

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ
ЛИНЕАМЕНТНЫХ СИСТЕМ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ
В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С МАГНИТУДОЙ $M = 5.6$,
СОСТОЯВШЕГОСЯ 21 СЕНТЯБРЯ 2020 ГОДА**

© 2021 г. В. Г. Бондур^а, *, Е. В. Гапонова^а

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

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 28.01.2021 г.

В настоящей работе приводятся результаты исследований аномальных вариаций линейных систем в период подготовки землетрясения с магнитудой 5.6, которое произошло 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал в 21 км от поселка Култук на глубине 10 км. Описана методика проведения исследований, путем автоматизированного линейного анализа космических изображений. Проанализированы особенности строения Байкальской рифтовой зоны и ее сейсмическая активность. На основании обработки ряда космических изображений, полученных со спутника Тегга (аппаратура MODIS) за период времени с 25 мая по 6 октября 2020 г., построены схемы линий вытянутости штрихов, схемы региональных линейных систем и их розы-диаграммы, а также рассчитаны суммарные длины локальных линейных систем и отношения их длин для разных направлений, позволившие выявить аномальные вариации линейных систем за 14 и за 5 дней до землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. Сделан вывод о принадлежности этих аномалий к геодинамическим предвестникам землетрясения.

Ключевые слова: космические изображения, дистанционное зондирование, землетрясения, сейсмоопасные территории, геодинамика, линейные системы, байкальская рифтовая зона

DOI: 10.31857/S0205961421020020

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность решения проблемы предупреждения и прогнозирования землетрясений не вызывает сомнений, так как это позволит снизить негативные последствия, наносимые такими опасными природными явлениями (Киссин, 2013; Моги, 1988; Keilis-Borok et al., 2009). Для решения этой проблемы большое значение имеют поиск и регистрация предвестников значительных сейсмических событий (с магнитудами $M > 5$) (Соболев, Пономарев, 2003). Одним из наиболее перспективных подходов к регистрации различных предвестников землетрясений на обширных сейсмоопасных территориях является использование методов и средств дистанционного зондирования (Бондур и др., 2009, 2020; Tronin, 2010) и обработки данных (Бондур, 2014).

В настоящее время известен ряд методов регистрации из космоса предвестников различной физической природы, среди них такие как: методы выявления вариаций параметров ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010), методы регистрации тепловых аномалий (Бондур, Воронова, 2012; Бондур и др., 2020; Бондур и др.,

2018; Ouzounov et al., 2007), методы спутниковой радиоинтерферометрии (Бондур и др., 2021), методы регистрации изменений характера линейных систем (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007; Бондур и др., 2016; Гапонова и др., 2019; Bondur, Kuznetsova, 2005), методы совместного анализа аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса (Бондур и др., 2018, 2020). Кроме того, для решения проблем исследования сейсмоопасных территорий используются методы, основанные на использовании геомеханических моделей (Бондур и др., 2007, 2010, 2016; Bondur et al., 2020), а для прогноза землетрясений различные методы (Keilis-Borok et al., 2009), в том числе метод сейсмической энтропии (Акопян и др., 2017) и др.

Одними из перспективных предвестников значительных сейсмических событий (магнитуды $M > 5$) являются линейные системы, выявляемые путем обработки космических изображений (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007; Бондур и др., 2016). Эти системы играют важную роль при создании структурных моделей эпицентральных зон крупных землетрясений и определении кинематики

матики активных разломов. Анализ линеаментных систем позволяет выявить особенности подготовки землетрясений и афтершоковых процессов (Бондур, Зверев, 2007; Бондур и др., 2016; Гапонова и др., 2019).

Дистанционное зондирование предоставляет возможности детального изучения обширных территорий, что может оказаться решающим фактором в понимании того, как напряжения, возникающие на границах тектонических плит, например в зонах коллизий, передаются в литосфере на большие расстояния, что и приводит в модели “тектоники плит” к формированию внутриконтинентальных сейсмоактивных регионов (Аэрокосмические, 2000; Бондур и др., 2009; Кац и др., 1980).

Современные методы выявления и изучения линеаментов сводятся к автоматизированному дешифрированию космических изображений с использованием набора различных дешифровочных признаков (Бондур, 2014; Бондур, Зверев, 2007). Космические изображения обладают такими свойствами, как большая обзорность, объективность отображения характера земной поверхности и естественная генерализация (Бондур и др., 2009; Аэрокосмические..., 2000). В связи с этим они являются тем материалом, который позволяет наиболее полно и всесторонне оценить степень тектонической нарушенности земной коры (Кац и др., 1986; Бондур, Зверев, 2007). Чем ниже пространственное разрешение космических изображений, тем выше уровень генерализации и тем более глубинные структуры отображаются на них (Аэрокосмические..., 2000; Корчуганова, Корсаков, 2009). Поэтому для мониторинга процессов, предшествующих землетрясению, целесообразно использовать изображения с пространственным разрешением порядка первых сотен метров. Благодаря такой генерализации, появляется возможность отслеживания динамики широких линеаментных зон, соответствующих целым системам разломов (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007).

Степень выраженности на космических изображениях разноориентированных зон в линеаментных системах, т.е. их “физиономичность”, различна. Она зависит как от уровня генерализации и спектральных диапазонов этих изображений, так и от петрофизических контрастов, обусловленных разной обводненностью зон трещиноватости и прилегающих горных пород (Бондур, Зверев, 2007). Так как оптические контрасты сухих и сырых грунтов увеличиваются с увеличением длины волны, то при выделении линеаментов целесообразнее использовать красную или ближнюю инфракрасную зону спектра электромагнитных волн (Бондур, Зверев, 2005б, 2007; Бойков, Корниенко, 2007). Таким образом, для монито-

ринга аномальных вариаций линеаментных систем в сейсмоопасных регионах наиболее оптимальными источниками данных являются космические изображения среднего разрешения красной или ближней инфракрасной зоны спектра электромагнитных волн, получаемые с высокой периодичностью (Бондур, Зверев, 2007; Бондур и др., 2016).

