

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РАЙОНЕ ОЗ. БАЙКАЛ 22 СЕНТЯБРЯ 2020 Г. ($M = 5.6$)

© 2022 г. В. Г. Бондур^а, *, М. Н. Цидилина^а, Е. В. Гапонова^а, О. С. Воронова^а

^аНаучно исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

Приведены результаты исследования аномальных вариаций различных геофизических полей (линеаментных систем, тепловых полей и параметров ионосферы) в период подготовки и протекания землетрясения с магнитудой 5.6, произошедшего 22 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал. Изложены особенности проведения исследований линеаментных систем, тепловых полей и параметров ионосферы. Выполнен совместный анализ аномальных вариаций геофизических полей, происходящих в литосфере, атмосфере и ионосфере при подготовке землетрясения. По результатам этого анализа были зарегистрированы аномальные вариации: систем линеаментов, проявившиеся за 15 и 6 дней, тепловых полей, проявившиеся за 15 и 14 дней, а также параметров ионосферы, проявившиеся за 8, 7 и 6 дней до исследуемого землетрясения. Выявлены совпадения в появлении максимальных значений систем линеаментов и тепловых полей за 15 и за 6 дней до землетрясения, а также в изменениях состояния ионосферы и тепловых полей, проявившиеся за 9–10 дней и за 4 дня до землетрясения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космические данные, землетрясения, предвестники, геофизические поля, геодинамика, байкальская рифтовая зона

DOI: 10.31857/S0205961422050049

ВВЕДЕНИЕ

На Земле ежегодно происходит около миллиона землетрясений, но большинство из них незначительны и остаются незамеченными. Однако важность и актуальность решения задачи прогнозирования средних ($4 \leq M < 6$) и сильных ($M \geq 6$) землетрясений, следует из потенциально высокой опасности и колоссального ущерба, которые они способны нанести человечеству (Кац и др., 1980; Моги, 1988).

Прогноз землетрясения можно считать полным и практически значимым, если заблаговременно предсказываются три элемента будущего сейсмического события: место, интенсивность (магнитуда) и время толчка. Каждый этап прогноза базируется на определенном наборе предвестников – в основном геофизических явлений, опережающих и предвещающих возникновение землетрясения (Соболев, Пономарев, 2003; Моги, 1988).

Из-за большой неопределенности в отношении распределения напряжений и прочности внутри тектонических плит на Земле, землетрясения являются одной из самых непредсказуемых природных опасностей. С развитием космиче-

ских и информационных технологий появилось огромное количество возможностей, которые открываются перед исследователями (Бондур и др., 2009; Бондур, Зверев, 2005; Бондур, Смирнов, 2005). Дистанционное зондирование Земли из космоса позволяет детально изучать обширные территории, что может оказаться решающим фактором в понимании того, как возникают напряжения на границах тектонических плит и как они передаются на большие расстояния в литосфере, что приводит к формированию сейсмоактивных регионов (Кац и др., 1980; Бондур и др., 2009).

В настоящее время известно множество различных по своей природе потенциальных предвестников землетрясений и множество подходов к их поиску и регистрации (Соболев, Пономарев, 2003). Незвирая на то, что количество различных потенциальных предвестников велико, а уровень развития современных методов их регистрации достаточно высок, с их помощью практически невозможно определить такие важнейшие параметры как: место, время и силу землетрясения с требуемой точностью (Соболев, Пономарев, 2003; Бондур и др., 2009). Это связано, прежде

всего, с тем, что каждый сейсмоопасный район обладает своими уникальными особенностями проявления различных предвестников и оценить их достаточно сложно (Кац и др., 1980; Моги, 1988).

Решение этой проблемы может заключаться в совместном анализе изменений параметров геофизических полей различной природы, регистрируемых из космоса, в процессе подготовки и протекания сейсмических событий, таких как: вариации параметров ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Смирнов и др., 2018; Давиденко, Пулинец, 2019), вариации тепловых аномалий (Бондур, Воронова, 2012, 2020; Pulinets, Ouzounov, 2011; Tramutoli et al., 2013), изменения линеаментных систем (Бондур, Зверев, 2005; Бондур и др., 2016). Кроме того, при совместном анализе могут быть использованы данные геомеханического моделирования (Бондур и др., 2016а, 2016б; Bondur et al., 2020), методы спутниковой радиоинтерферометрии (Бондур и др., 2021; Михайлов и др., 2010), сейсмической энтропии (Акопьян и др., 2017) и др.

В настоящей статье приведены результаты совместного анализа аномальных вариаций различных геофизических полей, проявившихся в литосфере, атмосфере и ионосфере в период подготовки и свершения землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, которое произошло 21 сентября 2020 г. в районе озера Байкал. С целью выявления взаимосвязей между этими вариациями, происходившими под влиянием активизации сейсмической деятельности, был проведен совместный анализ аномальных изменений систем линеаментов, тепловых полей и параметров ионосферы по космическим данным.

Предвестниковые изменения в литосфере анализировались с использованием характеристик линеаментных систем, получаемых путем обработки космических изображений (спутники Terra/Aqua, прибор MODIS), а также вариаций температуры земной поверхности (спутник Aqua, прибор AIRS). Для выявления аномалий в атмосфере, возникающих при подготовке сейсмических событий, исследовались флуктуации температуры приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности и уходящего длинноволнового излучения по данным спутника Aqua, а также скрытого потока тепла по данным спутника NOAA. Для исследования аномалий в ионосфере в процессе подготовки и протекания землетрясений проводился анализ вариаций электронной концентрации ионосферы и полного электронного содержания ионосферы, регистрируемых по данным глобальной навигационной спутниковой системы GPS.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА И ЕГО СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Байкальская рифтовая зона имеет протяженность более 2000 км, относится к внутриконтинентальным зонам растяжения земной коры и расположена на сочленении двух контрастных по температурным и механическим свойствам литосферных мегаблоков: Сибирской платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Благодаря этому район озера Байкал отличается относительно высокой сейсмической активностью, что подтверждается макросейсмическими сведениями о сильных землетрясениях исторического прошлого и информацией более, чем о 250 тыс. землетрясений широкого энергетического диапазона, зарегистрированных инструментально (<http://www.geol.irk.ru/>).

Например, в 1862 г. при одном из сильнейших исторических землетрясений — Цаганском ($M = 7.5$) произошло опускание прибрежного блока и образование залива Провал площадью 203 км² (Лунина и др., 2012). При Среднебайкальском ($M = 6.9$) землетрясении, состоявшемся в 1959 г., произошло опускание участка дна на протяжении примерно 10 км (Seminsky et al., 2021).

За инструментальный период наблюдений Байкальская природная территория (БПТ) характеризовалась высокой сейсмической активностью. В этот период были зарегистрированы сильные землетрясения с магнитудами $M = 5.5$ – 6.5 . (Очковская и др., 2021). Например, Южно-Байкальское землетрясение, состоявшееся 25 февраля 1999 г. ($M = 6.0$) в акватории Байкала на удалении от больших городов. Кичерское землетрясение, произошедшее 21 марта 1999 г. ($M = 6.0$) ощущалось на значительной территории Байкальского региона. Куморское землетрясение, состоявшееся 16 сентября 2003 г. ($M = 5.6$) с наибольшей интенсивностью проявлялось в поселке Уоян на расстоянии около 20 км от эпицентра. Култукское землетрясение, произошедшее 27 августа 2008 г. ($M = 6.3$) ощущалось на большой территории Сибири — от Красноярска на западе до Читы на востоке и от Северобайкальска на севере до Улан-Батора на юге. В ближайшем к эпицентру поселке Култук были повреждены многие здания и жилые дома, пострадало здание школы (http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm).

По данным последних десяти лет, в пределах БПТ в среднем ежегодно регистрировалось более 5 тыс. слабых и сильных землетрясений. Эпицентры 70% из них были расположены в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории (Очковская и др., 2021).

С января по октябрь 2020 г. в районе озера Байкал произошло 8 землетрясений с магнитудами $M > 4$ (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики землетрясений, произошедших в районе озера Байкал с января по октябрь 2020 г.

Дата	Широта	Долгота	Магнитуда
13 февраля 2020 г.	54.0639	109.2806	4.5
15 марта 2020 г.	54.8505	111.7828	4.1
13 апреля 2020 г.	51.8693	100.9311	4.1
6 июля 2020 г.	51.7315	104.6774	4.3
24 июля 2020 г.	53.3176	108.7083	4.5
24 августа 2020 г.	53.4243	109.7848	4.4
22 сентября 2020 г.	51.8569	103.4802	5.6
22 сентября 2020 г.	51.7902	103.4938	4.6

На рис. 1 представлена схема расположения эпицентров землетрясений, произошедших в районе оз. Байкал в 2020 году и главные разломы исследуемого района.

Самое сильное землетрясение из произошедших в 2020 г. в районе оз. Байкал состоялось 22 сентября 2020 г. с магнитудой $M = 5.6$. Его очаг располагался на глубине 10 км в 21 км от поселка Култук на пересечении трех рифтообразующих разломов (Обручевского, Тункинского и Главного Саянского). Движение этих разломов обеспечивает смену режима разрушения земной коры, главным образом связанного с растяжением в

Байкальском Бассейне с преимущественным сдвигом в широтном сегменте юго-западной части рифтовой системы (Seminsky et al., 2021).

