before earthquakes that is the most urgent problem. In this work, we take a step forward in this direction, because the main aim of our study is to find the sources for the formation of LCA. **Methods.** We have obtained experimental evidence that LCA of all types have embryonic structures in the lower atmosphere at a level of about 100 m from the Earth’s surface, which proves the connection between the LCA genesis and the processes initiated in the earth’s crust. The source of information used to verify the formation of LCA is the meteorological data obtained near the earth’s surface from the assimilative model GEOS FP. **Results.** An attempt is made to trace the genesis of LCA from the earth’s surface to the level of the formed cloud structure, and a physical mechanism for the generation of LCA is proposed, including maintaining their geometric linearity under conditions of a turbulent atmosphere. This work was conceived together with A. V. Nikolaev, we will try to include in the work everything that was discussed with him during its preparation, including his principled opinion that “the lack of clarity of physical principles cannot be the reason for distrust of experimental results”.

Keywords: linear cloud anomalies, earthquake, cloud bank, earthquake prediction.

For citation: Morozova L.I., Nikolaev A.V., Pulinets S.A. Cloud anomalies and earthquakes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (3): 57 – 78. DOI: 10.46698/VNC.2020.29.41.004.

Введение

Линейные облачные аномалии наблюдались и до космической эры – долгоживущие гряды облаков, не сдуваемые воздушным потоком – эффект Шлюмберже, обнаруженный им в Альпах в начале 20-го века и русскими геологами И. В. и Д. И. Мушкетовыми [1935] в Тянь-Шане в 30-х годах XX века. Существовавшая длительное время дифференциация наук о Земле не способствовала изучению взаимодействия оболочек Земли-атмосферы, гидросферы и литосферы, хотя одна из проблем – газовое дыхание Земли – была поставлена В. И. Вернадским еще в 1912 г. [Вернадский, 1912]. Давно замеченные различные виды линейных облачных аномалий (ЛЮА) являются результатом взаимодействия трех сфер Земли: лито-, гидро- и атмосферы.

С началом космической эры геологи стали использовать спутниковые снимки. П. В. Флоренский [1987] связывал облачные гряды на снимках с залежами углеводородов. Впервые линейно протяженные облачные аномалии на спутниковых снимках были использованы при картировании разломов шельфовых зон континентов и Каспийского моря [Кобец, 1976; Еременко, Каттерфельд, 1978; Ежов, Ищенко, 1983; Авенариус и др., 1985].

На возможность использования различных проявлений взаимодействия геосфер в качестве краткосрочных предвестников землетрясений впервые указал Б. В. Ежов [1988].

Спутниковые метеорологические снимки Земли являются носителями информации о протекающих одновременно в её оболочках процессах, имеющих различную динамику. Линейные облачные аномалии – облачные линеаменты, возникающие над линейными геофизическими аномалиями в земной коре, выражены на снимках в виде облачной гряды или, наоборот, узкой темной полосы – каньона (безоблачный коридор в облачном массиве), либо резких прямолинейных границ на части периметра облачного поля, надвигающегося на разлом. ЛОА является следствием активизации находящегося под ней участка разлома. После исчезновения импульса геофизического поля облачность над этим участком приходит в нормальное состояние в соответствии с циркуляцией атмосферы.

Полигоном для спутникового мониторинга служит зона радиовидимости спутникового центра, площадь которой на 3 порядка превышает площадь наземного полигона. На мелкомасштабных снимках (например, на изображениях с геостационарных спутников) отражается территория, охватывающая несколько тектонических плит, что позволяет следить за их взаимодействием. Метеосейсмический анализ снимков с рою ЛОА выявляет истинные размеры территорий, охваченных сейсмическим процессом. Поскольку облачные поля являются как бы экраном, на который проецируются активные в данный момент разломы, то по серии последовательных снимков можно проследить распространение возмущения в земной коре. По превышению количества ЛОА над среднемесячными фоновыми значениями определяют степень сейсмической опасности.

Анализ ЛОА в результате дешифрирования спутниковых снимков осуществляется в реальном времени в отличие от других предвестников, выявленных геолого-геофизическими контактными методами. Вследствие визуализации облаками геофизической аномалии в земной коре сейсмоактивный регион на мелкомасштабном снимке выявляется оперативно по мере поступления информации со спутников. Такие снимки охватывают большие территории, позволяя оценить площадь, занятую рою ЛОА.

Спутниковый мониторинг облачных аномалий позволяет оперативно обнаруживать регион вероятного землетрясения. Мониторинг ЛОА должен осуществляться специалистами по спутниковой метеорологии центров Росгидромета, анализирующими атмосферные процессы с характерными конфигурациями облачных полей для каждого сейсмически активного региона Земли.

По мнению В. И. Уломова, «в недалёком будущем по аналогии с метеорологией окажется возможным широкомасштабный прогноз сейсмической погоды, благодаря регулярному составлению специальных синоптических карт, характеризующих направленность развития сейсмогеодинамических процессов в крупных регионах на трансрегиональном и глобальном уровнях» [Уломов, 1998].

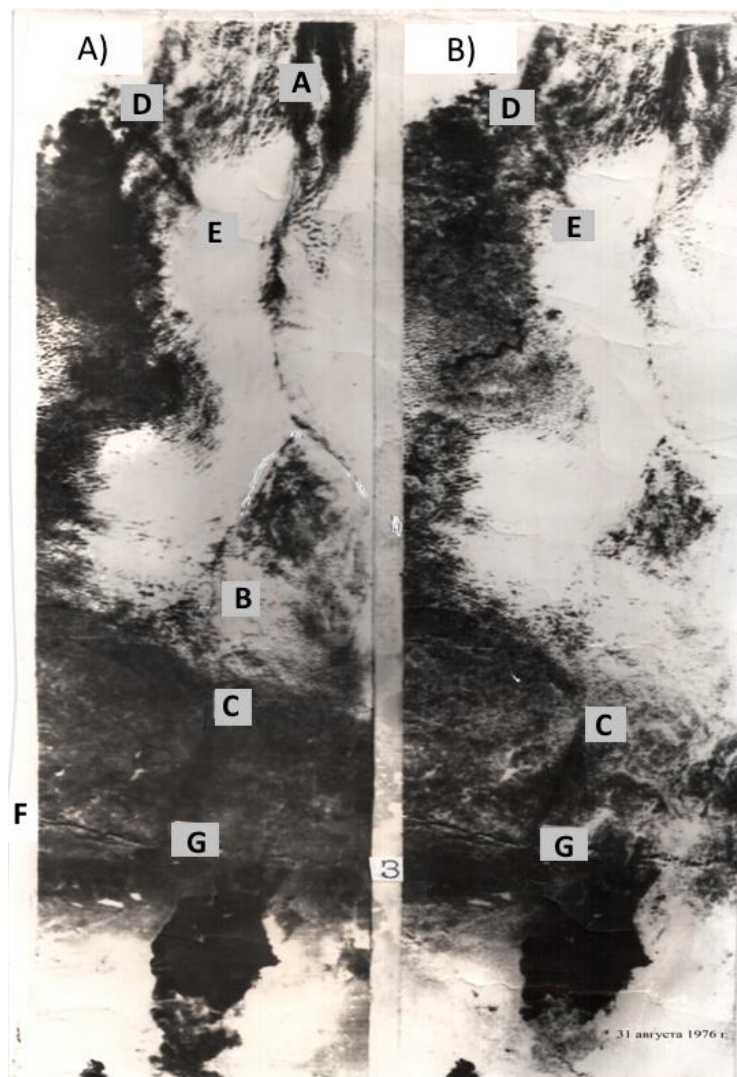


Рис. 1. Размывание облачности над разломами: Главным Уральским разломом – А, В, С; Тиманским кряжем – D, E; облачная гряда (F, G) над широтным разломом по северу Аральского моря, 31.08.1976 г.: А) видимый, В) ИК-диапазон. / Fig. 1. Dissolution of clouds over the faults: Main Ural fault - A, B, C; Timan ridge - D, E; cloud bank (F, G) above the latitudinal fault in the north of the Aral Sea, 31.08.1976: A) visible, B) IR-range.

И. Г. Киссин [2013] считал, что «Мониторинг значительных территорий может осуществляться с максимальным привлечением дистанционных методов [Морозова, 2005]. Массовое привлечение подобных методов позволит решить задачи мониторинга обширных сейсмоактивных территорий в режиме реального времени с наименьшими затратами».

Тем не менее до сих пор спутниковые снимки с ЛОА не нашли применения в практической сейсмологии. «Большинство катастрофических явлений, в особенности таких чрезвычайно опасных, как землетрясения, находятся вне постоянного слежения из космоса. Отчасти это связано с определёнными трудностями их организации, отчасти – с недооценкой такого рода наблюдений» [Григорьев, Кондратьев, 1996].

Процесс дешифрирования ЛОА на метеорологических спутниковых снимках целесообразно производить в визуальном (интерактивном) режиме распознавания образов, пока не решен вопрос об автоматическом выделении облачных линейаментов. Визуальная информация более репрезентативна и может быть представлена в течение нескольких минут после получения снимка. Л. И. Морозова [2007] составила Атлас линейных облачных аномалий и инструкцию их выявления на снимках.