В настоящей статье приведены результаты исследования аномальных вариаций линеаментных систем Байкальской рифтовой зоны в период подготовки и свершения землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, которое произошло 21 сентября 2020 г., с использованием методов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Байкальская впадина рассматривается как внутриконтинентальный рифт. Рифтовые впадины часто вмещают крупные озера. Эти линейные грабеновые структуры ограничены с одной или двух сторон разломами (сбросами и сдвигами) и разделены перемычками, в которых на поверхность выходят древние породы фундамента (Актуальные..., 2005). Впадины вместе с осложняющими ее структурами и сопровождающими горными поднятиями (плечами) и составляют рифт (Мац и др., 2014). Рифты формируются в условиях напряжений растяжения, тогда как все структуры континентальной земной коры существуют в условиях сжатия. Вследствие этого блоки, разделенные рифтом, отдаляются друг от друга, что на ранней стадии развития и приводит к образованию континентальных впадин, которые разделяют отодвигающиеся блоки. Особенности строения Байкальской впадины, вещественный состав ее донных отложений, а также протекающие в них физико-химические процессы и явления свойственны океанам и неизвестны в других пресноводных озерах (Мац и др., 2014).

По геологическим и геофизическим данным установлено, что Байкальская рифтовая зона, протяженностью более 2000 км, расположена на сочленении двух контрастных по температурным и механическим свойствам литосферных мегаблоков: Сибирской платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Рифтовая система составлена из сложной последовательности впадин (15 отдельных впадин), разделенных поднятиями (межвпадинными перемычками) и ограниченными крупными тектоническими разломами, параллельными рифту, секущими рифт и свидетельствующих о сложнейшей истории растяжения рифта (Байкал..., 2009). Сибирская платформа является крупным и достаточно стабильным мегаб-

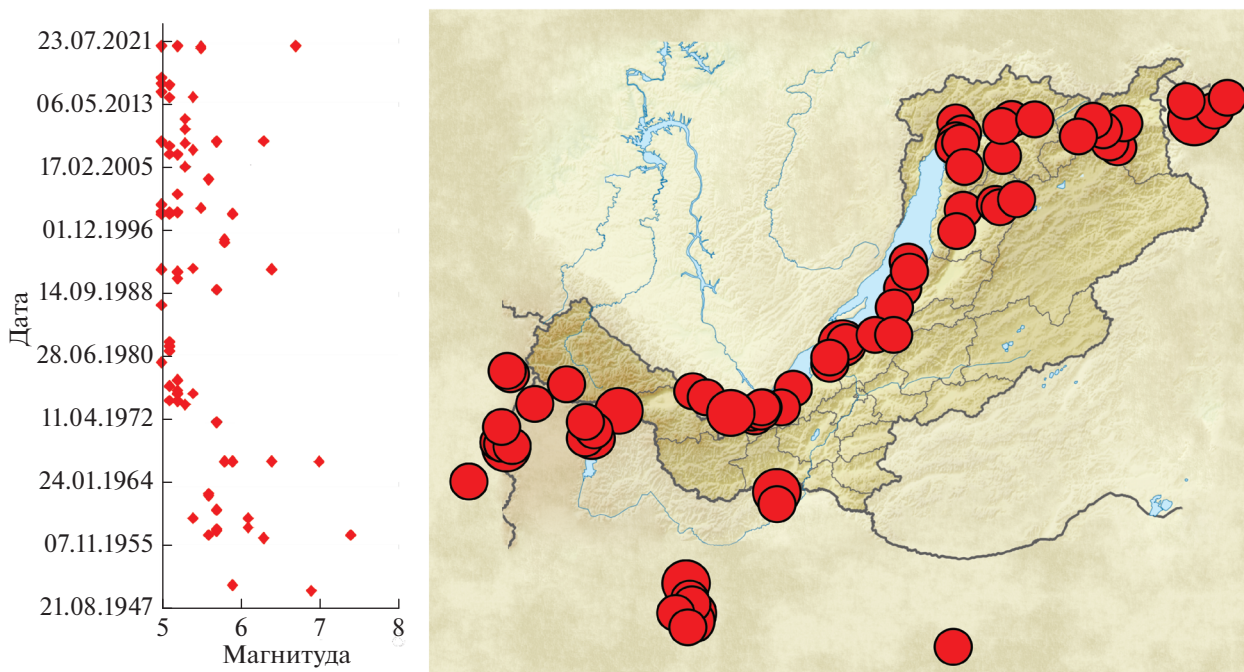


Рис. 1. Эпицентры землетрясений на территории Байкальской рифтовой зоны с $M > 5$ за последние 70 лет.

локом со слабой сейсмической активностью. Центральнo-Азиатскому подвижному поясу свойственна рассеянная сейсмичность, свидетельствующая о мозаичном сочленении отдельных микроплит и блоков, располагающихся между тремя литосферными плитами – Индостанской, Евразийской и Амурской. Байкальская система рифтовых разломов и впадин характеризуется концентрированной сейсмичностью, тяготеющей к байкальским впадинам (Актуальные..., 2005). Для Байкальской рифтовой системы принципиальное значение в структурном плане придается Главному Саянскому, Тункинскому, Приморскому, Баргузинскому, Кичерскому, Верхне-Муйскому, Кодарскому, Токкинскому и некоторым другим разломам. Большинство из выделенных разломов – структуры глубинного заложения (Лунина и др., 2007).

Структурное положение и динамика разломов в Байкальской рифтовой зоне являются следствием перемещения сосуществующих внутриконтинентальных литосферных блоков в юго-восточном направлении для центральной части Байкальской рифтовой зоны и правосторонних взбросо-сдвиговых смещений Восточного Саяна относительно Сибирской платформы (Вилор и др., 2015). На юго-западном фланге рифта векторы смещений отражают поворот Тувино-Саянской части по часовой стрелке со сдвигами по Главному Саянскому разлому и Тункинскому разлому при участии растяжения. В высокосей-

смичной срединной части рифтовой зоны, включающей Байкальскую и Баргузинскую впадины, субгоризонтальные оси растяжения, поперечные к преобладающим структурам, определяют сбросовый тип разломов, в том числе Баргузинского (Актуальные..., 2005; Вилор и др., 2015). Все крупнейшие региональные разломы Байкальской рифтовой зоны отличаются ярко проявленной кайнозойской активизацией, считаются долгоживущими и заложены по древним разломным зонам. Кайнозойская активизация региональных разломных зон способствовала развитию Байкальской рифтовой системы (Байкал..., 2009).