Исследуемый район занимает ключевое положение в структуре Байкальской рифтовой системы и отличается относительно низким уровнем недавней активности. Это позволяет рассматривать его как область накопления напряжений, разрядка которых при неблагоприятном сценарии может привести к землетрясению сильнее Култукского ($M = 6.3$) и Быстринского землетрясений ($M = 5.4$) (Seminsky et al., 2021).

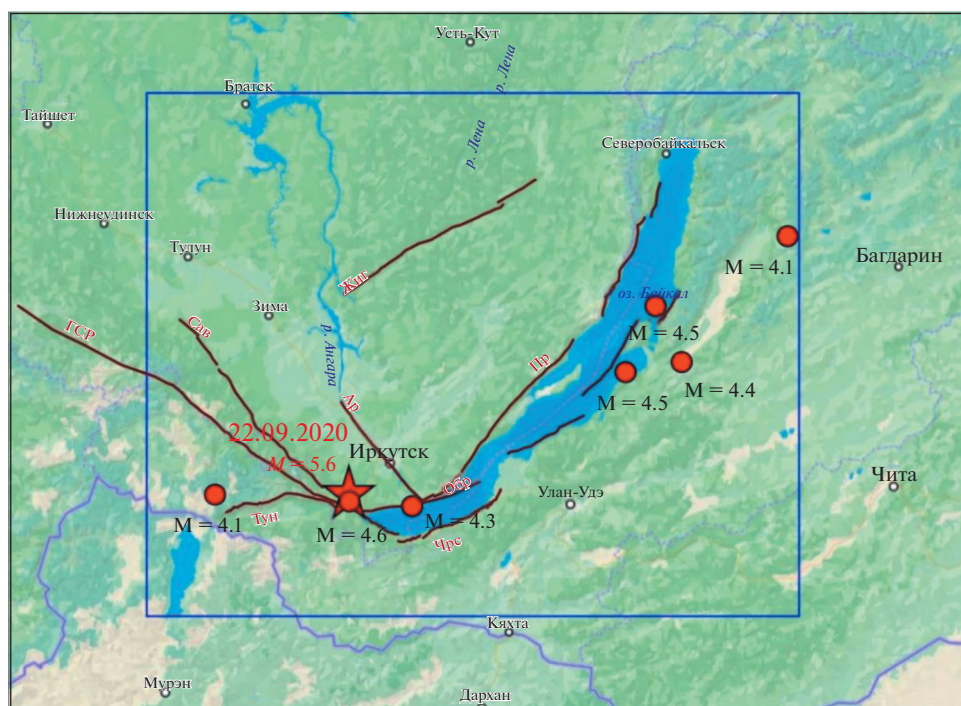


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений, произошедших в районе оз. Байкал в 2020 году. Звездочкой указан эпицентр исследуемого землетрясения, произошедшего 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$). Линиями обозначены главные разломы: ГСР-Главный Саянский разлом; Сав-Савинский; Ар-Ангарский; Жиг-Жигаловский; Тун-Тункинский; Чрс-Черского; Обр-Обручевский; Пр-Приморский.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления предвестниковой изменчивости при подготовке и протекании землетрясения, произошедшего 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$) в районе оз. Байкал проводился совместный анализ изменений систем линеаментов, температуры земной поверхности, температуры приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, скрытого потока тепла, уходящего длинноволнового излучения и полного электронного содержания ионосферы.

На первом этапе были определены пространственные границы области для анализа вариаций исследуемых геофизических полей, которые зависят от магнитуды землетрясения и анализируемых параметров. Как правило, границы исследований соответствуют наиболее активной зоне с захватом фоновых территорий.

Радиус зоны активизации сейсмической деятельности определялся по формуле (Добровольский и др., 1980):

$$R = 10^{0.43M}, \quad (1)$$

где M – магнитуда землетрясения.

Для землетрясения с $M = 5.6$ этот радиус составляет около 260 км.

Таким образом, принимая во внимание необходимость учета фоновых территорий и особенностей параметров исследуемых линеаментных систем, тепловых полей и параметров ионосферной плазмы, описанных ниже, анализ их изменений при подготовке и протекании исследуемого землетрясения производился для зоны, радиусом около 400 км от его эпицентра.

На втором этапе проводилась обработка космических данных для выявления аномальных вариаций исследуемых геофизических полей.

Анализ систем линеаментов осуществлялся по космическим изображениям, полученным со спутника Тerra (аппаратура MODIS) с разрешением 250 м (продукт MOD02QKM). Использование для линеаментного анализа фрагментов космических изображений, размерами менее 400×400 пикселей (100×100 км) могло привести к потере некоторых линейных структур и невозможности выделения их главных простираций, а фрагменты, размерами больше 2000×2000 пикселей (500×500 км) сложно анализировать из-за малой точности определения эпицентральной зоны и наличия большого количества мелких особенностей (Бондур и др., 2016; Бондур, Гапонова, 2021). Поэтому для дальнейшей обработки были выбраны фрагменты космических изображений эпицентральной зоны (с исключением поверхности воды) размерами 100×100 км (400×400 пикселей), собранных за период времени с 25 мая по 6 октября 2020 г.

Оценка расположения штрихов разных направлений изучаемой области осуществлялась путем автоматизированного линеаментного анализа (Бондур и др., 2016). Для каждой точки штриха определялось его направление с точностью до 22.5° для восьми направлений: 0° , 22.5° , 45° , 67.5° , 90° , 112.5° , 135° , 157.5° (угол измеряется от горизонтали справа–налево) (Короновский и др., 1986; Златопольский, 2008). Далее проводился статистический анализ штрихов (локальных линеаментов) и построение протяженных линеаментов (региональных). В скользящем окне рассчитывались суммарные длины штрихов каждого направления, плотности штрихов, линии вытянутости и др. (Бондур и др., 2016; Бондур, Гапонова, 2021). Результаты расчетов использовались для построения региональных роз-диаграмм и обобщающих схем исследований временного ряда данных с целью выявления предвестниковых аномалий (Бондур, Зверев, 2005).

При исследовании тепловых полей анализировались информационные продукты 3-го уровня обработки данных прибора AIRS, формировавшиеся с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Hearty et al., 2013): температура поверхности (SST); температура приповерхностного слоя атмосферы (SAT); относительная влажность у поверхности (RHS); уходящее длинноволновое излучение (OLR) (Бондур, Воронова, 2012). Вариации скрытого потока тепла (LHF) исследовались с использованием набора данных реанализа, находящихся на облачной платформе для геопространственного анализа Google Earth Engine национального центра прогноза окружающей среды (NCEP) (Saha, et al. 2011). Пространственное разрешение набора данных составляло 22 км.

Обработка данных для выявления пространственно-временных вариаций значимых параметров исследуемых тепловых полей (SST, SAT, RHS, OLR) проводилась с использованием специально разработанного программного модуля (Бондур, Воронова, 2020). Разработанный программный модуль позволял оценить качество полученных данных, устранить ошибочные значения, а также рассчитать нормализованный индекс (N_i). Для получения нормализованного индекса использовался подход, при котором находилась разница между данными текущего значения параметров-предвестников и их осредненными многолетними значениями за ту же дату. Полученные разности делились на стандартные отклонения, что позволило повысить надежность результатов и исключить систематические ошибки (Бондур, Воронова, 2020):

$$N_i = (S_d - S^*)/\sigma, \quad (2)$$

где S_d – данные за текущий день; S^* – среднее арифметическое прошлых лет; σ – стандартное отклонение.

Аналогично был рассчитан и нормализованный индекс (N_i) для значений скрытого потока тепла (LHF).

Описанная процедура давала возможность преобразовать диапазоны значений в числовые признаки, которые не зависели от единиц измерений при сопоставлении результатов, полученных для различных исследуемых параметров. Анализ полученных результатов проводился на основе построенных тепловых карт нормализованных значений для выявления положительных аномалий тепловых полей в период подготовки свершившегося сейсмического события.

Исследования вариаций параметров ионосферы осуществлялись на основании данных глобальной навигационной спутниковой системы GPS с использованием двух методик.

Исследование высотных изменений (профилей) электронной концентрации ионосферы проводилось с использованием методики, описанной в работе (Бондур, Смирнов, 2005). Методика основана на восстановлении параметров ионосферы путем реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли, в котором используются измерения параметров радиосигналов, полученных с существующих спутниковых навигационных систем (Бондур, Смирнов, 2005). В этом методе практически реализуется алгоритм решения обратных задач рефракции радиоволн, неустойчивых по своей природе и требующих применения специальных математических методов, позволяющих учитывать дополнительную информацию о решаемой задаче (Андрианов, Смирнов, 1993; Бондур, Смирнов, 2005). В результате обработки навигационных данных были получены высотные профили электронной концентрации ионосферы вдоль траекторий подионосферных точек для высот от 80 до 1000 км с дискретностью 30 с по данным наземной станции $irkj$, находящейся на расстоянии 72 км к северо-востоку от эпицентра исследуемого землетрясения.