Интересными в этом отношении могут быть снимки с аномалиями в облачных полях, которые нельзя объяснить погодообразующими факторами. Это облачные

массивы, возникающие вследствие обтекания воздушным потоком океанических островов или орографические облака с подветренной стороны хребтов. В отличие от них ЛОА имеют прямолинейную или правильную геометрическую форму.

В атмосфере на разных высотах облака имеют определённую яркость и форму, а их проекции на снимок характерную конфигурацию. Это позволяет по снимкам оценить вертикальную возмущённость атмосферы в зоне ЛОА. На снимках выражены только те безоблачные каньоны, вертикальная мощность которых либо выше всего облачного слоя, либо ограничена сверху перистой облачностью верхнего яруса прозрачной для лучей видимого диапазона спектра и непрозрачной – белой на инфракрасном – ИК снимке. По одномоментным снимкам в видимом и ИК-диапазонах можно судить об уровне вертикального воздействия излучения разлома на атмосферу Земли.

ЛОА в виде каньонов впервые были обнаружены Л. И. Морозовой над Главным Уральским разломом и Тиманским кряжем [Морозова, 1980] (рис. 1).

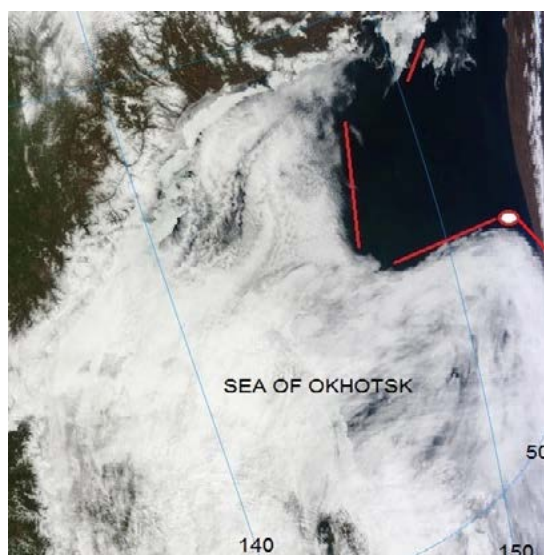
Облачное поле над Уральским хребтом состоит из кучевых облаков, покрытых тонким слоем ледяных перистых в верхнем ярусе атмосферы (12-16 км).

На снимке видимого диапазона в мощном слое облачности видна узкая тёмная полоса – малооблачная зона, возникшая в результате размывания нижней облачности ниже 800 м (рис. 1А), она слабо прослеживается в ИК диапазоне (рис. 1Б), завуалированная перистой облачностью выше 10 км.

Все виды облачности атмосферной природы имеют специфический вид, присущий тому или иному атмосферному образованию, с размытыми границами. В циклонах (в тропиках – тайфуны) облачный вихрь вращается против часовой, как на рисунке 2а. В день, предшествующий землетрясению $M=8,3$ вблизи Камчатки 24.05.2013 г., часть его контура была образована прямыми вертикальными стенками, с эпицентром под одной из них (рис. 2б).



а) Тайфун над Охотским морем. 22.05.2013 г. /
Typhoon over the Sea of Okhotsk 22.05.2013



б) Просвет в облачности с резкими границами
(красные линии). 23.05.2013 г. /
Cloud gap with sharp boundaries (red lines).

Рис. 2. Облачный вихрь вблизи п-ова Камчатка. /
Fig. 2. Cloudy vortex near the Kamchatka Peninsula.

Появление протяженной ЛОА обозначает только регион нарастающей сейсмичности и является краткосрочным предвестником сильного землетрясения или серии нескольких менее сильных на значительной территории региона. Появление на двух последовательных снимках на небольшом пространстве трех и более ЛОА уточняет положение эпицентра землетрясения [Морозова, 2010].

Появление новых ЛОА на последующих снимках обозначает территорию тектонической активизации, включая эпицентр [Морозова, 1993, 1997а, б, 2005, 2007, 2011, 2015а]. По превышению количества ЛОА над среднемесячными фоновыми значениями определяют степень сейсмической опасности.

Цель работы

Несмотря на достаточно обширную литературу, посвященную феномену ЛОА, большинство авторов обходят вопрос физического механизма формирования ЛОА и сосредотачиваются, в основном, на морфологии, классификации необычных облачных структур и приведении примеров регистрации ЛОА для тех или иных землетрясений [Gur, Xie, 2007], в том числе, делая попытки прогноза землетрясений с помощью ЛОА [Guo, Jie, 2013]. Существует весьма ограниченное количество публикаций, где делаются попытки объяснить физическую природу ЛОА [Liperovsky et al., 2005; Pulinets, Ouzounov, 2011]. В первой работе инъекция аэрозолей в атмосферу перед землетрясениями предлагается в качестве основного механизма, при этом аэрозоли играют роль начальных центров нуклеации в процессе образования облаков, а их транспорт на уровень образования облаков происходит за счет тепловых аномалий над активными разломами. Такой подход позволяет только как-то объяснить формирование линейных облаков, но не объясняет формирование линейных просветов (каньонов) в сплошной облачности. В работе [Pulinets, Ouzounov, 2011] рассматриваются оба случая (формирование линейных облаков и просветов), но только в виде прямолинейных образований. Целью настоящей работы является рассмотрение всех типов ЛОА и соответствующих им протоструктур вблизи поверхности земли и объяснение физических причин их формирования.

Отклики геодинамики в облачных структурах

Формирование облаков является частью более всеобъемлющего процесса – круговорота воды в природе. В результате тепловой конвекции теплый воздух, содержащий водяной пар, поднимается в вышележащие слои атмосферы, где с достижением температуры точки росы, происходит конденсация и образование мельчайших водяных капель. Учитывается также наличие ядер конденсации в виде аэрозолей или ионов. Охлаждение может происходить и в результате адвекции – перемещении воздушных масс в горизонтальном направлении в области с более низкой температурой. В зависимости от высоты облака могут представлять собой как взвесь мелких водяных капель, так и мельчайших частиц льда. Существует более десяти видов тропосферных облаков, но их общей характеристикой является их высокая изменчивость, связанная с динамикой процессов внутри облака (конденсация, испарение, коагуляция, обмен электрическими зарядами, конвекция и пр.), а также с движением облака в потоке воздушных масс и попадание его в другие внешние условия (изменение температуры, влажности и давления). Время существования облаков зависит от их типа. Так, время жизни кучевых облаков составляет десятки минут, тогда как слоистые облака сохраняют свою форму в течение суток.

Методика исследования

Следует отметить, что круговорот воды сопровождается вертикальными потоками в виде скрытого тепла, которое выделяется в атмосферу при конденсации влаги и поглощается при ее испарении. В случае появления дополнительных источников конденсации в результате ионизации или аномальной концентрации аэрозолей дополнительные потоки тепла можно отследить путем оценки поправки химического потенциала паров воды в атмосфере, которая рассчитывается из данных о температуре и относительной влажности воздуха [Pulinets et al., 2014; Пулинец и др., 2015]. Поэтому основным методом нашего исследования будет изучение динамики распределения влажности и температуры воздуха на поверхности земли над областями, покрытыми облачностью и открытыми пространствами.

На рисунке 3а показано распределение облачности над восточной частью Магаданской области в диапазоне долгот 130° – 160° 22 апреля 2014 в 09:00, а на рисунках ниже (рис. 3б – 3г) показаны распределения поправки химического потенциала, относительной влажности и температуры на высоте 100 м над уровнем подстилающей поверхности.

Но нас в первую очередь будет интересовать вопрос, каким образом облака «чувствуют» тектонические процессы, и как эти процессы сказываются на их морфологии. Для начала посмотрим, какие облачные структуры явно проявляют связь со структурами на земной поверхности. Несмотря на то, что тонкие детали распределений не совпадают с деталями облачности, мы четко можем отметить закономерность. Подстилающая поверхность под облаками имеет более высокую влажность и более низкую температуру по сравнению с открытой поверхностью. Кроме того, крупномасштабная структура облачности – в форме угла в левом верхнем углу распределения облачности повторяется на всех трех распределениях метеорологических параметров.

Таким образом, мы можем говорить о существовании протооблачности у поверхности земли (в виде распределения температуры воздуха, относительной влажности и поправки химического потенциала), которая потом отражается в форме облачного покрова.

А может ли быть соответствие более мелкомасштабных структур у поверхности земли и в облачном покрове? На рисунке 4а показана облачная структура, сформированная акустико-гравитационной волной вблизи пролива Инвестигатор у западной кромки южного побережья Австралии.

Как видим, волновая структура отчетливо идентифицируется в распределении метеорологических параметров, что говорит о передаче формы возмущений в неизменном виде от поверхности земли до уровня облаков, что позволяет надеяться на то, что ЛОА являются отражением реальных структур либо в земной коре, либо вблизи поверхности земли или океана.

Перед землетрясением $M=7,9$ в Непале 25.04.2015 г. была зафиксирована протяженная облачная гряда над Бенгальским заливом у п-ова Индостан, которая показана на снимке от 24 апреля (рис. 5а) и которая сохранялась в течение трех часов, постепенно размываясь. В соответствии с нашей концепцией появление протяженной гряды указывает на возможность землетрясения в регионе в ближайшие дни, но не определяет положение эпицентра [Морозова, 2015б]. Согласно Добровольскому [1992] положение очагов скопления предвестников может не совпадать с положением эпицентра будущего землетрясения, но должно находиться внутри зоны подготовки землетрясения [Dobrovolsky et al., 1979].