Байкальский регион имеет высокую сейсмичность – это одна из наиболее сейсмически активных внутриконтинентальных областей планеты. В среднем каждый год здесь происходит около 10 землетрясений различной силы. За последние 70 лет на территории Байкальской рифтовой зоны произошло более 600 землетрясений (по данным <https://earthquake.usgs.gov>), из которых более 70 сильных с $M > 5$ (см. рис. 1).

В настоящей работе исследовано землетрясение с магнитудой $M = 5.6$, которое произошло 21 сентября 2020 г. (18:04:57 UTC) вблизи оз. Байкал. Очаг землетрясения располагался в 21 км от поселка Култук (51.857° с.ш., 103.480° в.д.) на глубине 10 км.

Таблица 1. Данные о землетрясениях, произошедших вблизи оз. Байкал в период времени июль–сентябрь 2020 г.

Дата	Магнитуда	Широта	Долгота
06.07.2020	4.3	51.732°	104.677°
24.07.2020	4.5	53.318°	108.708°
31.07.2020	4.1	51.729°	98.196°
24.08.2020	4.4	53.424°	109.785°
13.09.2020	4.4	54.800°	111.935°
21.09.2020	5.6	51.857°	103.480°
21.09.2020	4.6	51.790°	103.494°

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первым шагом при проведении исследований являлся сбор, обработка и анализ космических изображений для обнаружения линейных элементов (штрихов). Методы обнаружения таких элементов на космических изображениях состоят в анализе локальных участков фрагментов этих изображений (окон) (Bondur, Kuznetsova, 2005) и в поиске в этих окнах отрезков прямых линий или прямых границ областей разной оптической плотности путем построения так называемых масок (Zlatopolsky, 1992). При этом предполагается, что штрихи делят изображение в окнах на группы элементов, которые различаются по яркости, а в масках указывается, как должны располагаться элементы этих групп, если в окне имеется прямая граница или линия определенного направления (Бондур, Зверев, 2005б; Zlatopolsky, 1992, 1997).

Сравнение фрагментов изображений в окнах с заданными масками происходит следующим образом. Вычисляется средняя яркость фрагментов изображения, соответствующих однотипным элементам масок, и определяются разности этих средних, которые называются откликами масок. Абсолютная величина отклика характеризует интегральное сходство маски и изображения в окне (Zlatopolsky, 1992, 1997). Описанная операция представляет собой согласованную линейную пространственную фильтрацию изображений. При этом для каждой точки штрихов определяется направление с дискретностью 22.5° (Златопольский, 2008; Zlatopolsky, 1997). На полутоновых изображениях выделяются прямые участки границ областей разной яркости. В цифровых моделях рельефа выявляются спрямленные участки границ склонов (Zlatopolsky, 1992, 1997).

Вторым шагом проведения исследований являлся анализ совокупности выделенных штрихов. Задавая регулярную сетку областей или строя области интерактивно, пользователь имел возможность получать розы-диаграммы штрихов. Для

этого внутри каждой области находилось число точек в штрихах каждого направления. Далее в интерактивном режиме просматривались полученные результаты. Задавался порог выраженности линеаментов и на фоне исходного изображения выделялись штрихи, которые формируют линеаменты с указанными характеристиками. При увеличении порога остаются наиболее выраженные (проявленные на космическом изображении) сквозные прямые-линеаменты (Златопольский, 2008). Для совместного анализа могут комбинироваться изображения линеаментов с разной ориентацией и выраженностью (Бондур, Зверев, 2005а, б).

В отличие от визуального дешифрирования, в нашем случае выделялись не генерализованные мелкие штрихи, образующие линеаменты, а наиболее выраженные сквозные линеаменты. При этом обеспечивалась возможность изучения внутренней структуры крупных линеаментов. Изменяя ширину полосы поиска линеаментов, имелась возможность выделять широкие линейные зоны сгущения мелких штрихов, оценивать соотношение разрывных зон по ширине.

На следующем этапе проведения исследований выполнялся статистический анализ выявленных линеаментных систем, который позволяет получить скрытую информацию, касающуюся закономерностей пространственного распределения линейных текстур. С использованием этих данных производится анализ геодинамических особенностей исследуемой сейсмоопасной территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Исследуемое землетрясение с магнитудой $M = 5.6$ произошло 21 сентября 2020 г. в период повышенной сейсмической активности в байкальской рифтовой зоне.

На рис. 2 показано расположение эпицентра землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. и разломное строение Байкальской рифтовой зоны (Лунина и др., 2007).

В табл. 1 приведены данные о землетрясениях, произошедших вблизи оз. Байкал в июле–сентябре 2020 г., которые могли получить отражение в аномальных вариациях линеаментных систем в исследуемый период.

В процессе проведения исследований выполнялся автоматизированный линеаментный анализ космических изображений, полученных со спутника Тегга (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250 метров), начиная за 4 мес. до землетрясения и через 16 дней после него (25 мая; 28 июня; 21 июля; 13 августа; 7, 16, 23 сентября и 6 октября 2020 г.). Изучался участок, раз-