Были исследованы также изменения полного электронного содержания ионосферы (TEC) с использованием глобальных ионосферных карт (GIM), построенных по данным глобальной навигационной спутниковой системы GPS (Noll, 2010). Глобальные ионосферные карты GIM содержат значения TEC с разрешением 2.5° по широте (от $87.5^\circ N$ до $87.5^\circ S$) и 5.0° по долготе ($180^\circ E$ до $180^\circ W$). Карты формируются с двухчасовым интервалом. Процедуры моделирования и экстраполяции, используемые при их построении, позволяют получать данные для территорий с малым количеством наземных станций (Noll, 2010). Несмотря на низкое пространственное разрешение этих карт, они обеспечивают в настоящее время наилучшую доступность и наибольшую эффективность данных.

Для анализа вариаций ионосферной плазмы в период подготовки и протекания землетрясения,

состоявшегося 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$) в районе оз. Байкал, были получены значения полного электронного содержания (TEC) в исследуемом регионе. По полученным данным для каждого временного интервала были рассчитаны относительные значения ΔTEC (в %):

$$\Delta TEC = ((TEC - MTEC) / MTEC) \times 100\%, \quad (3)$$

где TEC – значения полного электронного содержания, полученные из глобальных ионосферных карт GIM;

MTEC – значения медианы, которые рассчитывались скользящим окном за 7 предшествующих суток.

Использование ΔTEC позволяло отфильтровать ежедневные изменения TEC, связанные с колебаниями уровня ультрафиолетового излучения Солнца, которое заметно влияет на формирование ионосферы (Pulinets et al, 2021).

На заключительном этапе исследований для выявления взаимосвязей между различными геофизическими полями проводился совместный анализ аномальных вариаций систем линеаментов, тепловых полей и параметров ионосферы (Бондур и др., 2020).

Для оценки результатов линеаментного анализа были построены графики локальных и региональных линеаментов. При использовании программного пакета LESSA были получены значения суммарного количества локальных линеаментов (в пикселях), которые пересчитывались в их суммарные длины (в км) по каждому из восьми направлений, в результате чего строились и анализировались графики изменения суммарной длины локальных линеаментов разных направлений (Бондур, Гапонова, 2021). По розам-диаграммам региональных линеаментов были построены графики их величин для максимально проявленных направлений.

Для проведения совместного анализа проводилось осреднение нормализованных значений температуры поверхности (SST), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT), относительной влажности (RHS), скрытого потока тепла (LHF), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительных значений ΔTEC для области в радиусе 400 км от эпицентра произошедшего землетрясения. Период исследований для совместного анализа этих данных составлял 20 дней до землетрясения и 3 дня после него.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты исследований геодинимических аномалий. Предвестниковые изменения линеаментных систем анализировались по результатам автоматизированного линеаментного анализа фрагментов космических изображений размера-

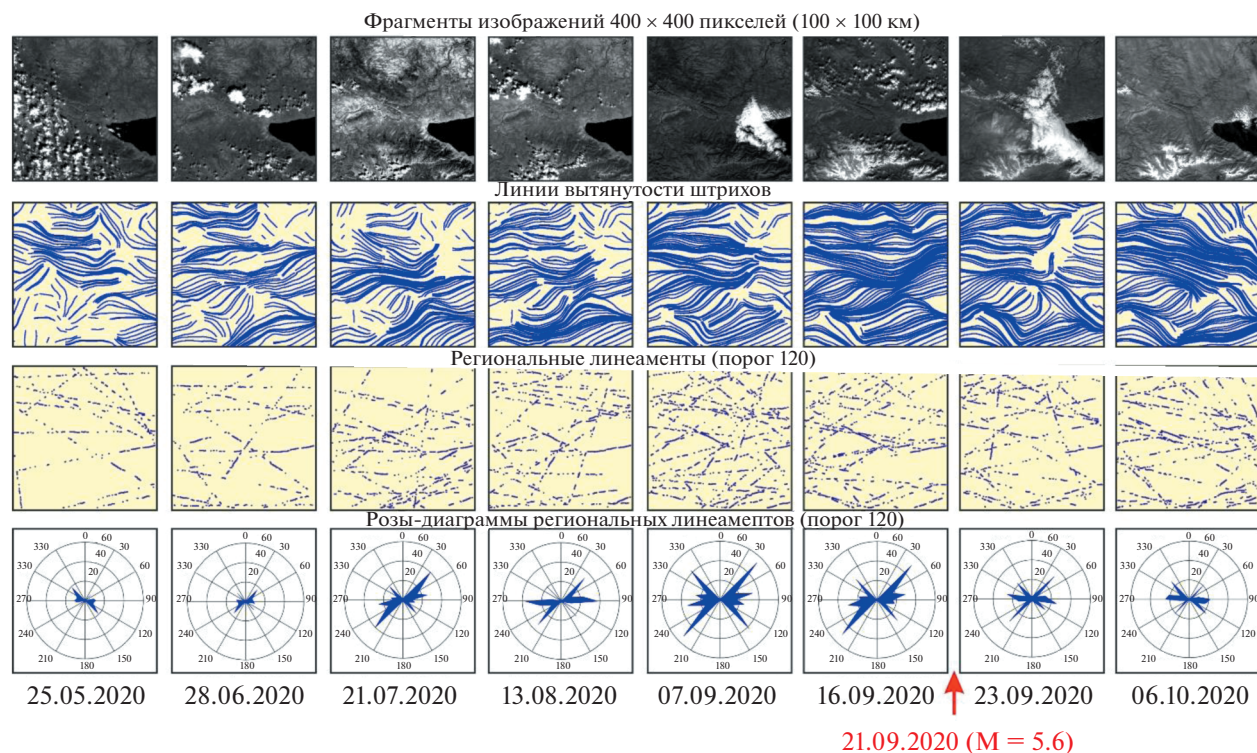


Рис. 2. Схемы и розы-диаграммы региональных линеаментов и линии вытянутости штрихов для землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал с магнитудой 5.6.

ми 100×100 км, полученных со спутника Terra (аппаратура MODIS) для периода времени, начиная с 25 мая по 6 октября 2020 г., для эпицентральной области исследуемого землетрясения. В процессе обработки фрагментов спутниковых изображений были построены линии вытянутости штрихов, сквозные (региональные) линеаменты, а также розы-диаграммы региональных линеаментов (Бондур, Гапонова, 2021), которые представлены на рис. 2.

Из анализа рис. 2 следует, что преимущественное развитие имеют диагональные системы линеаментов, связанные с планетарной системой трещиноватости, а также широтные и субширотные направления линеаментов, проявляющиеся в схемах линий вытянутости штрихов и региональных линеаментов. Это подтверждается общим строением исследуемой территории, так как внутри Тункинской рифтовой долины главную роль играют северо-восточные и субширотные разрывные нарушения (Бондур, Гапонова, 2021). Линии вытянутости начинают сгущаться и объединяться 7 сентября 2020 г. (за 2 недели до сейсмического события), а их максимальное проявление было зафиксировано 16 сентября 2020 г. (за 6 дней до землетрясения).

Анализ роз-диаграмм региональных линеаментов позволил выявить, что при приближении к моменту землетрясения начитается постепенный рост диагональных направлений северо-за-

падного — юго-восточного, а также северо-восточного — юго-западного направлений, а их уменьшение после землетрясения, начиналось с 21 июля 2020 г. При этом максимальный рост региональных линеаментов диагональных направлений был зафиксирован 7 сентября 2020 г., т.е. за 2 недели до сейсмического события (для направления 45° и 315°) и 16 сентября 2020 г. (для направления 45°).

Результаты исследований тепловых аномалий. На рис. 3 представлены результаты обработки спутниковых данных для выявления пространственно-временных вариаций значимых параметров тепловых полей (SST, SAT, RHS, LHF и OLR).