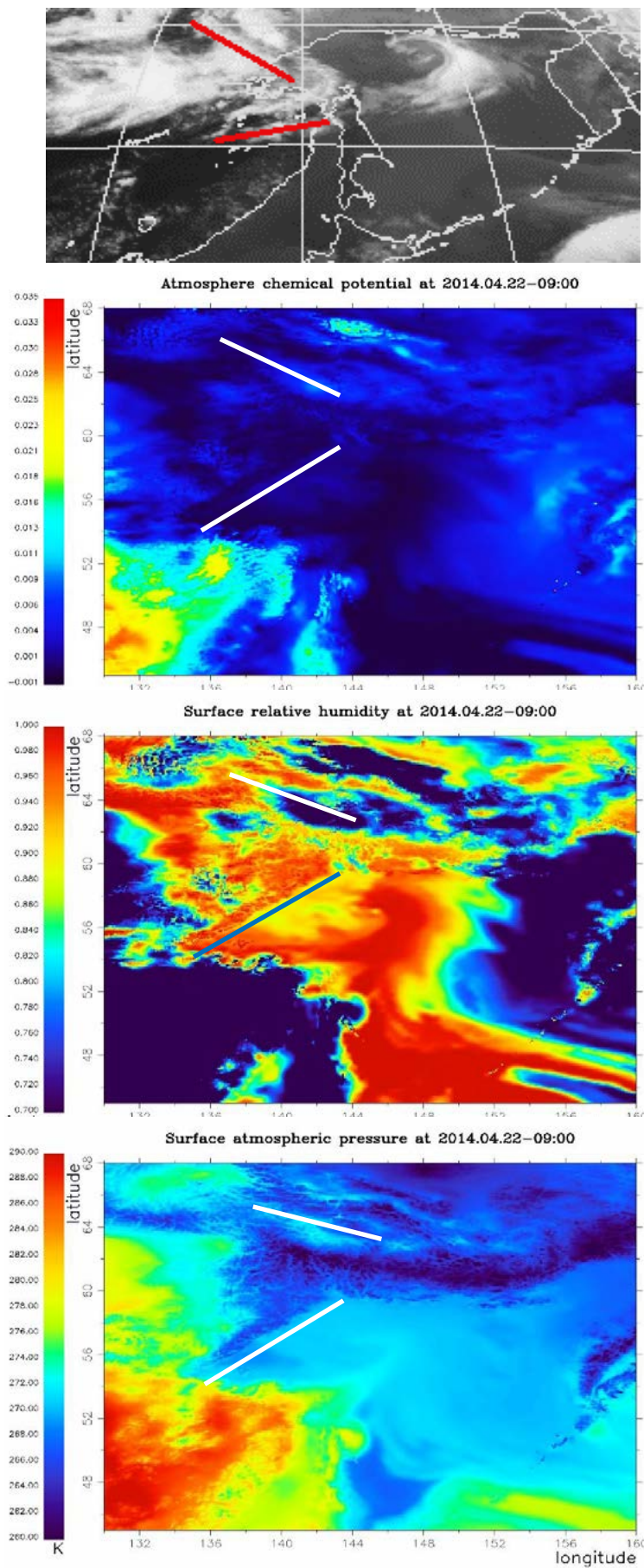


Рис. 3. Сверху вниз: распределение облачности, поправки химического потенциала, относительной влажности и температуры над восточной частью Магаданской области. / Fig. 3. From top to bottom: cloudiness distribution, chemical potential corrections, relative humidity and temperature over the eastern part of the Magadan region.

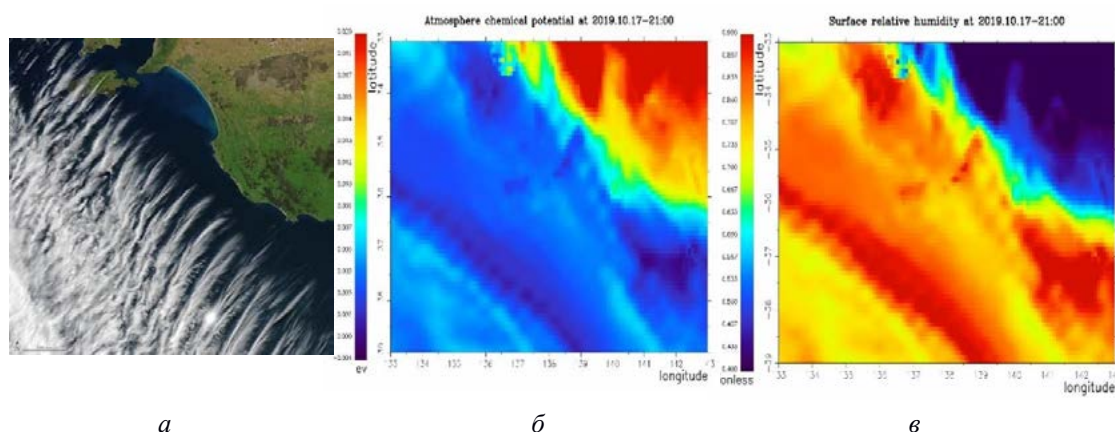


Рис. 4. а) облачная волновая структура; б) распределение поправки химического потенциала; в) распределение относительной влажности воздуха (на высоте 100 м над уровнем моря) у юго-западного побережья Австралии. /
 Fig. 4. a) cloudy wave structure; b) the correction distribution of the chemical potential; c) distribution of relative air humidity (at an altitude of 100 m above sea level) off the southwest coast of Australia.

Если присмотреться внимательно, то справа в нижней части облачной гряды можно заметить еще небольшой отросток. На рисунке 5б представлена структура тектонических разломов в Бенгальском заливе, и разлом, обведенный овалом, по своему положению точно совпадает с положением облачной гряды. На рисунке 5в представлено распределение относительной влажности на уровне 100 м над поверхностью океана, и белой линией трассирована такая же структура: квазимеридиональная структура повышенной влажности с отростком вправо.

Это соответствует нашим общим выводам относительно облачного покрова и метеорологических параметров (рис. 3). Облакам соответствует повышенная влажность и пониженная температура вблизи поверхности. Мы приходим к очень важ-

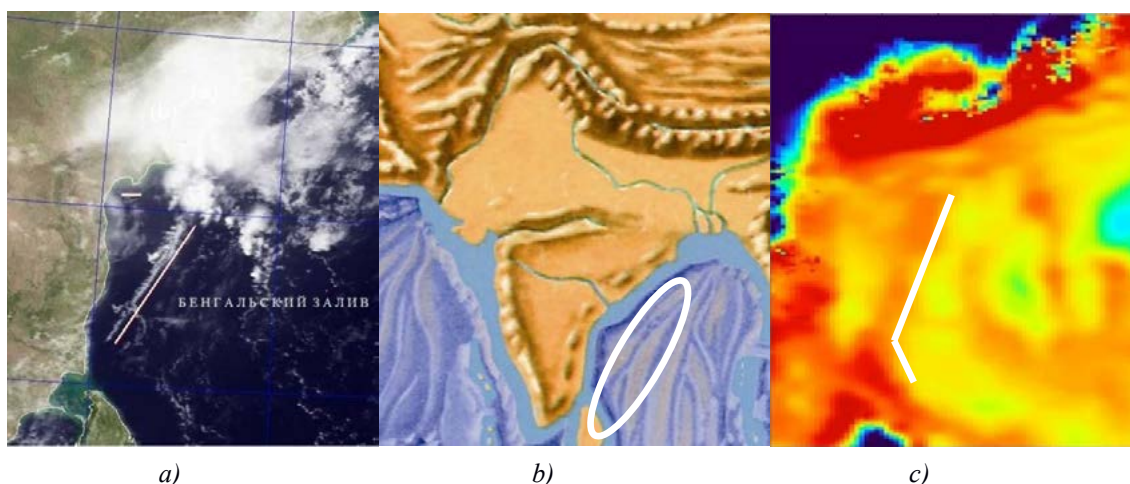


Рис. 5. а) облачная гряда в Бенгальском заливе 24.04.2015 г.; б) тектонический разлом на дне Бенгальского залива, совпадающий с положением облачной гряды (обведен белым овалом); в) квазимеридиональная структура повышенной влажности, совпадающая с положением облачной гряды (отмечена белой линией) 24.04.2015 г. /
 Fig. 5. a) cloud ridge in the bay of Bengal 24.04.2015; b) tectonic fault at the bottom of the Bay of Bengal, coinciding with the position of the cloudbank (encircled with white); c) quasi-meridional structure of high humidity, coinciding with the position of the cloudbank (marked with a white line) 24.04.2015.