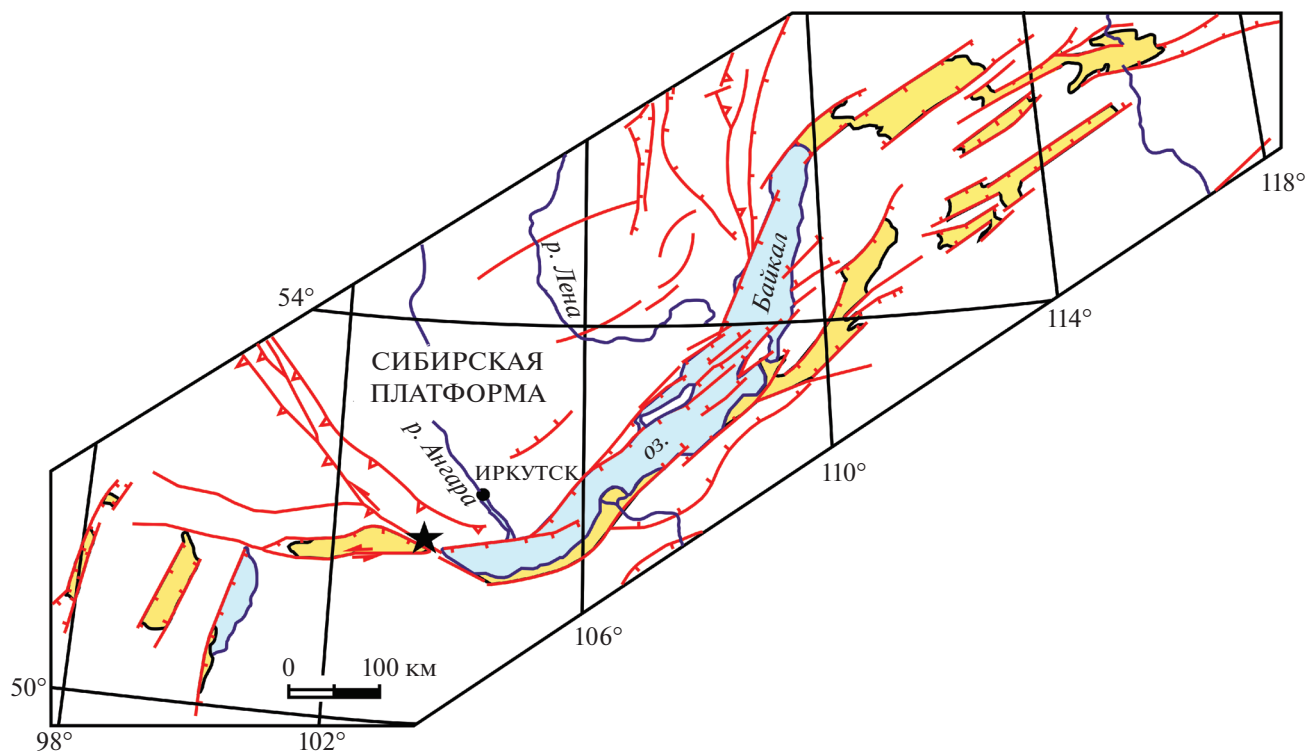


Рис. 2. Схема расположения эпицентра землетрясения (обозначено звездочкой), произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал, и разломное строение Байкальской рифтовой зоны.

мером 100×100 км (400×400 пикселей), в эпицентральной области сейсмического события, состоявшегося 21 сентября 2020 г. на границе Тункинского рифта, расположенного на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны. Эпицентр землетрясения попал в центр исследуемого участка земной поверхности.

Линеаменты, выделяемые при автоматизированной обработке космических изображений, подразделяются на региональные (сквозные), объединенные в линейные системы большой протяженности и локальные (штрихи), имеющие меньшую протяженность и более детально отражающие структуру рельефа. На основании детального изучения трещиноватости по космическим изображениям были построены линии вытянутости штрихов, сквозные (региональные) линеаменты, розы-диаграммы региональных линеаментов и анализировались особенности их распределения в пределах фрагментов изображений эпицентральной области. Схемы региональных линеаментов и их розы-диаграммы для эпицентральной области исследуемого землетрясения, полученные в результате автоматизированного линеаментного анализа разновременных космических изображений при пороге, равном 120, представлены на рис. 3. Такой порог выбирался из условия начала проявления региональных ли-

неаментов в процессе обработки космических изображений.

Из анализа результатов обработки ряда космических изображений, представленных на рис. 3, следует, что в исследуемом сейсмоопасном районе преимущественное развитие имеют диагональные системы линеаментов, связанные с планетарной системой трещиноватости, а также широтные и субширотные направления линеаментов. Эта картина полностью согласуется с общим строением исследуемой территории, так как внутри Тункинской рифтовой долины главную роль играют северо-восточные и субширотные разрывные нарушения (Лунина и др., 2007). Субширотные разрывы имеют широкое распространение на всей исследуемой территории, в то время как меридиональные разрывы наименее развиты по сравнению со всеми остальными. Анализ рис. 3 свидетельствует о том, что в межпадинных перемычках наряду с субширотными хорошо проявляются разломы северо-западного простирания.

Из анализа роз-диаграмм региональных линеаментов, приведенных на рис. 3, следует, что при приближении к моменту землетрясения, состоявшегося 21 сентября 2020 г., происходит постепенное увеличение количества диагональных линеаментных систем северо-западного–юго-восточного, а также северо-восточного–юго-запад-