Анализ изменений тепловых полей, приведенных на рис.3, позволил выявить их положительные аномалии в период подготовки землетрясения в районе оз. Байкал, произошедшего 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$). За 14 дней (7 сентября 2020 г.) до сейсмического события по данным уходящего длинноволнового излучения OLR была выявлена положительная аномалия над эпицентральной областью готовящегося землетрясения (рис. 3), для которой значение нормализованного индекса составило величину $N_i = 1.3$. Аномалии температуры земной поверхности (SST), и температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT) были обнаружены за 13 дней (8 сентября 2020 г.) до землетрясения (значения нормализо-

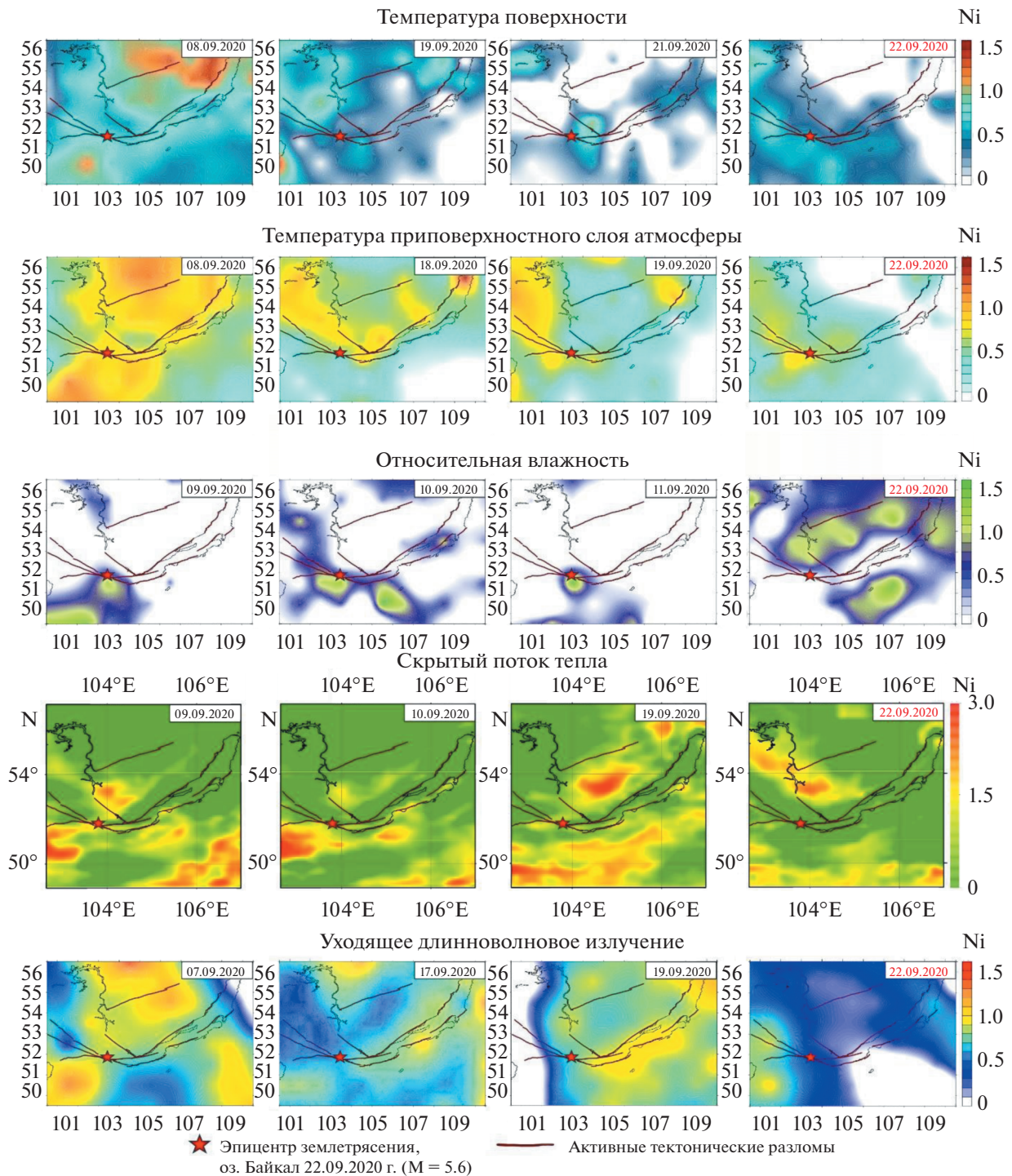


Рис. 3. Изменения тепловых полей в период подготовки землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. (M = 5.6).

ванных индексов доходили до $N_i = 1.3$). Их расположение совпадало с расположением аномалией уходящего длинноволнового излучения (см. рис. 3).

Повышение температуры над эпицентральной областью перед землетрясением вызывало интенсивное взаимодействие между сушей и атмосферой,

которое приводило к аномальному потоку скрытой теплоты испарения перед землетрясением (Dey and Singh, 2003). Данный процесс подтвердился в результате выявления аномалий скрытого потока тепла (LHF) в эпицентральной области, зафиксированных 9 и 10 сентября 2020 г. (см. рис. 3).

Скрытый поток тепла сильно зависит от метеорологических параметров, одним из которых является относительная влажность (Рубакина и др., 2021). В области высоких значений относительной влажности (до $N_i = 1.4$), выявленных с 9 по 11 сентября 2020 г. вблизи эпицентра готовящегося землетрясения (см. рис. 3), также присутствовали минимальные значения скрытого потока тепла в эти дни.

Анализ рис. 3 показал, что за 5 дней до исследуемого сейсмического события (17 сентября 2020 г.) над областью активных тектонических разломов была зафиксирована аномалия уходящего длинноволнового излучения (OLR), для которой значение нормализованного индекса достигало величины $N_i = 0.9$. За 3–4 дня (18 и 19 сентября 2020 г.) до этого землетрясения в области активных тектонических разломов были обнаружены аномалии температур и уходящего длинноволнового излучения. За день до землетрясения наблюдалась положительная аномалия температуры земной поверхности (значение нормализованного индекса $N_i = 1$).

Анализ рис. 3 показал, что в день землетрясения (22 сентября 2020 г.) в эпицентральной области этого сейсмического события также наблюдались аномалии температур, относительной влажности и уходящего длинноволнового излучения (SST, SAT, RHS, LHF и OLR).

Результаты исследований ионосферных аномалий. Исследование электронной концентрации ионосферы проводилось по данным наземной станции глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS irkj, находящейся на расстоянии 72 км к северо-востоку от эпицентра землетрясения (см. рис. 4, г). Для анализа были выбраны вертикальные распределения электронной концентрации ионосферы на высотах от 80 до 1000 км, построенные по данным, поступавшим на станцию irkj со спутников, № 7 и № 27 ГНСС GPS (см. рис. 4, а, б). Эти спутники находились над областью активизации сейсмической деятельности в ночное время суток (время пролета спутника № 7 – 1:00–5:00, спутника № 27 – 0:00–4:00). Траектории подионосферных точек спутников № 7 и № 27 приведены на рис. 4, г.

Анализ рис. 4, а и 4, б позволил выявить наличие периодов падения и роста электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы с 2 по 25 сентября 2020 г. По данным спутника № 7 было зарегистрировано падение электронной концентрации относительно предыдущего дня: 6, 12 и 17 сентября 2020 г. (за 16, 10 и 5 дней до землетрясения) на 7%, а также 21 сентября 2020 г. (за один день до землетрясения) на 14% (см. рис. 4, а). После падений наблюдался рост электронной концентрации. В периоды роста максимальные значения электронной концентрации ионосферы относительно предшествующих им дней падения

наблюдались: 10, 15 и 18 сентября 2020 г. (за 12, 7 и 4 дня до землетрясения). Превышение составляло: 14, 31 и 15% соответственно (см. рис. 4, а).

Анализ результатов обработки данных, полученных со спутника № 27, позволил выявить похожую картину вариаций ионосферной плазмы в максимуме слоя F2 ионосферы (см. рис. 4, б): падение значений электронной концентрации ионосферы, происходившее 6, 11 и 17 сентября 2020 г. (за 16, 11 и 5 дней до землетрясения) на 14%, а также 21 сентября 2020 г. (за один день до землетрясения) на 20%; рост значений электронной концентрации ионосферы, происходивший 8–10 сентября 2020 г. (за 12–14 дней до землетрясения) на 20%, а также 13 и 14 сентября 2020 г. (за 8–9 дней до землетрясения) на 21–37%. Максимальное повышение электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы (на 21%) было выявлено 14 сентября и 18 сентября 2020 г. (за 4 и 8 дней до землетрясения).

На рис. 4, в приведены относительные изменения полного электронного содержания ионосферы (ΔTEC), полученные по данным глобальных ионосферных карт GIM. Анализ полученных результатов позволил выявить аномальные области относительных значений полного электронного содержания ΔTEC (см. рис. 4, в). Наличие положительных ночных аномалий ΔTEC (см. рис. 4, в) в области подготовки землетрясения наблюдалось с двух до четырех часов местного времени 7–10 сентября 2022 г. ($\Delta\text{TEC} = 15\text{--}28\%$). Обширная положительная ночная аномалия полного электронного содержания ионосферы ($\Delta\text{TEC} = 21\text{--}36\%$) была зарегистрирована с 13 по 15 сентября 2022 г. (см. рис. 4, в).

Положительная ионосферная аномалия ($\Delta\text{TEC} = 16\text{--}20\%$) была выявлена также в дневное время 14 и 15 сентября 2020 г. (см. рис. 4, в).

Физический механизм образования положительных ночных ионосферных аномалий перед землетрясением может быть связан с определенным поведением планетарного пограничного слоя атмосферы. В результате происходящей сейсмической активности генерируется сильное вертикальное электрическое поле, направленное вниз, способствующее образованию таких аномалий в ночное время (Пулинец и др. 2010).

В то же время 20 сентября (за два дня до землетрясения) в 20 и 22 ч, а также 21 сентября 2020 г. (за один день до землетрясения) с 0 до 6 ч местного времени были выявлены отрицательные аномалии полного электронного содержания ионосферы ($\Delta\text{TEC} = -20\%\dots-30\%$) (см. рис. 4, в).