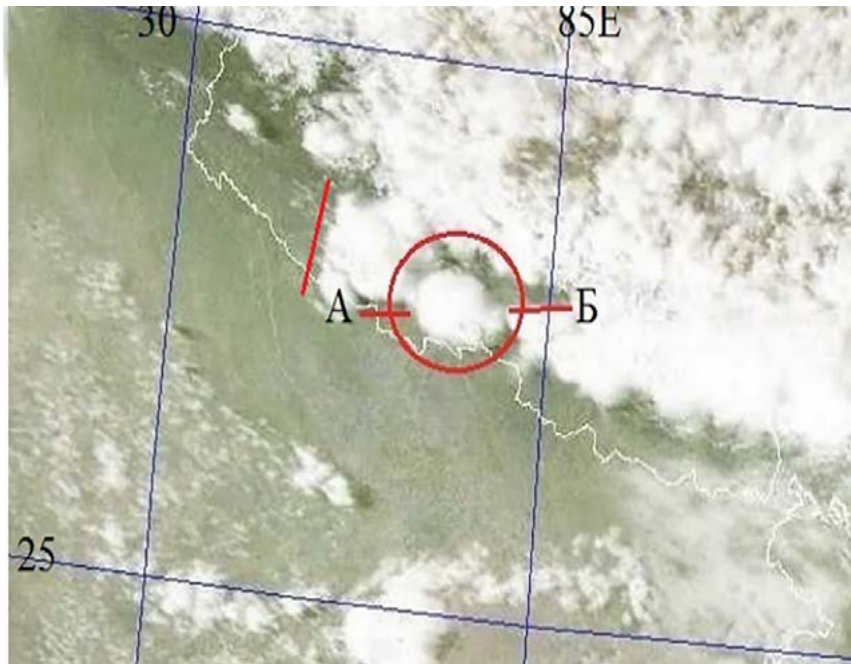


Рис. 6.
Грозовая туча,
зарегистрированная
24.04.2015 г.
вблизи эпицентра
землетрясения. /
Fig. 6. Thundercloud
registered on April
24, 2015, near the
epicenter of the
earthquake.

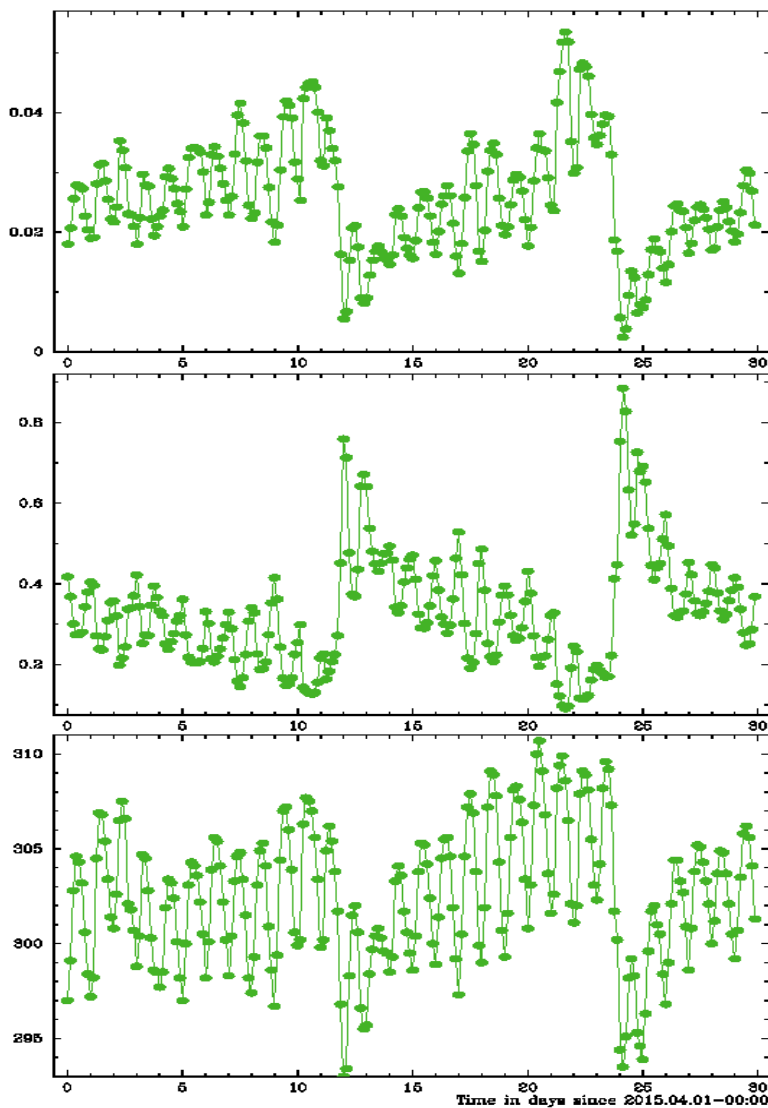


Рис. 7. Сверху вниз:
вариации химического
потенциала,
относительной
влажности и
температуры воздуха на
высоте 100 м с 1 по 30
апреля 2015 г. Непал. /
Fig. 7. From top to bottom:
variations in chemical
potential, relative humidity
and air temperature at an
altitude of 100 m from 1 to
30 April 2015. Nepal.

ному выводу о том, что ЛОА – не просто какие-то линейные облачные образования, но связаны по своему положению и по форме с тектоникой земной коры.

Вблизи самого эпицентра землетрясения в Непале на следующие сутки 25 апреля было обнаружено мощное грозовое облако с верхней границей порядка 16 км (рис. 6). Чтобы понять физический механизм образования грозового облака были исследованы вариации метеорологических параметров вблизи подстилающей поверхности на высоте 100 м (рис. 7). Известно, что перед землетрясением максимум поправки химического потенциала свидетельствует о максимальном уровне ионизации и концентрации кластерных ионов, оболочка которых состоит из большого количества молекул воды. Фактически химический потенциал повторяет поведение радона в области очага, когда перед самым землетрясением происходит резкое

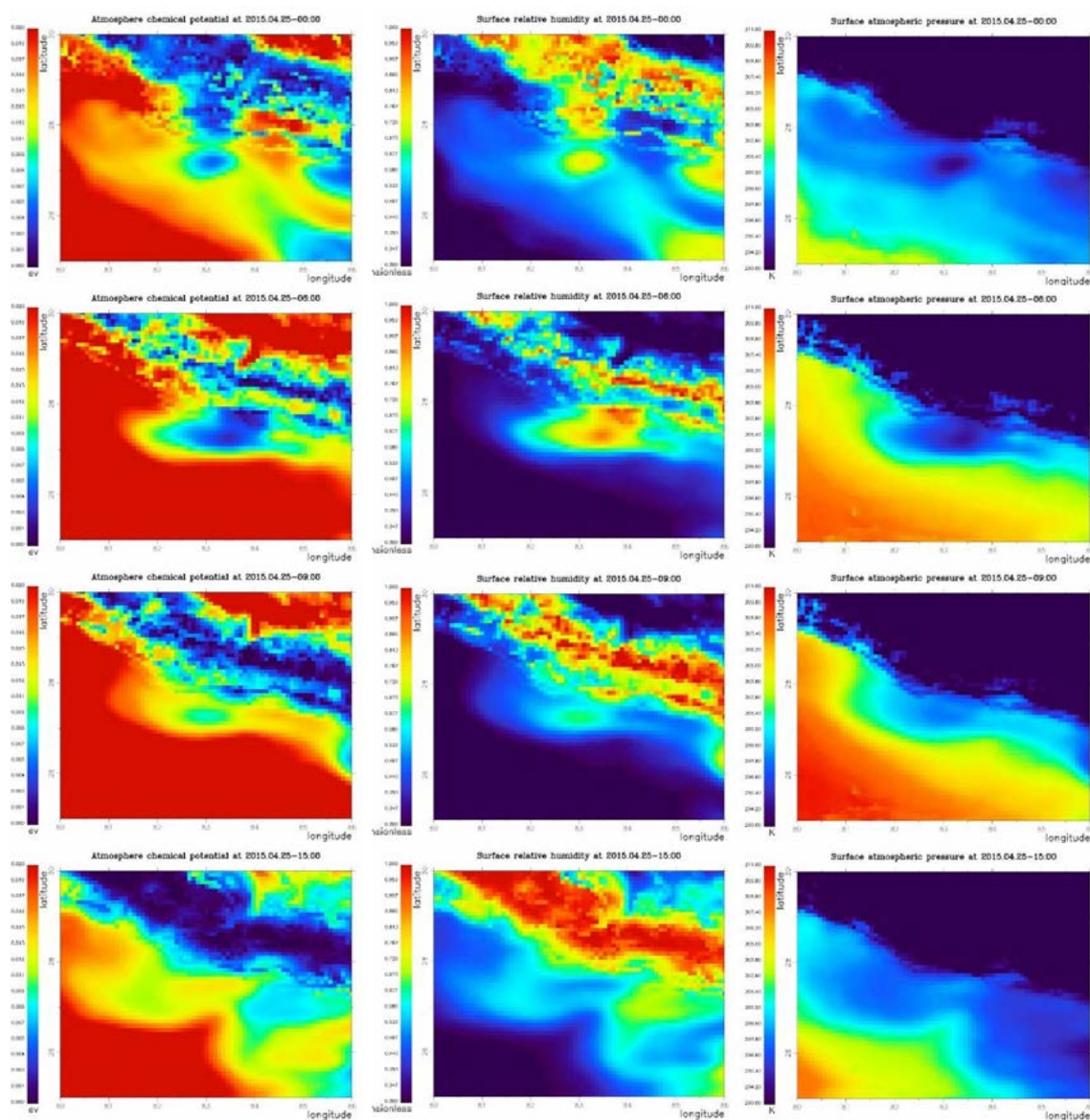


Рис. 8. Слева направо: динамика пространственного распределения химического потенциала, относительной влажности и температуры воздуха на высоте 100 м от подстилающей поверхности. /

Fig. 8. From left to right, the dynamics of the spatial distribution of chemical potential, relative humidity and air temperature at a height of 100 m from the underlying surface.