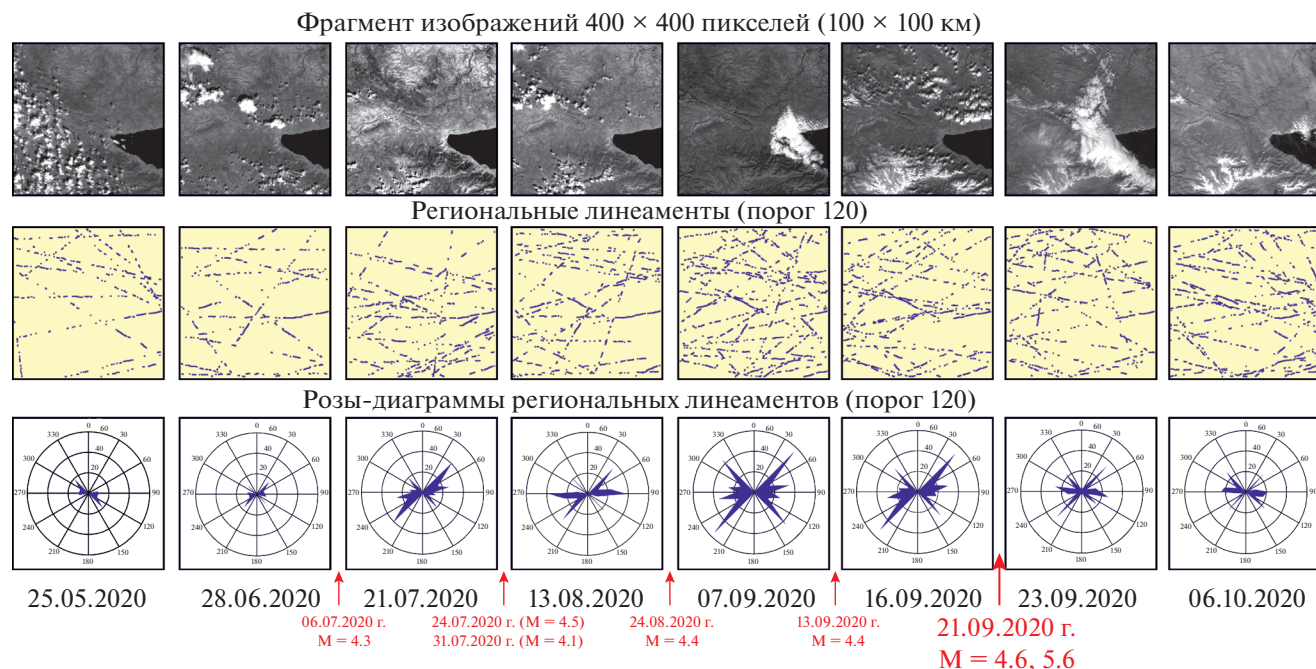


Рис. 3. Схемы и розы-диаграммы региональных (сквозных) линейментов для землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал с магнитудой 5.6.

ного направлений и их уменьшение после землетрясения. Максимальный рост диагональных линейментных систем наблюдался 7 сентября 2020 г., то есть за 14 дней до исследуемого сейсмического события. Подобное закономерное изменение может являться предвестником землетрясения (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007).

Линии вытянутости, являющиеся наглядной формой представления основных ориентационных свойств линейментов, обусловлены морфо-структурным и разломно-блоковым строением исследуемой территории, которая захватывает прилегающую территорию юго-западной части оз. Байкал и часть Тункинского рифта. Этот рифт простирается в субширотном направлении более чем на 200 км от оз. Байкал до оз. Хубсугул. Разломно-блоковое строение Тункинского рифта и прилегающей территории определяется разрывными нарушениями четырех направлений: субширотного, северо-восточного, северо-западного и субмеридионального (Лунина, и др., 2007).

На рис. 4 приведены схемы линий вытянутости штрихов для исследуемого сейсмоопасного района. Как видно из рис. 4, линии вытянутости начинают сгущаться и объединяться 7 сентября 2020 г. (за 2 нед. до сейсмического события, состоявшегося 21 сентября 2020 г.). При этом преимущественное развитие имеют субширотные направления линий вытянутости (см. рис. 4).

Анализ суммарных длин штрихов, осредненных по каждому из восьми направлений (через

22.5°), показал, что величины сумм длин штрихов образуют следующий ряд в порядке убывания: $L 90^\circ$, $L 293^\circ$, $L 67^\circ$, $L 45^\circ$, $L 315^\circ$, $L 22^\circ$, $L 0^\circ$, $L 338^\circ$ (см. табл. 2). При этом преобладающими являются широтные ($L 90^\circ$), субширотные ($L 293^\circ$, $L 67^\circ$) и диагональные ($L 45^\circ$, $L 315^\circ$) направления линейментов, совпадающие с простираем основных морфо-структур региона.

Из анализа табл. 2 следует, что при приближении к моменту землетрясения для преобладающих направлений штрихов ($L 90^\circ$, $L 293^\circ$, $L 67^\circ$, $L 45^\circ$, $L 315^\circ$) характерна общая тенденция увеличения их суммарных длин и постепенное их уменьшение после землетрясения. Для остальных направлений ($L 22^\circ$, $L 0^\circ$, $L 338^\circ$) происходит обратная картина, при которой характерна общая тенденция уменьшения суммарных длин штрихов к моменту землетрясения и увеличения после него.

Таким образом, к моменту землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г., увеличивается проявленность (выраженность) штрихов, согласных с простираем основных морфо-структур региона, и уменьшается проявленность поперечных к ним штрихов. Данные изменения длин локальных линейментов разных направлений, предшествующих сейсмическому событию, произошедшему 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал, являлись предвестником этого сейсмического события.

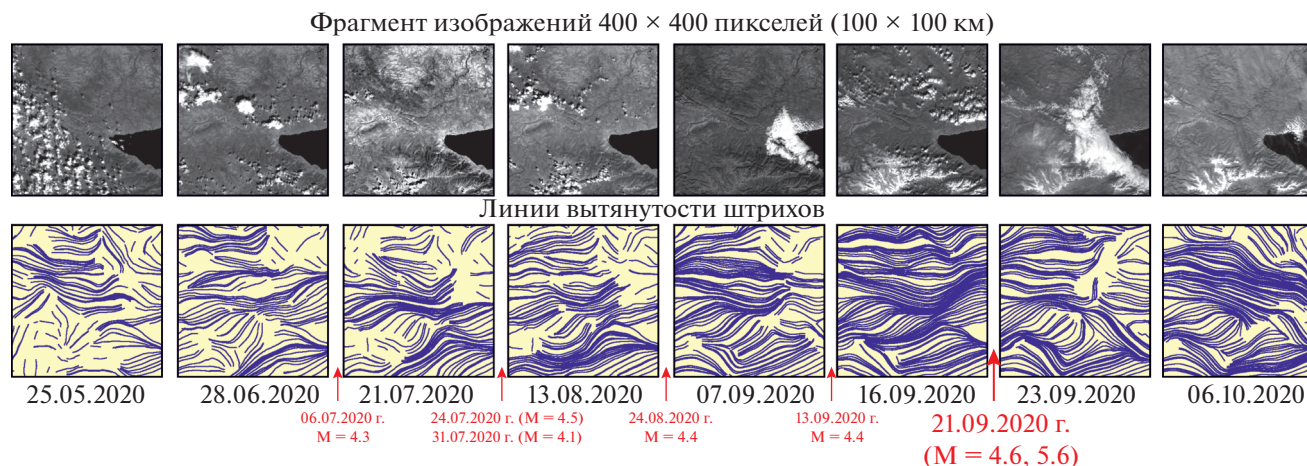


Рис. 4. Схемы линий вытянутости штрихов для землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал.