Наличие как положительных, так и отрицательных аномалий при подготовке сейсмического события может быть связано с региональными особенностями исследуемой территории и требует проведения дополнительных исследований.

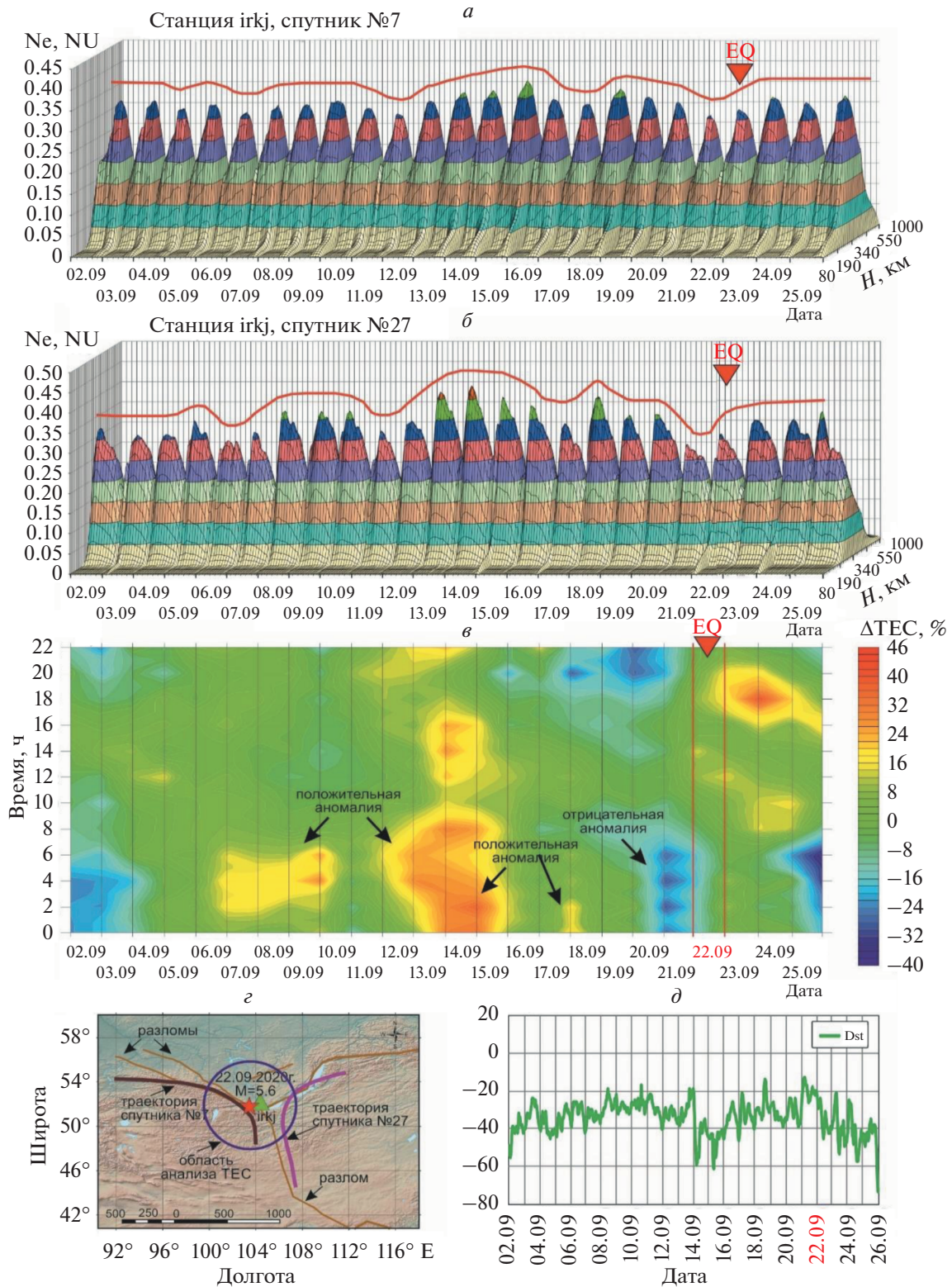


Рис. 4. Динамика ионосферной плазмы в период со 2 по 25 сентября 2020 г. при подготовке землетрясения 22 сентября 2020 г. в районе озера Байкал ($M = 5.6$): временные ряды вертикальных распределений электронной концентрации ионосферы на высотах от 80 до 1000 км по данным спутников № 7 (рис. 4, *a*) и № 27 (рис. 4, *б*); относительные изменения TEC (*в*). Схема расположения эпицентра землетрясения, наземной станции ГНСС, траектории подионосферных точек спутников № 7 и № 27, область анализа TEC (*г*). Изменения индекса геомагнитной активности Dst (*д*).

Для исключения из анализа эффектов, связанных с возмущением геомагнитного поля Земли, было рассмотрено поведение индекса геомагнитной активности D_{st} в исследуемый период времени (см. рис. 4, д). Анализ рис. 4, д показал, что 14 и 15 сентября 2020 г. были зарегистрированы умеренные возмущения геомагнитного поля Земли ($D_{st} = -59$ нТл и $D_{st} = -61$ нТл соответственно). Максимальные значения индекса геомагнитной активности D_{st} 14 и 15 сентября наблюдались с 11 до 18 ч местного времени, следовательно, положительная дневная аномалия полного электронного содержания ионосферы, обнаруженная 14 и 15 сентября 2020 г., может быть связана с геомагнитными возмущениями.

Таким образом, анализ вертикальных профилей электронной концентрации ионосферы, построенных на основании результатов обработки данных спутниковой навигационной системы GPS, позволил выявить падения электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы на 7–20%, наблюдавшееся за 16, 11, 5 дней и за 1 день до исследуемого землетрясения, а также рост электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы: на 14–20% за 12–14 дней, на 21–37% за 7–9 дней и на 15–21% за 4 дня до исследуемого землетрясения. Были также зарегистрированы положительные (за 12–15 дней и за 7–9 дней до землетрясения) и отрицательные (за 1–2 дня до землетрясения) ночные аномалии полного электронного содержания ионосферы.

Анализ геомагнитной обстановки в период со 2 по 26 сентября 2020 г. позволил отнести выявленные аномалии к сейсмоионосферным эффектам.

Для подтверждения сейсмической природы выявленных ионосферных аномалий необходимо проанализировать поведение других геофизических полей.

Совместный анализ аномалий различных геофизических полей. На рис. 5 представлены графики изменения длин локальных (штрихов) и региональных линеаментов разных направлений за период времени с 25 мая по 6 октября 2020 г.

Из анализа рис. 5 следует, что предвестниковая цикличность в количественных изменениях суммарных длин линеаментов разных направлений проявляется в постепенном росте (или убывании) их значений при приближении к моменту землетрясения. Общая тенденция увеличения суммарных (осредненных) длин штрихов характерна для направлений 45° , 67° , 90° , 293° , 315° , то есть штрихи, совпадающие с расположением основных морфоструктур региона (зоны растяжения земной коры).

Общая тенденция уменьшения суммарных (осредненных) длин штрихов проявляется для направлений 0° , 22° , 338° , то есть штрихи поперечные к основным морфоструктурам региона (зоны

сжатия земной коры). Максимальный рост этих штрихов для направлений 45° , 67° , 90° , 293° , 315° был зафиксирован 7 сентября 2020 г. (за 15 дней до землетрясения), а максимальные уменьшения суммарных (осредненных) длин штрихов для направлений 0° , 22° , 338° был зафиксирован 16 сентября 2020 г. (за 6 дней до землетрясения). На графиках роз-диаграмм региональных линеаментов максимально проявленные диагональные направления (45° , 315°) достигают пиковых значений роста 7 и 16 сентября 2020 г. (за 15 и 6 дней до землетрясения).

За 15 дней до землетрясения (7 сентября 2020 г.) также выявлен рост нормализованных значений уходящего длинноволнового излучения (OLR). В области нижних слоев атмосферы ощущается непосредственное влияние земной поверхности. Основными воздействиями на поверхность являются сопротивление, нагрев (или охлаждение) и испарение (или конденсация). Эти процессы вызывают вертикальные потоки импульса, ощутимого тепла и влаги, которые проникают в нижние слои атмосферы (Prasad et al., 2005).

Описанные выше процессы подтверждаются результатами, приведенными на рис. 6, на котором представлены осредненные, в соответствии с описанной выше методикой, значения исследуемых параметров: температуры поверхности (SST), приповерхностного слоя атмосферы (SAT), относительной влажности (RHS), скрытого потока тепла (LHF), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительных значений полного электронного содержания (Δ ТЕС).

Анализ рис. 6 демонстрирует резкое повышение нормализованных значений температуры поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), а также понижение нормализованных значений относительной влажности (RHS), выявленное за две недели до свершившегося землетрясения. За 13 дней до этого землетрясения (8 сентября 2020 г.) обнаружен рост значений скрытого потока тепла (LHF), который находился в противофазе изменений уходящего длинноволнового излучения (OLR), а с 13 по 21 сентября 2020 г. характер изменения их нормализованных значений практически совпадал.