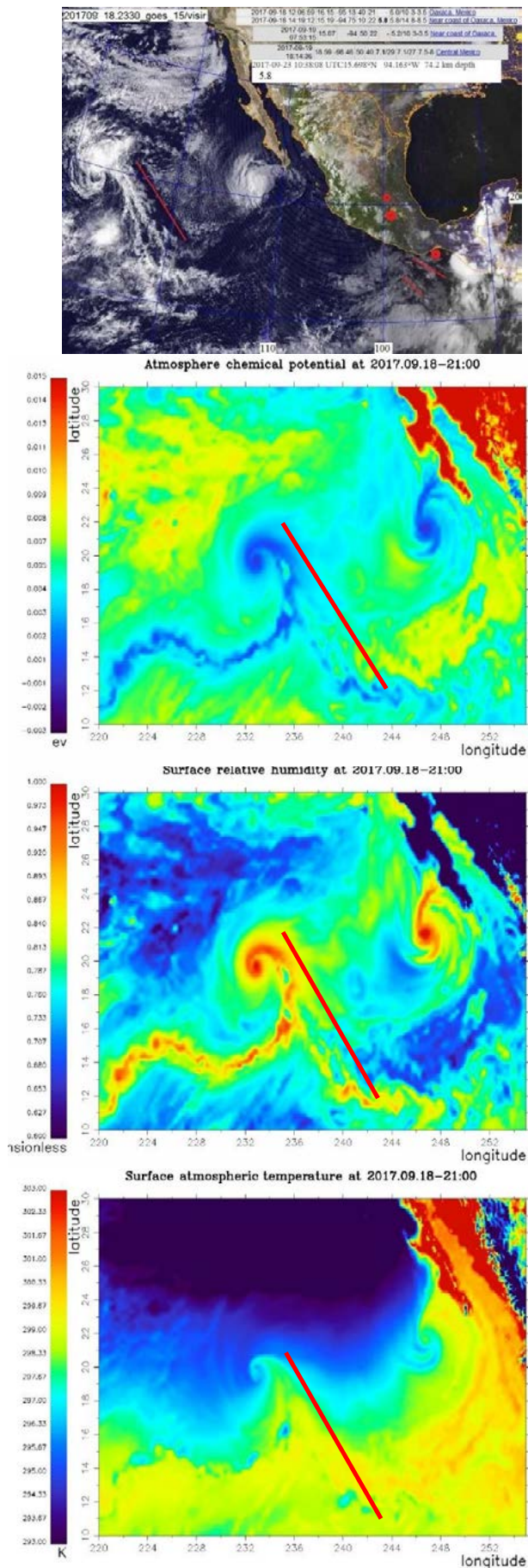
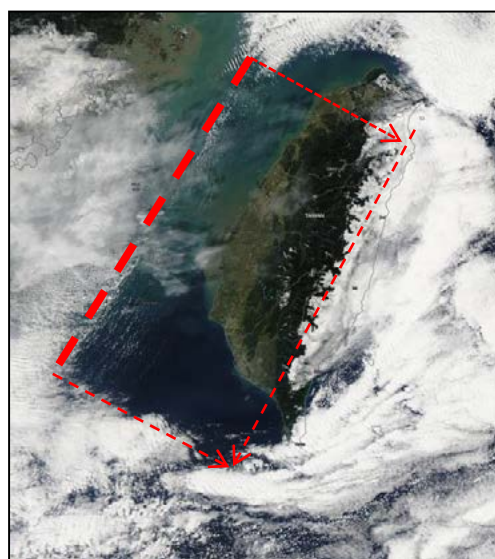


Рис. 9. Сверху вниз: а) Снимок в видимом диапазоне спутника GOES 18.09.2017, красной линией обозначен каньон, красными точками – эпицентры землетрясений в Мексике за период 19-23 сентября 2017 г.; б) поправка химического потенциала; в) относительная влажность; г) температура воздуха. / Fig. 9. From top to bottom: a) Image in the visible range of the GOES satellite on September 18, 2017, the red line indicates the canyon, red dots – the epicenters of earthquakes in Mexico for the period September 19-23, 2017; b) correction of chemical potential; c) relative humidity; d) air temperature.

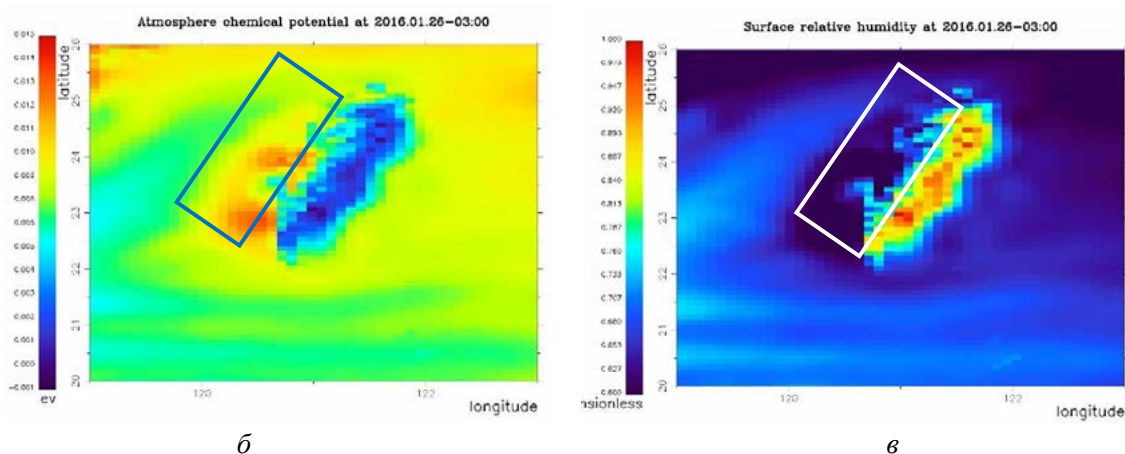
сжатие земной коры, закрытие всех трещин и прекращение поступления радона в атмосферу. Соответственно, прекращается производство ионов, а уже образовавшиеся кластеры в виде капель оседают на нагретую поверхность и тут же влага, содержащаяся в них, начинает испаряться и подниматься вверх уже в виде нагретого водяного пара. Испарение приводит к охлаждению окружающего воздуха, что мы и наблюдаем на рисунках 7б и 7в: температура резко падает, а влажность возрастает. Именно эта область становится основой для формирования грозового облака вверху.

Пространственное распределение тех же параметров, что и на рисунке 7, показано на рисунке 8 в динамике.

Мы видим, что облако стационарно и не расплывается в течение, по крайней мере, 9 часов, а затем на этом месте появляется просвет в облачности.



а



б

в

Рис. 10. а) прямоугольный просвет в облачности над о. Тайвань за 9 суток до землетрясения $M=6,4$ на юге Тайваня 05.02.2016 [Ouzounov et al., 2019];

б) распределение поправки химического потенциала над о. Тайвань 26.01.2016; в) распределение относительной влажности над о. Тайвань 26.01.2016. /

Fig. 10. a) rectangular clearance in the clouds over the island Taiwan 9 days before the earthquake $M = 6.4$ in the south of Taiwan 05.02.2016 [Ouzounov et al., 2019];

b) distribution of the correction of the chemical potential over island Taiwan 26.01.2016; c) the distribution of relative humidity over the island Taiwan 26.01.2016.

Теперь обратимся к другому типу ЛОА – каньонам (просветам) внутри массива мощной облачности. Они также появляются в зоне подготовки сильных землетрясений и являются индикаторами финальной стадии процесса подготовки землетрясения. Один из примеров такой структуры, сформировавшийся в Тихом океане на запад от побережья Южной Калифорнии и Мексики показан на рисунке 9.

На рисунке показаны облачная структура, полученная со спутника GOES 18.09.2017 в 23:30 UT, а ниже – распределение атмосферных параметров на высоте 100 м, полученные за два с половиной часа до снимка GOES. Как видно из рисунка, наблюдается картина, противоположная линейным облакам: мы видим повышенные значения поправки химического потенциала и температуры воздуха, и пониженные – относительной влажности. На всех рисунках структура ЛОА отмечена красной линией.

Последним в серии геометрических облачных структур рассмотрим структуры правильной геометрической формы (прямоугольники, круги, прямые углы и др.). Предполагая, что все они имеют одинаковую природу рассмотрим только один пример – прямоугольный просвет облачности над островом Тайвань по данным спутника Aqua от 26.01.2016 г. (рис. 10а).

Из распределения поправки химического потенциала и относительной влажности, представленных на рисунках 10б-в, мы можем сделать вывод, что также как для ЛОА типа каньонов мы наблюдаем повышение химического потенциала и понижение относительной влажности над областью ЛОА в виде просвета в облачности. Мало того, влажность над восточной частью Тайваня, т. е. над сушей, выше, чем над океаном на запад от острова.