С использованием данных, приведенных в табл. 2, построены отношения длин локальных линеаментов разных направлений (рис. 5).

Из анализа рис. 5 видно, что отношения длин локальных линеаментов разных направлений начинали расти или уменьшаться по мере приближения к моменту землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г., и достигали пика 16 сентября 2020 г. Таким образом, аномальные вариации линеаментных систем байкальской рифтовой зоны, выявленные по отношениям длин штрихов разных направлений, проявлялись за 5 дней до землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, произошедшего 21 сентября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследуемое землетрясение с магнитудой $M = 5.6$ произошло 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал в период повышенной сейсмической активности, что повлияло на выраженность линеаментных

систем и получило отражение в их аномальных вариациях.

На основании анализа схем региональных линеаментов и их роз-диаграмм, выявленных путем автоматизированной обработки космических изображений при пороге 120, установлено, что в период подготовки и протекания этого сейсмического события преимущественное развитие имели диагональные системы линеаментов, связанные с планетарной системой трещиноватости, а также широтные и субширотные направления линеаментов, которые согласуются с общим строением исследуемой территории. При приближении к моменту землетрясения происходило постепенное увеличение количества диагональных линеаментных систем северо-западного—юго-восточного, а также северо-восточного—юго-западного направлений и их уменьшение после землетрясения. Максимальный рост диагональных линеаментных систем наблюдался 7 сентября 2020 (за 14 дней до исследуемого сейсмического события),

Таблица 2. Значения суммарных длин штрихов разных направлений L (в км) для периода времени с 25 мая по 6 октября 2020 г.

Азимут	Дата							
	25.05.20	28.06.20	21.07.20	13.08.20	07.09.20	16.09.20	23.09.20	06.10.20
90°	1096	1125	1140	1184	1290	1168	1135	1245
67°	892	1041	1115	1077	1183	1172	1036	1070
45°	818	943	1023	976	1058	968	919	851
22°	732	776	823	812	775	663	694	606
0°	817	776	819	746	684	525	647	658
338°	732	646	696	623	599	478	631	738
315°	762	779	888	774	888	785	844	956
293°	1018	963	1022	1054	1220	1137	1160	1233

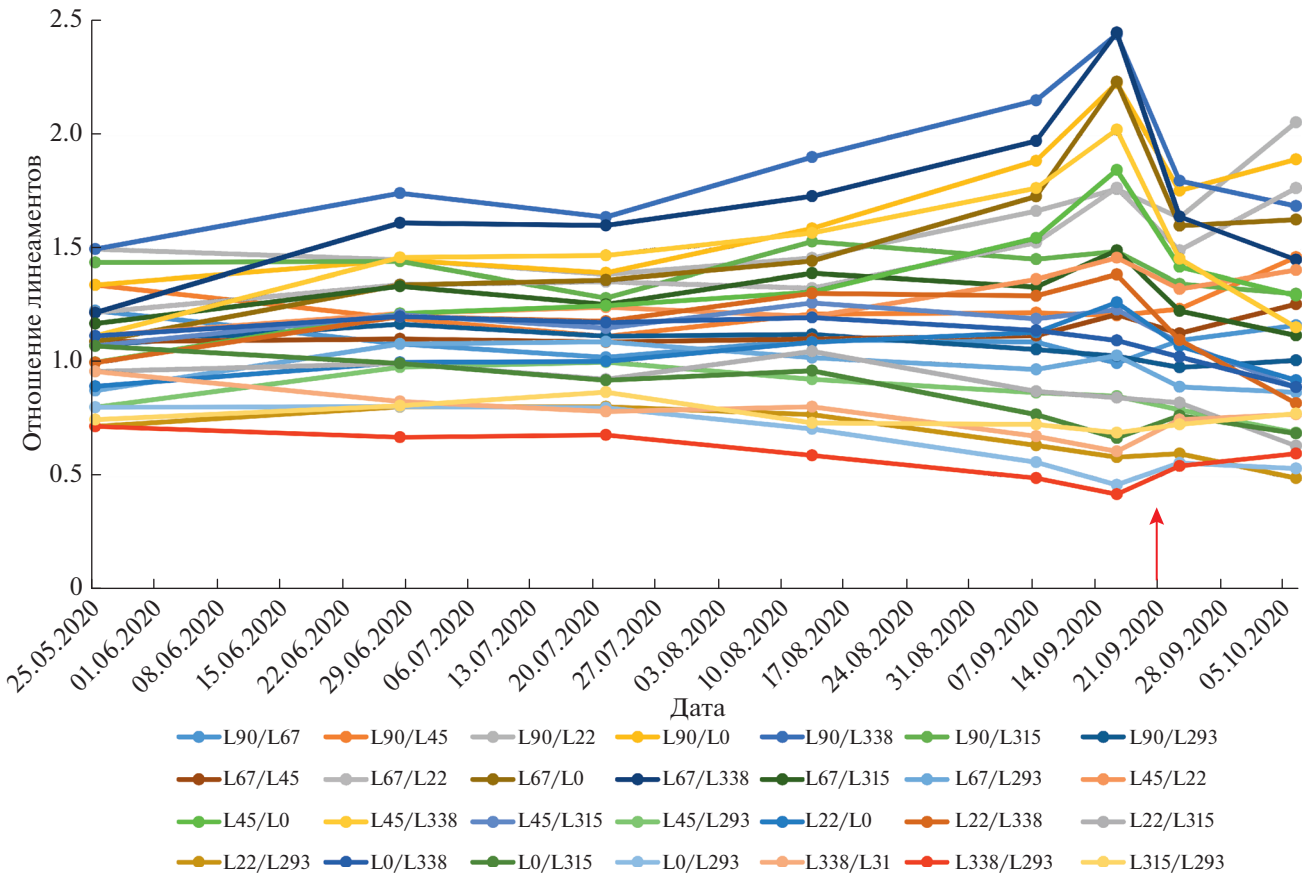


Рис. 5. График отношений длин локальных линеаментов разных направлений для землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, произошедшего 21 сентября 2020 года вблизи оз. Байкал.