Анализ рис. 6 показал, что за 12 дней до сейсмического события (10 сентября 2020 г.) было выявлено повышение температур (SST, SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR), а также относительных значений полного электронного содержания (Δ ТЕС). В этот же день была обнаружена положительная аномалия относительной влажности (см. рис. 6) в области готовящегося землетрясения.

За 7–9 дней до землетрясения (13–15 сентября 2020 г.) был обнаружен максимум относительных значений полного электронного содержания Δ ТЕС (см. рис. 6). В эти же дни было зарегистрировано падение значений температур (SST,



Рис. 5. График изменения (а) суммарных (осредненных) длин локальных линеаментов разных направлений и (б) величин роз-диаграмм региональных линеаментов для землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. (M = 5.6).

SAT), скрытого потока тепла (LHF) и уходящего длинноволнового излучения (OLR), а также рост значений влажности (RHS) (см. рис. 6). За 6 дней (16 сентября 2020 г.) до землетрясения, состоявшегося 22 сентября 2020 г., максимально проявлялись линеаменты СВ–ЮЗ (45°) направления.

С 16 по 19 сентября 2020 г. (за 3–6 дней до землетрясения) был выявлен рост нормализованных значений тепловых полей SST, SAT, LHF и OLR (см. рис. 6). Рост значений нормализованного индекса влажности (RHS) был выявлен 16 сентября 2020 г. (за 6 дней до землетрясения), а их уменьшение было обнаружено с 17 по 19 сентября 2020 г. (за 3–5 дней до землетрясения). При этом падение относительных значений полного электронного содержания ΔTEC было выявлено 16 и 17 сентября 2020 г. (за 5–6 дней до землетрясения) и его рост 18 сентября 2020 г. (за 4 дня до землетрясения) (см. рис. 6).

Наличие корреляции между колебаниями температуры воздуха (Garavaglia et al., 2000) и относительной влажности (Prasad et al., 2005) были продемонстрированы во время нескольких сильных землетрясений в Мексике (Pulinets et al., 2006), где подтвердилась возможность использования данных параметров в качестве индикаторов предстоящей сейсмической активности.

С приближением момента сейсмического удара атмосферные процессы сопровождаются повышением влажности и падением температур (Pulinets et al., 2006). Это подтверждается и проведенными нами исследованиями, когда за 2 дня до землетрясения (20 сентября 2020 г.) понижение температур сопровождалось ростом относительных значений влажности (см. рис. 6). При этом в верхних слоях атмосферы наблюдалось небольшое понижение OLR (с 0.5 до 0), а в ионосфере сильное падение относительных значений пол-

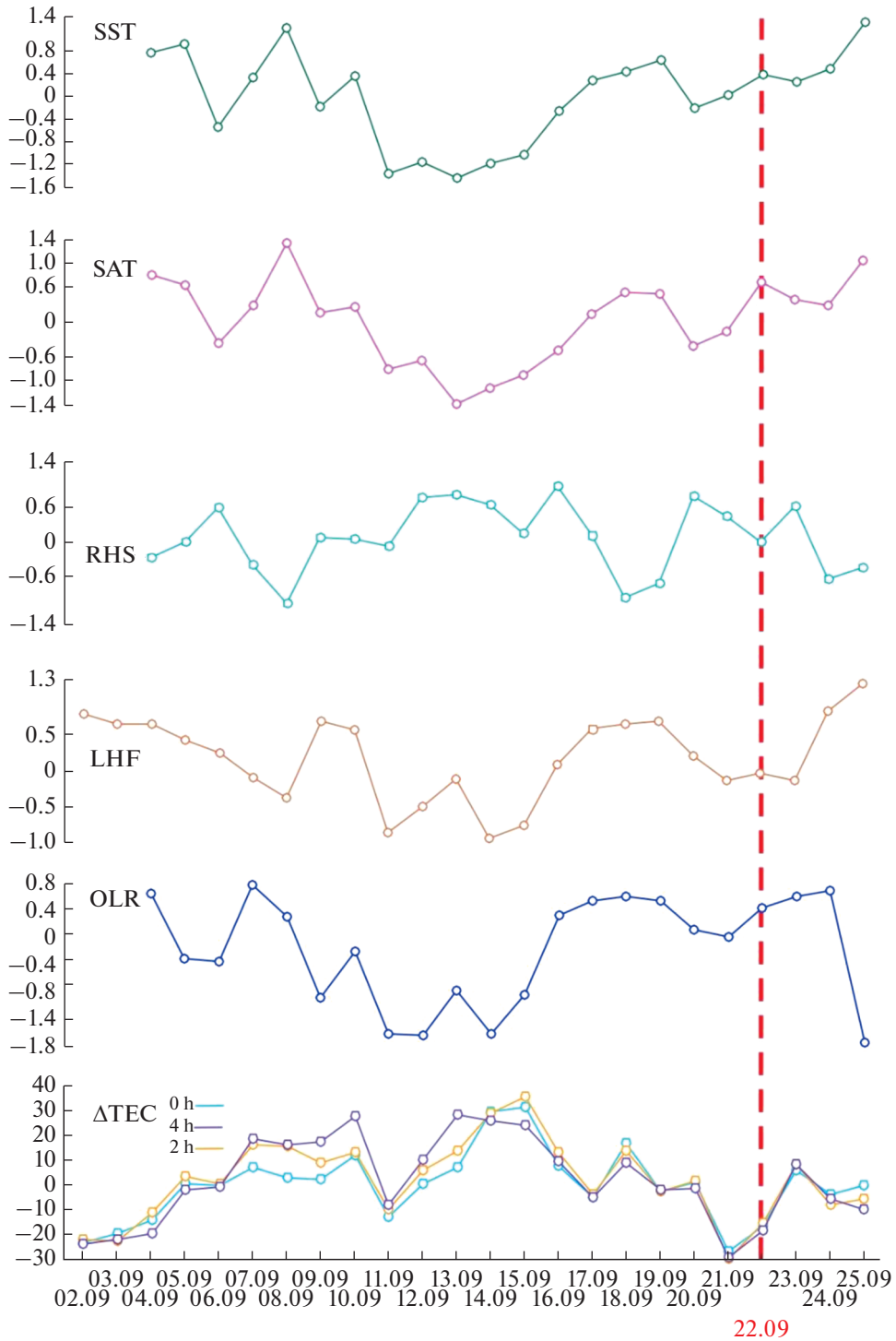


Рис. 6. Вариации осредненных в радиусе 400 км от эпицентра землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$), нормализованных значений температур поверхности (SST), приповерхностного слоя атмосферы (SAT), относительной влажности (RHS), скрытого потока тепла (LHF), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительных значений полного электронного содержания (ΔTEC).

ного электронного содержания ($\Delta\text{TEC} = -30\%$) непосредственно перед землетрясением (см. рис. 6).

На рис. 7 представлен обобщенный график появления предвестниковых аномалий систем

линементов, тепловых полей и параметров ионосферы при подготовке землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. ($M = 5.6$).

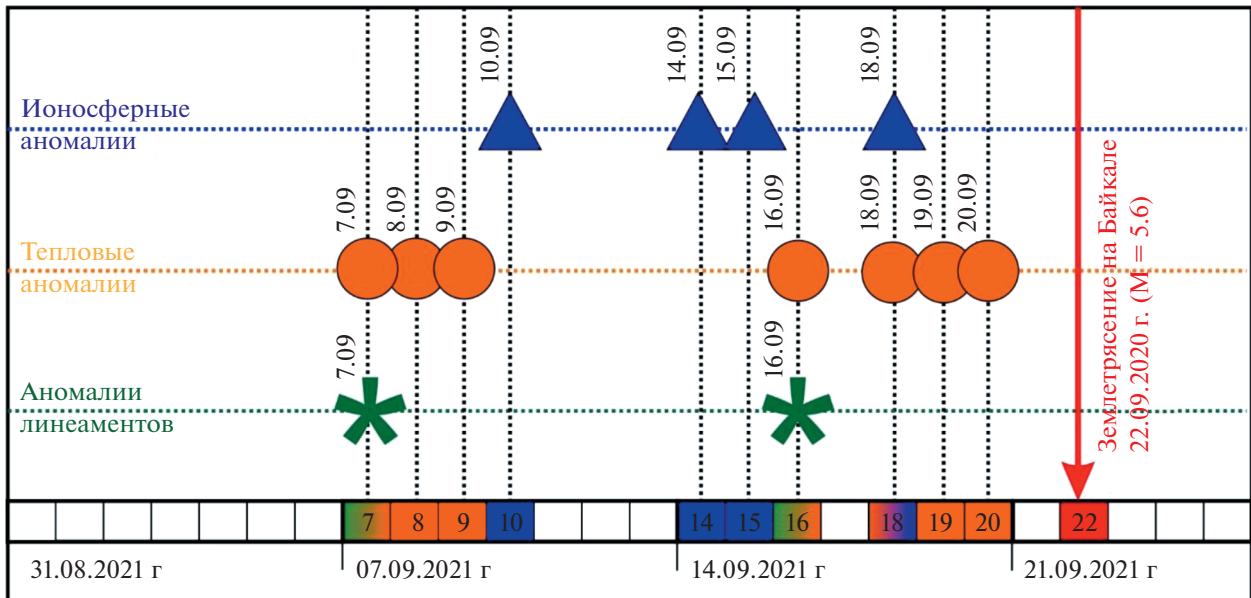


Рис. 7. График появления максимальных значений (предвестниковых аномалий) систем линеаментов, тепловых полей и параметров ионосферы при подготовке землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. (M = 5.6).