О природе ЛОА

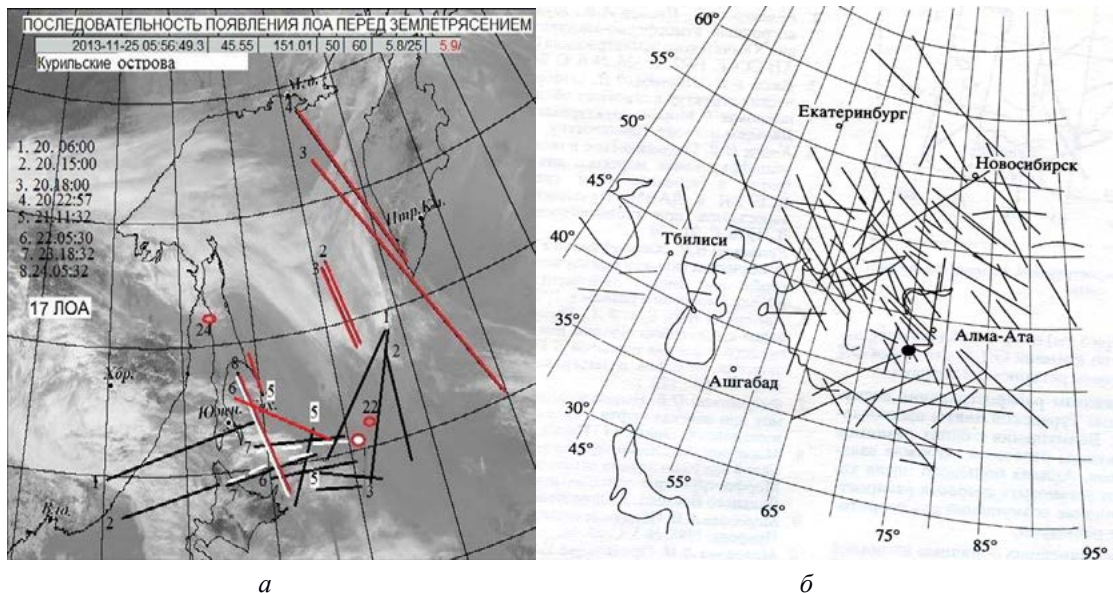


Рис. 11. а) Последовательность появления ЛОА перед землетрясением 25.11.2013 г. $M=5,9$ на Курильских о-вах; б) Схема облачных линейментов (за 18 дней) перед Сусамырским землетрясением $M=7,3$ у озера Иссык-Куль. /

Fig. 11. a) The sequence of the appearance of LCA before the earthquake of 25.11.2013, $M = 5.9$ on the Kuril Islands; b) Scheme of cloud lineaments (for 18 days) before the Susamyr earthquake $M = 7.3$ near Lake Issyk-Kul.

Последний пример прямоугольной аномалии показывает, что существующее ранее представление об отождествлении положения разлома на местности с линейной облачной аномалией над ним и возможности картирования по ЛОА разломов на дне акваторий, выявлении их активизации в реальном времени не всегда соответствует действительности.

В частности, существует предположение, что ЛОА могут образовываться над осями сжатия земной коры, лишь иногда совпадающими с разломами. В работе Рогожина [2013] представлена схема линий простираения горизонтальных проекций осей сжатия в очагах форшоков сильнейших Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. Подобное хаотическое распределение можно видеть на рисунке 11а, где представлено распределение мелкомасштабных линейных облачных структур в районе Курильских островов, появившихся в течение нескольких суток с 20 по 24 ноября 2013 г. перед землетрясением $M=5,925$ ноября. Последовательность и ориентация ЛОА отмечены на рисунке пронумерованными линиями и датами появления этих ЛОА. Такие распределения мелкомасштабных ЛОА отмечались Морозовой еще в 1996 г. На рисунке 11б представлено суммарное количество облачных линеаментов (за 18 дней) перед Сусамырским землетрясением $M=7,3$ у озера Иссык-Куль. По Ю. С. Геншафту (2009), «появление облачных аттракторов («улиц» облаков) в области, близкой к сейсмофокальной, свидетельствует о том, что причины землетрясений – случайные колебания любого фактора, воздействующие на неустойчивую, находящуюся в напряженно-деформационном состоянии среду».

Очевидно, что появление ЛОА не может быть обусловлено исключительно атмосферными процессами, с другой стороны, в облачности почему-то отображаются лишь некоторые разломы. Причина заключается в том, что разлом оказывает влияние на атмосферу только в моменты тектонической или энергетической активности. Иначе говоря, линейные облачные аномалии имеют литосферную природу, и их появление служит сигналом, свидетельствующим о начале активизации геодинамических процессов. Такие процессы часто завершаются землетрясением, а значит, мониторинг ЛОА – это еще один возможный способ заблаговременно выявить надвигающуюся катастрофу.

Причиной возникновения облачных гряд, наблюдающихся только в приземном слое атмосферы и имеющих небольшую протяженность, может быть повышенная концентрация металлизированных флюидов, водорода и радона в зоне разлома. В частности, именно согласно модели [Пулинец и др., 2015] выделение радона приводит к изменению параметров приземного слоя атмосферы, которые можно было наблюдать одновременно с ЛОА на рисунках 3-10. Однако резкая линейная граница размывания облачности на её периметре или внутри облачного массива от её нижней границы до высот 12-16 км на протяжении нескольких сотен километров не может быть обусловлена только флюидами и аэрозолями: они размывались бы воздушными потоками и не образовывали бы вертикальных стенок как внутри облачного массива, так и на его границе. Ни один процесс в атмосфере, в среде с низкой вязкостью, не может дать такой резкой границы. Однако ионизация приземного слоя атмосферы меняет не только термодинамические параметры атмосферы, но и локально воздействует на параметры Глобальной Электрической Цепи (ГЭЦ) [Pulinets, Davidenko, 2014]. Физический механизм образования линейных облачных структур в виде гряд и каньонов был предложен в работе [Pulinets, Ouzounov, 2011]. Фактически, вертикальное электрическое поле, генерируемое над разломом (или

осью сжатия) может служить той «стенкой», которая поддерживает резкие линейные границы облачной аномалии. С помощью этого поля формируется ток положительных или отрицательных кластерных ионов, которые в процессе гидратации становятся центрами конденсации влаги. С другой стороны, как показывает пример, приведенный на рисунке 4, нельзя уменьшать значение акустических воздействий на атмосферу как в диапазоне инфразвуковых колебаний, так и более низкочастотных и долгоживущих акустико-гравитационных волн.

Учитывая, что речь идет о литосферно-атмосферных связях, как показывает настоящее исследование, уже в нижнем слое атмосферы у поверхности земли (или океана) образуется протоструктура, которая в результате на высотах 6-16 км формирует специфические линейные облачные структуры, называемые ЛОА, появляющиеся за несколько суток над зоной подготовки сильных землетрясений.

Использование ЛОА в задачах прогноза землетрясений

На спутниковых снимках с координатной привязкой дислокация ЛОА позволяет определить географическое расположение активизировавшихся разломов. По тому, как оно изменяется с течением времени, можно судить о направлении и скорости распространения напряжений в земной коре в региональном и глобальном масштабе.

Главной задачей при изучении любого предвестника землетрясений и использования его в эмпирическом прогнозе является установление связи времени возникновения предвестника (интервала времени от момента его появления до момента землетрясения) с энергией землетрясения. Установлено, что число землетрясений, при которых количество ЛОА составляло три и более, росло с увеличением энергии землетрясений. Так, для землетрясений с $M < 4,5$ такое количество ЛОА наблюдалось лишь в 26% случаев, а для катастрофических – в 83% [Морозова, 2012].

Возникновение ЛОА в периоды сейсмических событий может являться следствием не только энергетических пульсаций в разломах, но и тектонических подвижек. После исчезновения импульса геофизического поля в разломе облака вновь беспрепятственно проходят над ним в соответствии с атмосферной циркуляцией.

Территория (или акватория), которая находится под влиянием сейсмического процесса, может быть весьма обширной. Значит, сделать достоверный прогноз разрушительного землетрясения можно только в тех районах, где постоянно действует система наблюдений за предвестниками, способная одновременно охватывать область радиусом не менее 500 км. К сожалению, существующие сети геофизического контроля способны охватывать территории в десятки раз меньше. В то же время зона радиовидимости спутникового центра может простираться на многие тысячи километров, поэтому наиболее подходящей системой слежения за глобальной сейсмической активностью представляет спутниковый мониторинг линейных облачных аномалий. Дистанционное зондирование Земли с орбит искусственных спутников достаточно точно определяет основные параметры атмосферы, в частности вертикальные и горизонтальные размеры облачных массивов.

Осуществлять сейсмический мониторинг вполне по силам уже существующей глобальной сети спутников, с которых поступают данные для прогнозирования погоды. Регламент орбитальных наблюдений за облачным покровом Земли вполне удобен для оперативной регистрации ЛОА. Данные со спутников поступают в

режиме непосредственной передачи, скорость обработки информации достаточно высокая, так что результат можно получить за считанные минуты.

Иначе говоря, линейные облачные аномалии имеют литосферную природу, и их появление служит сигналом, свидетельствующим о начале активизации геодинамических процессов. Такие процессы часто завершаются землетрясением, а значит, мониторинг ЛОА – это еще один возможный способ заблаговременно выявить надвигающуюся катастрофу.

Заключение

Предвестником сильных землетрясений служит появление протяженной облачной гряды или каньона в регионе будущего землетрясения, а также формирование облачных конфигураций или просветов в облачности правильной геометрической формы. Регион будущего землетрясения обозначается на снимке, сформировавшимся позже роем коротких ЛОА за несколько часов (иногда 3-5 суток) до толчка [Морозова, 2008].