что может являться предвестником землетрясения.

Выявлено, что линии вытянутости, которые являются наглядной формой представления основных ориентационных свойств линеаментов, также начинали сгущаться и объединяться за 2 нед. до исследуемого сейсмического события (7 сентября 2020). На основании их анализа показано, что в исследуемом сейсмоопасном регионе преимущественное развитие имели субширотные направления, которые обусловлены морфоструктурным и разломно-блоковым строением исследуемой территории.

Анализ суммарных длин штрихов, выявленных по космическим изображениям, показал, что преобладающими являются широтные ($L 90^\circ$), субширотные ($L 293^\circ$, $L 67^\circ$) и диагональные ($L 45^\circ$, $L 315^\circ$) направления линеаментов, совпадающие с простираем основных морфоструктур региона. При приближении к моменту землетрясения выраженность линеаментов согласных с простираем основных морфоструктур региона увеличивалась, а поперечных к ним линеаментов уменьшалась, что проявлялось в общей тенден-

ции увеличения суммарных длин штрихов для преобладающих направлений и тенденции их уменьшения для остальных направлений ($L 22^\circ$, $L 0^\circ$, $L 338^\circ$).

Аномальные вариации линеаментных систем байкальской рифтовой зоны, проявленные в отношениях длин штрихов разных направлений, были обнаружены 16 сентября 2020 г., т.е. за 5 дней до землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г.

На основании результатов исследований аномальных вариаций линеаментных систем было установлено, что максимальный рост и сгущение линеаментных систем, зафиксированных на схемах линий вытянутости штрихов, схемах региональных линеаментов и их роз-диаграмм, наблюдались за 14 дней до сейсмического события, а максимальные изменения величин суммарных длин штрихов и их отношений, наблюдались за 5 дней до землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г.

Таким образом, автоматизированный линеаментный анализ космических изображений позволил выявить все основные направления линеа-

ментов согласных с общим разломно-блоковым строением Байкальской рифтовой зоны, а также их предвестниковое изменение в период подготовки и свершения исследуемого землетрясения. Такой анализ является одним из эффективных методов выявления предвестников землетрясений, обладающих большой оперативностью и достоверностью для мониторинга сейсмоопасных территорий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта № АААА-А19-119081390037-2.

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 // Физ. Земли. 2017. № 1. С. 4–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. 297 с.
- Аэрокосмические методы геологических исследований. Гл. ред. А.В. Перцов. СПб: ВСЕГЕИ, 2000. 315 с.
- Байкал: природа и люди: энциклопедический справочник / Байкальский институт природопользования СО РАН, (отв. ред. А.К. Тулохонов). Улан-Удэ: ЭКОС: изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 608 с.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 3–17.
- 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., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // Докл. АН. 2007. Т. 414. №4. С. 540–543.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В.* Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физ. Земли. 2016. № 1. С. 120–132.
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2010б. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исслед. Земли из космоса. 2005б. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
- 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.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с., 22 цв. ил.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С.* Систематизация ионосферных, геодинамических и тепловых предвестников сильных землетрясений ($M \geq 6$), регистрируемых из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 3–20.
- 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.
- 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 гг. на южном Байкале методами спутниковой радиointерферометрии // Докл. АН. 2021. В печати.
- Бойков А.М., Корниенко С.Г.* Проявление сейсмогенерирующих линеаментов Дагестана в данных космической тепловой съемки: Теория и эксперимент // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2007. № 51. С. 68–76.
- Вилор Н.В., Адрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С.* Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64–82
- Гапонова Е.В., Зверев А.Т., Цидилина М.Н.* Выявление аномалий линеаментных систем по космическим изображениям во время сильных землетрясений в Калифорнии с магнитудами 6.4 и 7.1 // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 36–47.
- Златопольский А.А.* Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 102–112.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М.: ГЕОС, 2015. 112 с.
- Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 134 с.

- Киссин И.Г.* О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // *Физ. Земли*. 2013. № 4. С. 145–160. <https://doi.org/10.7868/S0002333713040054>
- Корчуганова Н.И., Корсаков А.К.* Дистанционные методы геологического картирования: учебник / Н.И. Корчуганова, А.К. Корсаков. М.: КДУ, 2009. 288 с.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Шерман С.И.* Вариации полей напряжений Тункинского рифта (Юго-западное Прибайкалье) // *Геотектоника*. 2007. № 3. С. 69–96.
- Мац В.Д., Гранина Л.З., Ефимова И.М.* Байкальский рифт: на пути к океану / В.Д. Мац, Л.З. Гранина, И.М. Ефимова // *Природа: ежемесячный естественнонаучный журн*. 2014. № 2. С. 28–38
- 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 аэрномия*. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- 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 // *Frontiers in Earth Science*. 2020. V. 8:571700. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Bondur V., Kuznetsova L.* Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using the Method of Lineament Analysis // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 376–379.
- Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A.* Geo-complexity and earthquake prediction. In: R. Meyers (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, New York: Springer, 2009. P. 4178–4194.
- Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // *Tectonophysics* 2007. V. 431. P. 211–220.
- Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // *Remote Sens*. 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.
- Zlatopolsky A.* Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // *Comput. Geosci*. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.
- Zlatopolsky A.* Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis) Automated linear image features analysis – experimental results // *Comput. Geosci*. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

Registering from Space Anomalous Variations of Baikal Rift Zone Lineament Systems during the $M = 5.6$ Earthquake Occurred on September 21, 2020

V. G. Bondur¹ and E. V. Gaponova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Here we present the results of the study of lineament system anomalous variations during the preparation to the $M = 5.6$ earthquake that occurred on September 21, 2020 near the Baikal Lake 21 km from Kultuk settlement at a depth of 10 km. The method of the research is described here that is based on the automated lineament analysis of satellite imagery. The features of Baikal rift zone structure and its seismic activity have been analyzed. Schemes of stroke elongation lines, schemes of regional lineaments and their rose-diagrams have been built on the base of the processing of a series of satellite imagery obtained by Terra (MODIS) in the period between May 25 and October 6, 2020, as well as the total lengths of local lineaments and ratios of their lengths for various directions have been calculated. All this have allowed us to reveal anomalous variations of lineament systems 14 and 5 days before the earthquake of September 21, 2020. It is concluded that these anomalies belong to the geodynamic precursors of an earthquake.