Проведенный совместный анализ показал (см. рис. 7), что первые предвестниковые изменения для этого землетрясения были зарегистрированы 7 сентября 2020 г. (за 15 дней до землетрясения). Они проявлялись в максимальных значениях суммарных длин штрихов линеаментов для направлений 45°, 67°, 90°, 293°, 315° и в росте уходящего длинноволнового излучения (OLR). За 14 дней (8 сентября 2020 г.) до землетрясения были проявлены максимальные значения температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT). Пиковые значения скрытого потока тепла (LHF) были выявлены 9 сентября 2020 г. (за 13 дней до землетрясения), а на следующий день 10 сентября 2020 г. (за 12 дней до землетрясения) был обнаружен рост относительных значений полного электронного содержания ионосферы (ΔTEC), достигший максимальных значений, который повторился 14–15 сентября 2020 г. (за 7–8 дней до землетрясения). За 6 дней до землетрясения (16 сентября 2020 г.) были зарегистрированы максимальные проявления систем линеаментов СВ-ЮЗ направления (45°) и рост значений относительной влажности (RHS). За 4 дня до землетрясения (18 сентября 2020 г.) был зафиксирован максимальный рост относительных значений полного электронного содержания ионосферы (ΔTEC), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR). За 3 дня до землетрясения (19 сентября 2020 г.) был выявлен рост значений температуры земной поверхности (SST) и скрытого потока тепла (LHF). За 2 дня до

землетрясения (20 сентября 2020 г.) были зарегистрированы максимальные значения относительной влажности (RHS).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проведены исследования аномальных вариаций различных геофизических полей, проявляющихся в изменениях систем линеаментов, тепловых полей и вариаций ионосферной плазмы при подготовке и протекании землетрясения с магнитудой M = 5.6, состоявшегося 22 сентября 2020 г. в районе оз. Байкал.

По результатам автоматизированного линеаментного анализа космических изображений выявлены основные направления линеаментных систем, которые соответствуют общему разломно-блоковому строению исследуемой территории, а также их предвестниковые изменения, зарегистрированные 7 сентября 2020 г. (за 15 дней до землетрясения) и 16 сентября 2020 г. (за 6 дней до землетрясения). Выявленная закономерность показывает, что в период подготовки землетрясения увеличивается выраженность штрихов согласных с простираем основных морфоструктур региона и уменьшается проявленность поперечных к ним штрихов, что обусловлено увеличением проницаемости земной коры и ее уменьшением соответственно.

В результате анализа изменений тепловых полей (температур поверхности, приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, скрытого потока тепла и уходящего длинноволнового излучения) были обнаружены предвест-

никовые изменения, проявившиеся в эпицентральной зоне готовящегося землетрясения, которое произошло в области активных тектонических разломов. Повышение нормализованных значений уходящего длинноволнового излучения было зафиксировано за 15 дней до землетрясения, затем за 14 дней до него наблюдались аномалии температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, а за 13 дней до сейсмического события были обнаружены аномалии скрытого потока тепла (LHF).

Максимальные превышения нормализованных значений относительной влажности (RHS) были выявлены за 6 дней до произошедшего землетрясения. При приближении к моменту землетрясения были зафиксированы аномалии приповерхностного слоя атмосферы (SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR) 18 сентября 2020 г. (за 4 дня до землетрясения), 19 сентября 2020 г. (за 3 дня до землетрясения) аномалии температуры поверхности (SST) и скрытого потока тепла (LHF) и 20 сентября 2020 г. (за 2 дня до землетрясения) аномалии относительной влажности (RHS).

Анализ высотных профилей электронной концентрации ионосферы за 20 дней до и 3 дня после землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22.09.2020 г. ($M = 5.6$), позволил выявить периоды падения и роста электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы. Падение электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы на 7–20% было зарегистрировано по данным спутников № 7 и № 27 глобальной спутниковой навигационной системы GPS 6, 11, 17 и 21 сентября 2020 г. (за 16, 11, 5 и 1 день до землетрясения), причем максимальное падение было выявлено за день до землетрясения и составило 20%. Рост электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы был зарегистрирован: 8–10 сентября 2020 г. (за 12–14 дней до землетрясения) на 14–20%; 13–15 сентября 2020 г. (за 7–9 дней до землетрясения) на 21–37%; 18 сентября 2020 г. (за 4 дня до землетрясения) на 15–21%.

Анализ относительных значений полного электронного содержания ионосферы позволил выявить их положительные аномалии за 12–15 дней и за 7–9 дней до землетрясения ($\Delta\text{TEC} = 15\text{--}36\%$), формирование которых может быть связано с поведением планетарного пограничного слоя атмосферы. За один день до землетрясения была зарегистрирована также отрицательная ночная аномалия полного электронного содержания ионосферы ($\Delta\text{TEC} = -20\text{--}-30\%$).

По результатам совместного анализа были выявлены совпадения в появлении максимальных значений систем линеаментов и тепловых полей за 15 и за 6 дней до землетрясения, а также в изменениях состояния ионосферы и тепловых полей, проявившиеся за 9–10 дней и за 4 дня до землетрясения.

Таким образом, предложенная методика совместного анализа различных геофизических полей по космическим данным позволила выявить наличие предвестниковых проявлений в вариациях систем линеаментов, тепловых полей и параметров ионосферы в период подготовки землетрясения, произошедшего в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта № 122011800095-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Андрюханов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 7. С. 1326.
- Бондур В.Г., Воронова О.С. Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 году // Изв. ВУЗов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2012. № 1. С. 79–85.
- Бондур В.Г., Воронова О.С. Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ($M = 6.1$) и 24 января 2020 г. ($M = 6.7$) // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 3–16.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линеаментных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 г. // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120–132. А
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В. Предвестниковая изменчивость линеаментных систем, выявляемых по космическим изображениям, в период сильных землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 3–12.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416030027>
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009, 692 с.

- Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С.* Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 3–24. <https://doi.org/10.31857/S0205961420050036>
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Докл. Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 144–150. <https://doi.org/10.31857/S268673972108003X>
- Давиденко Д.В., Пулинец С.А.* Детерминированная изменчивость ионосферы в преддверии сильных ($M \geq 6$) землетрясений в регионах Греции и Италии по данным многолетних измерений // Геомагнетизм и аэронаука. 2019. Т. 59. № 4. С. 529–544. <https://doi.org/10.1134/S0016794019040084>
- Добровольский И.А., Зубков С.И., Мячкин В.И.* Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясения / Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, С. 7–14. 1980.
- Златопольский А. А.* Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) / А.А. Златопольский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 102–112.
- Короновский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н.* (1986) Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исследование Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.
- Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С.* По следам Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале: результаты исследования вторичных косейсмических деформаций в рыхлых осадках // Геология и геофизика, 2012. Т. 53. № 6. С. 775–796
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н.М., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
- Моги К.* Предсказание землетрясений // М.: Мир. 1988. 382 с.
- Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В.* Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэронаука. 2010. Т.50. № 2. С. 240–252.
- Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Цидилина М.Н., Гапонова М.В.* Сейсмоионосферные вариации во время сильных землетрясений на примере землетрясения 2010 г. в Чили // Космические исследования. 2018. Т. 56. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.31857/S002342060000347-9>
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003, 270 с.
- Очковская М.Г., Гилева Н.А., Радзиминович Я.Б.* Сейсмичность в пределах Байкальской природной территории за период цифровой регистрации // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XV Международной сейсмологической школы, Новосибирск, 06–10 сентября 2021 года. Обнинск: Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, 2021. С. 62.
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.* Revealing Short-Term Precursors of the Strong $M > 7$ Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // Front. Earth Sci. 2020. 8:571700. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Noll C.* The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, Advances in Space Research. V. 45. Iss. 12. 15 June 2010. P. 1421–1440. ISSN 0273-1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D.* From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake. A Look from a 20-Year Perspective // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>
- Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // J. Asian Earth Sci. 41. 371–382. 2011.
- Tramutoli V., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Martinelli G., Pergola N.* On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST), Chem. Geol., 339, 157–168, 2013.
- Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., San'kov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., P'yasova A.M., Salko D.V., San'kov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M.* The Bystrinskoe Earthquake in the Southern Baikal Region (21 September 2020, $M_w = 5.4$): Main Parameters, Precursors, and Accompanying Effects // Russ. Geol. Geophys. (2021) 62(5): 589–603. <https://doi.org/10.2113/RGG20204296>
- Prasad B.S.N., Nagaraja K., Chandrashekara M.S., Paramesh L., Madhava M.S.* (2005). Diurnal and seasonal variations of radioactivity and electrical conductivity near the surface for a continental location Mysore, India. Atmospheric Research, 76(1–4). 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.011>
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* (2006). The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 31(4–9), 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Garavaglia M., Dal Moro G., Zadro M.*, 2000. Radon and tilt measurements in a seismic area: temperature effects. Phys. Chem. Earth 25, 233–237
- Saha S. et al.* 2011, updated daily. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>

Dey S., Singh R.P.: Surface latent heat flux as an earthquake precursor, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 749–755. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-749-2003>

Рубакина В.А., Кубрякова А.А., Станичный С.В. Сезонная и суточная изменчивость характеристик термиче-

ского скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев // *Исслед. Земли из космоса*. 2021. № 3. С. 30–44.

