

Связь линеаментов космических снимков и эпицентров землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны

Б.С. Бусыгин, С.Л. Никулин

*Национальный горный университет, Днепр, 49005, Украина
E-mails: busyginb@yandex.ru, s-nikulin@yandex.ru*

Изложены результаты изучения пространственной взаимосвязи между эпицентрами землетрясений и сетью линеаментов, выделяемых на космических снимках на примере Байкальской рифтовой зоны. На основании совместного анализа космоснимков сервера Google и данных геофизической службы РАН о землетрясениях, произошедших в период 2007–2015 гг., установлен ряд фактов, подтверждающих наличие разнообразных связей между сейсмичностью и линеаментной сетью территории, что открывает широкие возможности для использования методов линеаментного анализа при изучении и прогнозировании землетрясений. Особенно интересно исследование является независимое применение нескольких принципиально различных методических подходов – многомерной классификации с эталонами, оценки меры сложности геологического строения, выявления участков с геологическим строением, нетипичным для изучаемой территории в целом. Установлено, в частности, что эпицентры землетрясений тяготеют к участкам, характеризующимся геологическим строением повышенной сложности, с преобладанием линеаментов с азимутами простирания $22,5 \pm 12,5^\circ$, $67,5 \pm 12,5^\circ$, $112,5 \pm 12,5^\circ$, $157,5 \pm 12,5^\circ$, нетипичными для поверхности Земли в целом. Результаты, полученные с применением различных подходов, имеют существенное сходство между собой и при этом хорошо согласуются с фактическими данными, что свидетельствует о достоверности получаемых результатов и их объективном характере.

Ключевые слова: космические снимки, землетрясения, рифтовая зона, сеть линеаментов, линеаментный анализ, многомерная классификация

*Одобрена к печати: 07.07.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-219-230*

Введение

Прогнозирование землетрясений и мониторинг сейсмоактивности остаётся одной из наиболее сложных проблем в науках о Земле. В связи с этим в настоящее время не прекращается разработка новых подходов к изучению землетрясений с использованием компьютерных и космических технологий. Одним из перспективных направлений исследований является изучение сетей линеаментов, выделяемых на космических снимках и в физических полях.

В соответствии с современными представлениями о сейсмических процессах высокие тектонические напряжения, вызывающие землетрясения, обычно концентрируются в местах пересечения или излома линейных границ, разделяющих блоки земной коры (Бондур, 2012; Ващилов, Калинина, 2008; Куснер и др., 2008; Скарятин, Макарова, 2009 и др.). Как следствие, эпицентры землетрясений не рассеяны хаотично, а приурочены к линеаментам и участкам их сочленений. Однако одного этого факта совершенно недостаточно для оценки сейсмоактивности по факту наличия или отсутствия линеаментов – последние существуют повсеместно, но повышенной сейсмоактивностью обладают только некоторые ограниченные зоны земной коры.

Исследования, проведенные авторами в пределах сейсмоактивной территории Байкальской рифтовой зоны, где в период 2007–2014 гг. произошло более 75-ти землетрясений с магнитудой выше 4,0, позволили более детально оценить характер взаимосвязей между распределениями линеаментов космических снимков и эпицентров землетрясений.

Состояние проблемы

В настоящее время использованию методов линеаментного анализа космических снимков для изучения и мониторинга сейсмоактивности уделяется всё больше внимания. Этому во многом способствовали работы (Бондур, 2012; Arellano-Baeza et al., 2006; Sharifia et al., 2008 и др.), в которых приведены убедительные свидетельства роста степени проявленности линеаментов в преддверии землетрясений. Это связано с увеличением ширины и протяжённости линейных тектонических структур, их объединением в более крупные, что приводит к выделению на космоснимках значительно большего их числа, чем в обычном состоянии. На этом факте базируется методика средне- и краткосрочного прогнозирования мест возникновения землетрясений, основанная на исследовании разновременных космических снимков. Её широкому применению препятствует ряд технических ограничений, в том числе необходимость регулярного получения снимков, сделанных в идентичных условиях (влажность, освещённость, растительный покров). Ряд других методик, направленных на получение количественных показателей риска возникновения землетрясений по данным линеаментного анализа (Ващилов, Калинина, 2008; Cronin et al., 2008; Kalinnikov, Mikheeva, 2015 и др.), не позволяют получать точные и надёжные результаты.

Можно утверждать, что теория и практика линеаментного анализа космических снимков в настоящее время находится в стадии становления, а оценки взаимосвязи линеаментов и эпицентров землетрясений являются достаточно поверхностными и имеют качественный характер. Как следствие, специалисты придают первоочередное значение развитию других направлений изучения и мониторинга землетрясений – изучению деформаций и смещений земной поверхности методами спутниковой интерферометрии или при помощи специализированных сетей приёмников GPS; путём фиксации интенсивности тепловых потоков над сейсмоопасными территориями; с помощью мониторинга состояния ионосферы, ледового покрова водоёмов и др. (Горный, Тронин, 2012; Добрецов и др., 2011).