Keywords: satellite imagery, remote sensing, earthquakes, seismic danger areas, geodynamics, lineaments, Baikal rift zone

REFERENCES

- Aerokosmicheskiye metody geologicheskikh issledovaniy [Aerospace methods of geological research] / Chief ed. A.V. Pertsov. Saint Petersburg: VSEGEI Publ., 2000. 315 p. (In Russian).
- 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 // *Izv., Phys. of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. DOI: 10.1134/S10693513170100
- Aktualnyye voprosy sovremennoy geodinamiki Tsentralnoy Azii [Topical issues of modern geodynamics of Central Asia]. Novosibirsk: RAS Siberian Branch Publ, 2005. 297 p. (In Russian).
- Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 on the Southern Lake Baikal By the Methods of Satellite Radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2021. In Press.
- Baykal: priroda i lyudi: entsiklopedicheskiy spravochnik [Baikal: nature and people: an encyclopedic reference book] / The Baikal Institute of Nature Management (Ed. by

- A.K. Tulokhonov). Ulan-Ude: EKOS: BSC SB RAS Publ., 2009. 608 p. (In Russian).
- Bondur V., Kuznetsova L.* Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using the Method of Lineament Analysis // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 376–379.
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060
- 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 on the southern Lake Baikal by the methods of satellite radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2021. In Press.
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L.* Geomechanical Models and Ionospheric Variations Related to Strongest Earthquakes and Weak Influence of Atmospheric Pressure Gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. DOI: 10.1134/S1028334X0704038.
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V.* Connection between variations of the stress-strain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150. DOI: 10.1134/S1028334X10010320
- 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 // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2016. V. 52. № 1. P. 117–128. DOI: 10.1134/S1069351316010043
- 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 // *Frontiers in Earth Science*. 2020. V. 8:571700. DOI: 10.3389/feart.2020.571700
- 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.* Sovmestnyy analiz anomalii razlichnykh geofizicheskikh polei, registriremykh iz kosmosa, pri podgotovke silnykh zemletryaseniy v Kalifornii [Joint Analysis of Geophysical Field Anomalies Registered from Space during Preparation of Strong Earthquakes in California] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 5. P. 3–24. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420050036
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Systematization of Ionospheric, Geodynamic, and Thermal Precursors of Strong ($M \geq 6$) Earthquakes Detected from Space // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2018. V. 54. № 9. P. 1172–1185. DOI: 10.1134/S0001433818090475.
- Bondur V.G., Voronova O.S.* Variatsii ukhodyashchego dlinovolnogo izlucheniya pri podgotovke i protokanii 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., 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.* Kosmicheskiy metod prognoza zemletryaseniy na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov [A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005. № 3. P. 37–52 (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriremykh na kosmicheskikh izobrazheniyah pri monitoringe seysmopasnykh territoriy [Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 47–56 (In Russian).
- 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.
- Boykov A.M., Kornienko S.G.* Proyavleniye seysmogeneriruyushchikh lineamentov Dagestana v dannykh kosmicheskoy teplovy syomki: Teoriya i eksperiment [Manifestation of seismogenic lineaments of Dagestan in space thermal imagery data: Theory and experiment] // *Proc. of the Institute of Geology of Dagestan Science Center of RAS*. 2007. № 51. P. 68–76 (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433819090123>
- Gaponova E.V., Zverev A.T., Tsidilina M.N.* Detection of Anomalies in Lineament Systems from Satellite Images during Strong ($M = 6.4$ and 7.1) Earthquakes in California // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2020. V. 56. № 9. P. 1062–1071. DOI: 10.1134/S000143382009011X.
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Ispolzovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya uchastkov zemnoy kory dlya analiza geodinamicheskoy obstanovki [The use of remote sensing data of areas of the earth's crust for the analysis of geodynamic conditions] // Moscow: GEOS, 2015. 112 p. (In Russian).
- Keilis-Borok V., Gabriellov A., Soloviev A.* Geo-complexity and earthquake prediction. In: R. Meyers (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, New York: Springer, 2009. P. 4178–4194.
- Kissin I.G.* On the System Approach in the Problem of Forecasting the Earthquakes // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2013. V. 49. № 4. P. 587–600. DOI: 10.1134/S1069351313040058.
- Korchuganova N.I., Korsakov A.K.* Distantionnyye metody geologicheskogo kartirovaniya: uchebnik [Remote methods of geological mapping: textbook]. Moscow: KDU Publ., 2009. 288 p. (In Russian).
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherman S.I.* Variations of stress fields in the Tunka rift of the southwestern Baikal region // *Geotectonics*. 2007. V. 41. № 3. P. 231–256.
- Mats V.D., Granina L.Z., Yefimova I.M.* Evolyutsiya kontinental'nogo rifta: ot prosto vpadiny do slozhnoy struktury okeanicheskogo dna [The evolution of the continental rift: from simple troughs to complex structures of the ocean floor] // *Priroda*. 2014. № 2. P. 28–38 (In Russian).

- Mogi K.* Earthquake Prediction. Tokyo: Academic Press, 1985. 355 p.
- Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // *Tectonophysics* 2007. V. 431. P. 211–220.
- 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. DOI: 10.1134/S0016793210020118
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseniy i predvestniki [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 2003. 270 p. (In Russian).
- Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // *Remote Sens.*, 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.
- Vilor N.V., Adrulyatis L.D., Zarubina O.V., Danilov B.S.* Geokhimiya seysmoaktivnykh regional'nykh razlomov (Baykal'skaya riftovaya zona, Vostochnaya Sibir) [Geochemistry of seismically active regional faults (Baikal rift zone, Eastern Siberia)] // *Geokhimiya*. 2015. № 1. P. 64–82 (In Russian).
- Zlatopolskiy A.A.* Metodika izmereniya oriyentatsionnykh 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).
- Zlatopolsky A.* Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // *Comput. Geosci*. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.
- Zlatopolsky A.* Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis) Automated linear image features analysis – experimental results // *Comput. Geosci*. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.