<https://doi.org/10.31857/S020596142102007X>

Joint Analysis of Anomalous Variations of Different Geophysical Fields According to Satellite Data during M5.6 Earthquake Preparation in the Area of Lake Baikal on 22 September 2020

V. G. Bondur¹, M. N. Tsidilina¹, E. V. Gaponova¹, and O. S. Voronova¹

¹*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia*

The results of a study of anomalous variations in different geophysical fields (lineament systems, thermal fields and ionospheric parameters) during the preparation and occurrence of a 5.6-magnitude earthquake, which happened on 22 September 2020 near the lake Baikal, are given. The features of studies of lineament systems, thermal fields and ionospheric parameters are outlined. A joint analysis of anomalous variations in geophysical fields occurring in the lithosphere, atmosphere, and ionosphere during an earthquake preparation has been carried out. Based on the results of this analysis, anomalous variations were recorded: lineament systems, which manifested themselves 15 and 6 days, thermal fields, which manifested themselves 15 and 14 days, and ionospheric parameters, which manifested themselves 8, 7, and 6 days before the studied earthquake. Correlation was found in the appearance of the maximum values of lineament systems and thermal fields 15 and 6 days before the earthquake, as well as in changes in the state of the ionosphere and thermal fields, which manifested themselves 9–10 days and 4 days before the earthquake.

Keywords: remote sensing, satellite data, earthquakes, precursors, geophysical fields, geodynamics, Baikal rift zone

REFERENCES

Akopian S.Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A. Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. <https://doi.org/10.1134/S10693513170100>.

Andrianov V.A., Smirnov V.M. Opredelenie vysotnogo profilya elektronnoy konsentratsii ionosfery Zemli po dvukhchastotnym izmereniyam radiosignalov iskusstvennykh sputnikov Zemli (Determination of the altitude profile of the electron concentration of the Earth's ionosphere from two-frequency measurements of radio signals from artificial Earth satellites) // *Radiotekhnika i elektronika*. 1993. V. 38. № 7. P. 1326. (In Russian).

Bondur V.G., Voronova O.S. Variatsii ukhodyashchego dlinovolnogo izlucheniya pri podgotovke i protekaniy sil'nykh zemletryaseniy na territorii Rossii v 2008 i 2009 godu (Outgoing longwave radiation variations during preparation and occurrence of strong earthquakes in Russia in 2008 and 2009) // *Izvestiya vuzov. Geodeziya i Aerofotosemka*. 2012. № 1. P. 79–85. (In Russian).

Bondur V.G., Voronova O.S. Study of Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey on March 8, 2010 (M = 6.1), and January 24, 2020 (M = 6.7) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 991–1002. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>

Bondur V.G., Gaponova Ye.V. Remotely Registering Anomalous Variations in Lineament Systems of the Baikal Rift Zone during the M = 5.6 Earthquake of September 21, 2020 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 1012–1020. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090437>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016. V. 52. № 1.

P. 117–128.

<https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B. Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*, 2016. V. 466. № 2. P. 183–186.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>

Bondur V.G., Zverev A.T. A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*, 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.

Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E. Precursor Variability of Lineament Systems Detected Using Satellite Images during Strong Earthquakes. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 1283–1291.

<https://doi.org/10.1134/S0001433819090123>

Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinyh V.P. Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof (Monitoring and forecasting of the natural disasters). Moscow: Nauchnyy mir, 2009. 692 p. (In Russian)

Bondur V.G., Smirnov V.M. Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Joint Analysis of Anomalies of Different Geophysical Fields, Recorded from Space during Precursors of Strong Earthquakes in California // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020. V. 56. № 12. P. 1502–1519. <https://doi.org/10.1134/S000143382012035X>

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 near Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*, 2021. V. 499. Part 2. P. 648–653. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21080031>

- Davidenko D.V., Pulinets S.A.* Deterministic variability of the ionosphere on the eve of strong ($m \geq 6$) earthquakes in the regions of Greece and Italy according to long-term measurements data / *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. T. 59. № 4. C. 493–508.
<https://doi.org/10.1134/S001679321904008X>
- Dobrovolsky I.P.* Estimation of the size of earthquake preparation zones / *I.P. Dobrovolsky, S.I. Zubkov, V.I. Miachkin // Pure and Applied Geophysics*. 1979. V. 117. № 5. P. 1025–1044.
<https://doi.org/10.1007/BF00876083>
- Zlatopolskiy A.A.* Metodika izmereniya orientatsionnykh kharakteristik dannykh distantsionnogo zondirovaniya (tekhnologiya LESSA) (Technique for measuring orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology)) // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008. Iss. 5. V. 1. P. 102–112. (In Russian).
- Koronovskii N.V.* Structural analysis of space imagery via computer-aided interpretation / *N.V. Koronovskii, A.A. Zlatopol'skii, G.N. Ivanchenko // Soviet J. Remote Sensing*. 1990. V. 6. № 1. P. 114–121.
- Lunina O.V., Andreev A.V., Gladkov A.S.* The Tsagan earthquake of 1862 on lake Baikal revisited: a study of secondary coseismic soft-sediment deformation // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. T. 53. № 6. C. 594–610.
- Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Polyakov S.A., Diamant M., Shapiro N.* Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of ALTAI (CHUIA) earthquake of september 27, 2003 / *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. T. 46. № 2. C. 91–103.
- Mogi K.* Earthquake Prediction. Academic Press, Tokyo, 1985. 355 p.
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50. № 2. P. 231–242.
<https://doi.org/10.1134/S0016793210020118>
- Smirnov V.M., Smirnova E.V., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Seismo-Ionospheric Variations during Strong Earthquakes Based on the Example of the 2010 Earthquake in Chile // *Cosmic Research*, 2018. V. 56. № 4. P. 310–318.
<https://doi.org/10.1134/S0010952518040068>
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseny i predvestniki (Earthquake physics and precursors). Moscow: Nauka, 2003. P. 270. (In Russian)
- Ochkovskaya M.G., Gileva N.A., Radziminovich I.B.* Seismicity within the Baikal natural territory for the digital registration period // *Modern methods of processing and interpretation of seismological data – Abstracts of the XV International Seismological Workshop Novosibirsk, Russia*, September 6–10, 2021. P. 62.
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.* Revealing Short-Term Precursors of the Strong $M > 7$ Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Front. Earth Sci*. 2020. 8: 571700.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Noll C.* The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, *Advances in Space Research*. V. 45. Iss. 12. 15 June 2010. P. 1421–1440. ISSN 0273-1177.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50. № 2. P. 231–242.
<https://doi.org/10.1134/S0016793210020118>
- Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.*, 41, 371–382, 2011.
- Tramutoli V., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Martinelli G., Pergola N.* On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST), *Chem. Geol.*, 339, 157–168, 2013.
- Seminsky K.Zh., Bormyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., San'kov V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Il'yasova A.M., Salko D.V., San'kov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M.* The Bystrinskoe Earthquake in the Southern Baikal Region (21 September 2020, Mw = 5.4): Main Parameters, Precursors, and Accompanying Effects // *Russ. Geol. Geophys.* (2021) 62(5): 589–603.
<https://doi.org/10.2113/RGG20204296>
- Prasad B.S.N., Nagaraja K., Chandrashekara M.S., Paramesh L., Madhava M.S.* (2005). Diurnal and seasonal variations of radioactivity and electrical conductivity near the surface for a continental location Mysore, India. *Atmospheric Research*, 76(1–4), 65–77.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.011>
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* (2006). The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4–9), 143–153.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Garavaglia M., Dal Moro G., Zadro M.* 2000. Radon and tilt measurements in a seismic area: temperature effects. *Phys. Chem. Earth* 25, 233–237
- Saha S. et al.* 2011, updated daily. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
<https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>
- Dey S., Singh R.P.* Surface latent heat flux as an earthquake precursor, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 749–755.
<https://doi.org/10.5194/nhess-3-749-2003>, 2003.
- Rubakina V. A. Kubryakov A., Stanichny S.* “Seasonal and Diurnal Variability of the Thermal Skin Layer Characteristics Based on a Comparison of Satellite Measurements by SEVIRI and Data from Temperature-Profiling Drifters.” *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 57 (2021): 950–961.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821090607>