Каждому типу ЛОА соответствует протоструктура у поверхности земли, форма которой соответствует форме ЛОА. Просветам облачности соответствуют повышенная температура, пониженная влажность и повышенное значение химического потенциала. Облачным структурам, наоборот, соответствуют пониженная температура у поверхности земли, повышенная влажность и пониженное значение химического потенциала по сравнению с поверхностью, окружающей пространство аномалии. Главным отличием как ЛОА, так и протоструктур у поверхности земли от обычных облаков является их время жизни, которое может составлять до 9-12 часов.

Точно указать положение эпицентра по ЛОА невозможно. Появление на снимках роя из трех и более ЛОА, либо еще и безоблачного пятна повышает вероятность землетрясения до 82% [Морозова, 2015а]. Вероятность прогноза катастрофического сейсмического события по аномально большому числу ЛОА может быть достаточно высокой, гораздо выше той, с какой землетрясения прогнозируются на основе только сейсмических наблюдений.

К сожалению, один только спутниковый мониторинг облачных аномалий помогает уверенно прогнозировать лишь регион и время начала землетрясения (с точностью до суток). Ближайшая цель – организация синхронной регистрации и совместной обработки ЛОА и сейсмических полей, что позволит в значительной мере усовершенствовать методику прогнозирования землетрясений.

Достоверный прогноз разрушительного землетрясения можно осуществлять только в тех районах, где установлена постоянно действующая система наблюдений за предвестниками, охватывающая область с линейными размерами более 1000 км. Такой системой может быть спутниковый мониторинг активизированных разломов по их геоиндикатору – ЛОА. Существующая глобальная сеть сбора спутниковых данных для прогноза погоды может быть использована и для сейсмического прогнозирования.

Спутниковый мониторинг облачных аномалий позволяет оперативно обнаружить регион вероятного сильного землетрясения. Результаты статистической обработки связей параметров ЛОА с магнитудой землетрясений и положений гипоцентров оказались одинаковыми для различных регионов Земли.

Грозовые облака аномальных размеров также целесообразно включать в мониторинг сейсмичности.

Спутниковый мониторинг сейсмичности в Азиатско-Тихоокеанском регионе, включающем огромные закрытые территории, является единственным средством наблюдения в реальном времени, а потому предпочтительнее наземного, основанного на обработке результатов всех типов сейсмометров. Он дает значительный выигрыш во времени – главнейшем факторе при прогнозе стихийных явлений. Однако спутниковые снимки должны применяться в комплексе с другими методами, обуславливая более надежные прогнозы положения эпицентра. Методы геофизической разведки с использованием спутниковых снимков характеризуются дешевизной и экологической чистотой, так как геологическая среда не подвергается воздействию искусственных источников поля. Мониторинг облачных аномалий – ЛОА и грозовых очагов – может стать дистанционным контролем тектонической активности региона с целью обеспечения безопасности больших инженерных сооружений – плотин, аэродромов, АЭС.

Согласно Уломову [1998, с. 166] «В недалеком будущем по аналогии с метеорологией окажется возможным широкомасштабный прогноз сейсмической погоды, благодаря регулярному составлению специальных синоптических карт, характеризующих направленность развития сейсмогеодинамических процессов в крупных регионах на трансрегиональном и глобальном уровнях» [Уломов, 1998, с. 166].

Комплексирование различных методов дистанционного мониторинга краткосрочных предвестников землетрясений, включающих мониторинг тепловых и ионосферных предвестников [Ouzounov et al., 2018; Pulinets, Ouzounov, 2018] позволит определять не только время, но и положение эпицентра и магнитуду землетрясения. «Привлечение дистанционных методов позволит решить задачи мониторинга обширных сейсмоактивных территорий в режиме реального времени с наименьшими затратами» [Киссин, с. 158, 2013]. Академик Кондратьев – основоположник спутниковой метеорологии, еще в 1996 г. утверждал, что «Мониторинг облачных аномалий на спутниковых снимках служит для оценки сейсмической опасности и позволяет учитывать неотектоническую активность региона. Космические исследования различных природных явлений и процессов дали так много принципиально нового для естественных наук, что можно говорить о новом этапе в их развитии» [Григорьев, Кондратьев, 1996, с. 70].

Дальнейшее развитие способов спутникового мониторинга природных явлений и катастроф – актуальная задача современной науки. Дальнейшее исследование обнаруженного атмосферного геоиндикатора сейсмического процесса не только принесет практическую пользу, но и расширит существующие представления о природе последнего. Разработка нового научного направления поможет открыть следующую страницу в изучении сейсмичности, разрывной тектоники, в осуществлении экологического контроля подземных ядерных взрывов.

Литература

1. Авенариус И. Г., Буш В. А., Трещов А. А. Использование космических снимков для изучения тектонического строения шельфов. // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. – М.: Наука, 1985. – С. 163-172.
2. Вернадский, В. И. О газовом обмене земной коры. // Известия Императорской академии наук. Серия 6. – 1912. – Т. 6. Вып. 2. – С. 141-162.

3. Григорьев А. А., Кондратьев К. Я. Спутниковый мониторинг природных и антропогенных катастроф. // Исследования Земли из космоса. – 1996. – №3. – С. 68-78.
4. Добровольский И. П. Теория подготовки сильного тектонического землетрясения. // Физика Земли. – 1992. – №6. – С. 31-47.
5. Ежов, Б. В. Проявление очаговых морфоструктур в строении облачности и ледового покрова акваторий на примере Охотского моря и Камчатки. // Морфоструктуры центрального типа Сибири и Дальнего Востока. – Владивосток. – 1988. – С. 124-128.
6. Ежов Б. В., Ищенко Л. И. Отображение тектонических структур в строении облачного и ледового покровов. // Морфоструктурные исследования на Дальнем Востоке. – Владивосток: Дальнаука, 1983. – С. 114-119.
7. Еременко В. Я., Каттерфельд Г. Н. Использование космических снимков при изучении региональных и глобальных систем линейных элементов Земли. // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1978. – № 10. – С. 23-29.
8. Киссин И. Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений. // Физика Земли. – 2013. – №4. – С. 145-160.
9. Кобец Н. В. Геологическое и геоморфологическое дешифрирование морского дна по космическим фото- и телевизионным снимкам. // Труды ВСЕГЕИ и ЛАЭМ. Применение новых видов аэросъемок при геологических исследованиях. – Л.: ВСЕГЕИ, 1976. – С. 21-34.
10. Морозова Л. И. Проявление Главного Уральского разлома в поле облачности на космических снимках. // Исследование Земли из космоса. – 1980. – №3. – С. 101-103.
11. Морозова Л. И. Облачные индикаторы геодинамики земной коры. // Физика Земли. – 1993. – №10. – С. 108-112.
12. Морозова Л. И. Способ определения тектонической активности территории в реальном масштабе времени. // Патент 11-2084. 51-5G01V9/00.21 – ИДР 9400316.1 (22) Республика Узбекистан. / Л. И. Морозова. Опубл. 26.04.1994, Бюл. №3 (5). – С. 115.
13. Морозова Л. И. О современных тектонических процессах Туранской плиты и ее горного обрамления (по динамике линейных облачных аномалий над разломами и землетрясениям). // Физика Земли. – 1997 а. – №5. – С. 65-72.
14. Морозова Л. И. Динамика облачных аномалий над разломами в периоды природной и наведенной сейсмичности. // Физика Земли. – 1997б. – С. 94-96.
15. Морозова Л. И. Спутниковый мониторинг землетрясений. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 136с.
16. Морозова Л. И. Опыт использования предвестников на спутниковых снимках в анализе землетрясений. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 132 с.
17. Морозова Л. И. Спутниковый мониторинг: отображение и выявление геоэкологических аномалий и катастроф в Дальневосточном регионе России. // Инженерная экология. – 2008. – №4. – С. 24-31.
18. Морозова Л. И. Облака предвестники землетрясений. // Наука из первых рук. – 2011. – №4 (40). – С. 104-115. http://sciencefirsthand.ru/c40_05_01_morozova.shtml
19. Морозова Л. И. Проявление геодинамической активности земной коры в облачных полях. // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. №4. – С. 541-550.
20. Морозова Л. И. Предвестники сильных землетрясений Охотоморской плиты на спутниковых снимках. // Вестник ОНЗ РАН. – 2015а. – Т. 7. <http://onznews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>
21. Морозова Л. И. Предвестники землетрясения в Непале 28 апреля 2015 г. (M = 7,9) на спутниковых метеорологических снимках. // Вестник ОНЗ РАН. – 2015б. – Т. 7. <http://onznews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>
22. Мушкетов И. В., Мушкетов Д. И. Физическая геология. Т. 1. – Л.: МОНТН НКТП, 1935. – 908 с.
23. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В., Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизи-

ческих процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2015. – № 55. Вып. 4. – С. 521-538. 2015DOI: 10.7868/S0016794015040136

24. Рогожин Е. А. Применение тектонофизических подходов в решении сейсмотектонических задач (на примере Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. на Средних Курилах). // *Физика Земли*. – 2013. – № 5. – С. 47-57.

25. Уломов В. И. Синергетические явления в литосфере и синоптический прогноз сейсмической погоды. // *Структурная организация и взаимодействие упорядоченных социоприродных систем*. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – С. 151-166.

26. Флоренский П. В. Комплекс геолого-геофизических и дистанционных методов для изучения нефтегазоносных областей. – М.: Недра, 1987. – 205 с.

27. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. // *Pure Appl. Geophys.* – 1979. – Vol. 117. No. 5. – pp. 1025–1044.

28. Guo G., Jie Y. Three Attempts of Earthquake Prediction with Satellite Cloud Images. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2013. – No. 13. – pp. 91-95. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-91-2013>

29. Gup G., Xie G. Earthquake cloud over Japan detected by satellite. // *International Journal of Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 28. – pp. 5375-5376.

30. Liperovsky V. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V., Davidov V. F., Bogdanov V. V.: On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2005. – No. 5. – pp. 783-789, <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>, 2005.

31. Ouzounov D., Pulinets S., Liu J-Y, Hattori K., Han P. Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals. // In: *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, Editors (s): Dimitar Ouzounov, Sergey Pulinets, Katsumi Hattori, Patrick Taylor, Publisher: AGU/Wiley. – 2018. – pp. 339-359. doi.org/10.1002/9781119156949.ch20

32. Ouzounov D., Pulinets S., Parrot M., Shen X., Zhang X., Liu T., Hattori K., Davidenko D., Rozhnoi A., Solovieva M., Genzano N., Marchese F., Hernández-Pajares M., García-Rigo A. Validation of the Geosphere Coupling Phenomena Linked to Major Earthquake and Volcanoes Activities by Analyzing Atmospheric. // *Ionospheric Transitional Signals*, IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8-18 July 2019. – 2019.

33. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 41. – pp. 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>

34. Pulinets S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. // *Advances in Space Research*. – 2014. – Vol. 53. – pp. 709-723.

35. Pulinets S. A., Morozova L. I., Yudin I. A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. // *Research in Geophysics*. – 2014. – No. 4:4898. – pp. 45-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>

36. Pulinets S., Ouzounov D. The possibility of earthquake forecasting. // *Learning from Nature*, IOP Publishing, Bristol, December. – 2018. – 167 p. DOI 10.1088/978-0-7503-1248-6, 2018.

References

1. Avenarius I. G., Bush V. A., Treshchov A. A. Using satellite images to study the tectonic structure of the shelves. *Geology and Geomorphology of Shelves and Continental Slopes*. Moscow. Nauka, 1985. pp. 163-172. (In Russ.)

2. Vernadskii V. I. On the gas exchange of the earth's crust. *News of the Imperial Academy of Sciences. Series 6*. 1912. Vol. 6. Issue. 2. pp. 141-162. (In Russ.)

3. Grigor'ev A. A., Kondrat'ev K. Ya. Satellite monitoring of natural and anthropogenic disasters. *Research of the Earth from space*. 1996. No. 3. pp. 68-78. (In Russ.)

4. Dobrovolskii I.P. The theory of preparation of a strong tectonic earthquake. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1992. No. 6. pp. 31-47. (In Russ.)
5. Ezhov B.V. Manifestation of focal morphostructures in the structure of cloudiness and ice cover of water areas by the example of the Okhotsk Sea and Kamchatka. *Morphostructures of the central type of Siberia and the Far East*. Vladivostok. 1988. pp. 124-128. (In Russ.)
6. Ezhov B.V., Ishchenko L.I. Display of tectonic structures in the structure of cloudy and ice sheets. *Morphostructural studies in the Far East*. Vladivostok. Dalnauka, 1983. pp. 114-119. (In Russ.)
7. Eremenko V.Ya., Katterfel'd G.N. The use of space images in the study of regional and global systems of Earth lineaments. *Izvestiya. Universities. Geology and exploration*. 1978. No. 10. pp. 23-29. (In Russ.)
8. Kissin I.G. On a systematic approach to the problem of earthquake prediction. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013. No. 4. pp. 145-160. (In Russ.)
9. Kobets N.V. Geological and geomorphological interpretation of the seabed from space photographs and television images. In: *Proceedings of VSEGEI and LAEM. Application of new types of aerial surveys in geological research*. Leningrad. VSEGEI, 1976. pp. 21-34. (In Russ.)
10. Morozova L.I. Manifestation of the Main Ural Fault in a cloudy field on satellite images. *Exploration of the Earth from space*. 1980. No. 3. pp. 101-103. (In Russ.)
11. Morozova L.I. Cloud indicators of the geodynamics of the earth's crust. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1993. No. 10. pp. 108-112. (In Russ.)
12. Morozova L.I. A method for determining the tectonic activity of a territory in real time. Patent 11-2084. 51-5G01V9/00.21-INDR 9400316.1 (22) Republic of Uzbekistan. Publ. 04/26/1994, Bul. No. 3 (5).p. 115. (In Russ.)
13. Morozova L.I. On the modern tectonic processes of the Turan plate and its mountain frame (according to the dynamics of linear cloud anomalies above faults and earthquakes). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1997a. No. 5. pp. 65-72. (In Russ.)
14. Morozova L.I. Dynamics of cloud anomalies over faults during periods of natural and induced seismicity. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1997b. pp. 94-96. (In Russ.)
15. Morozova L.I. Satellite monitoring of earthquakes. Vladivostok. Dalnauka, 2005. 136 p. (In Russ.)
16. Morozova L.I. Experience of using precursors on satellite images in the analysis of earthquakes. Vladivostok. Dalnauka, 2007. 132 p. (In Russ.)
17. Morozova L.I. Satellite monitoring: displaying and identifying geo-ecological anomalies and catastrophes in the Far East region of Russia. *Engineering ecology*. 2008. No. 4. pp. 24-31. (In Russ.)
18. Morozova L.I. Clouds precursors of earthquakes. *Science First Hand*. 2011. No. 4 (40). pp. 104-115. http://sciencefirsthand.ru/c40_05_01_morozova.shtml (In Russ.)
19. Morozova L.I. Manifestation of geodynamic activity of the earth's crust in cloudy fields. *Geology and Geophysics*. 2012. Vol. 53. No. 4. pp. 541-550. (In Russ.)
20. Morozova L.I. Harbingers of strong earthquakes of the Okhotomorsk plate in satellite images. *Vestn. Otd. Nauk Zemle RAN*. 2015a. Vol. 7. <http://onznnews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>. (In Russ.)
21. Morozova L.I. Precursors of the earthquake in Nepal on April 28, 2015 ($M = 7.9$) in satellite meteorological images. *Vestn. Otd. Nauk Zemle RAN*. 2015b. Vol. 7. <http://onznnews.wdcb.ru/publications/v07/2015NZ000124/2015NZ000124.pdf>. (In Russ.)
22. Mushketov I.V., Mushketov D.I. *Physical geology*. Vol. 1. Leningrad. MONTN NKTP, 1935. 908 p. (In Russ.)
23. Pulinets S.A., Uzunov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V. Physical foundations of generation of short-term precursors of earthquakes. Complex model of geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system, stimulated by ionization. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. No. 55. Issue 4. pp. 521-538. 2015. DOI:10.7868/S0016794015040136. (In Russ.)

24. Rogozhin E.A. Application of tectonophysical approaches in solving seismotectonic problems (on the example of the Simushir earthquakes on November 15, 2006 and January 13, 2007 in the Middle Kuril Islands). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013. No. 5. pp. 47-57. (In Russ.)
25. Ulomov V.I. Synergetic phenomena in the lithosphere and synoptic forecast of seismic weather. Structural organization and interaction of ordered socio-natural systems. Vladivostok. Dalnauka, 1998. pp. 151-166. (In Russ.)
26. Florenskii P.V. Complex of geological-geophysical and remote sensing methods for studying oil and gas bearing areas. Moscow. Nedra, 1987. 205 p. (In Russ.)
27. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Appl. Geophys.* 1979. Vol. 117. No. 5. pp. 1025-1044.
28. Guo G., Jie Y. Three Attempts of Earthquake Prediction with Satellite Cloud Images. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. No. 13. pp. 91-95. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-91-2013>
29. Gup G., Xie G. Earthquake cloud over Japan detected by satellite. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28. pp. 5375-5376.
30. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., Bogdanov V.V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2005. No. 5. pp. 783-789, <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>.
31. Ouzounov D., Pulinets S., Liu J-Y, Hattori K., Han P. Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals. In: *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, Editors (s): Dimitar Ouzounov, Sergey Pulinets, Katsumi Hattori, Patrick Taylor, Publisher: AGU/Wiley. 2018. pp. 339-359. doi.org/10.1002/9781119156949.ch20.
32. Ouzounov D., Pulinets S., Parrot M., Shen X., Zhang X., Liu T., Hattori K., Davidenko D., Rozhnoi A., Solovieva M., Genzano N., Marchese F., Hernández-Pajares M., García-Rigo A. Validation of the Geosphere Coupling Phenomena Linked to Major Earthquake and Volcanoes Activities by Analyzing Atmospheric. Ionospheric Transitional Signals, IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8-18 July 2019. 2019.
33. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. Vol. 41. pp. 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>
34. Pulinets S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *Advances in Space Research*. 2014. Vol. 53. pp. 709-723.
35. Pulinets S.A., Morozova L.I., Yudin I.A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. *Research in Geophysics*. 2014. No. 4:4898. pp. 45-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>.
36. Pulinets S., Ouzounov D. The possibility of earthquake forecasting. *Learning from Nature*, IOP Publishing, Bristol, December. 2018. 167 p. DOI 10.1088/978-0-7503-1248-6, 2018.