Вместе с тем, по мнению авторов, потенциал линеаментного анализа космических снимков при оценке сейсмоактивности далеко не исчерпан. Дальнейшее развитие соответствующих методов и методик способно существенно повысить роль изучения линеаментов при решении указанной задачи. Целью настоящей работы является изложение результатов изучения пространственной взаимосвязи между эпицентрами землетрясений и сетью линеаментов, выделяемых на космических снимках. Исследования проводились на материалах нескольких участков рифтовых зон – дивергентных границ тектонических плит, обладающих повышенной сейсмоактивностью. В данной статье методика исследований и их результаты демонстрируются на примере Байкальской рифтовой зоны. В качестве инструментария использована специализированная геоинформационная система РАПИД (Бусыгин, Никулин, 2016).

Участок исследований и исходные материалы

Изучаемая сейсмоопасная территория, в центре которой находится Байкальская рифтовая зона и оз. Байкал, имеет размер 1400 км × 985 км и площадь 1379000 км² (рис. 1).

Рифтовая зона представляет собой литосферный шов между Сибирской и Амурской микроплитами Евразийской литосферной плиты, которые ежегодно удаляются друг от друга на 4–6 мм. В настоящее время в пределах зоны происходит ежегодно до 2000 случаев колебаний земной поверхности, большинство из которых не достигает 2 единиц по шкале магнитуд. Однако несколько десятков землетрясений ежегодно достигают магнитуды 2,5, а примерно раз в 50 лет происходят катастрофические землетрясения с магнитудой до 7. Практически все байкальские землетрясения обусловлены эндогенными процессами и имеют очаги, расположенные на глубинах в десятки километров от земной поверхности (Галазий, Лут, 2000).

В качестве исходных материалов использовались:

- данные Геофизической службы РАН (<http://www.ceme.gsras.ru/>) о магнитуде и расположении эпицентров 75 наиболее мощных землетрясений с магнитудой выше 4,0, произошедших в период июнь 2007 г. – декабрь 2014 г., а также 19, произошедших в интервале январь 2015 г. – август 2015 г. с магнитудой 3,0 и выше. Все эпицентры располагаются вне акватории озера Байкал.

- материалы космических съемок сервера Google по состоянию на декабрь 2014 г. (рис. 2).

При выполнении оценки сейсмоопасности привлекались лишь эпицентры землетрясений, относящихся к периоду июнь 2007 г. – декабрь 2014 г.; более поздние землетрясения использовались для контроля качества получаемых результатов.

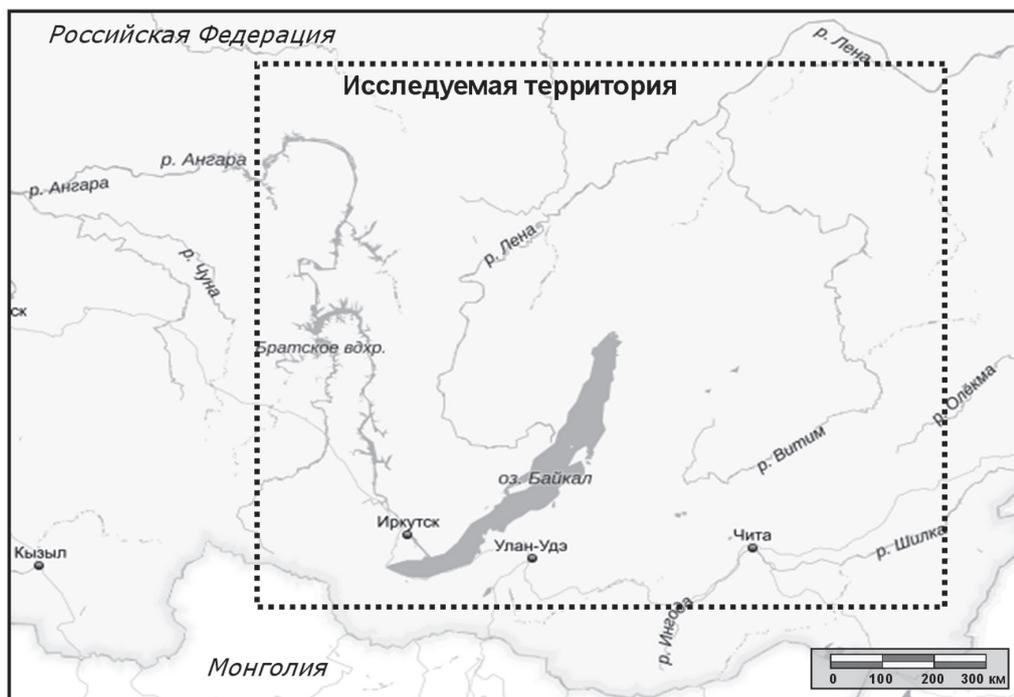


Рис. 1. Расположение исследуемой территории

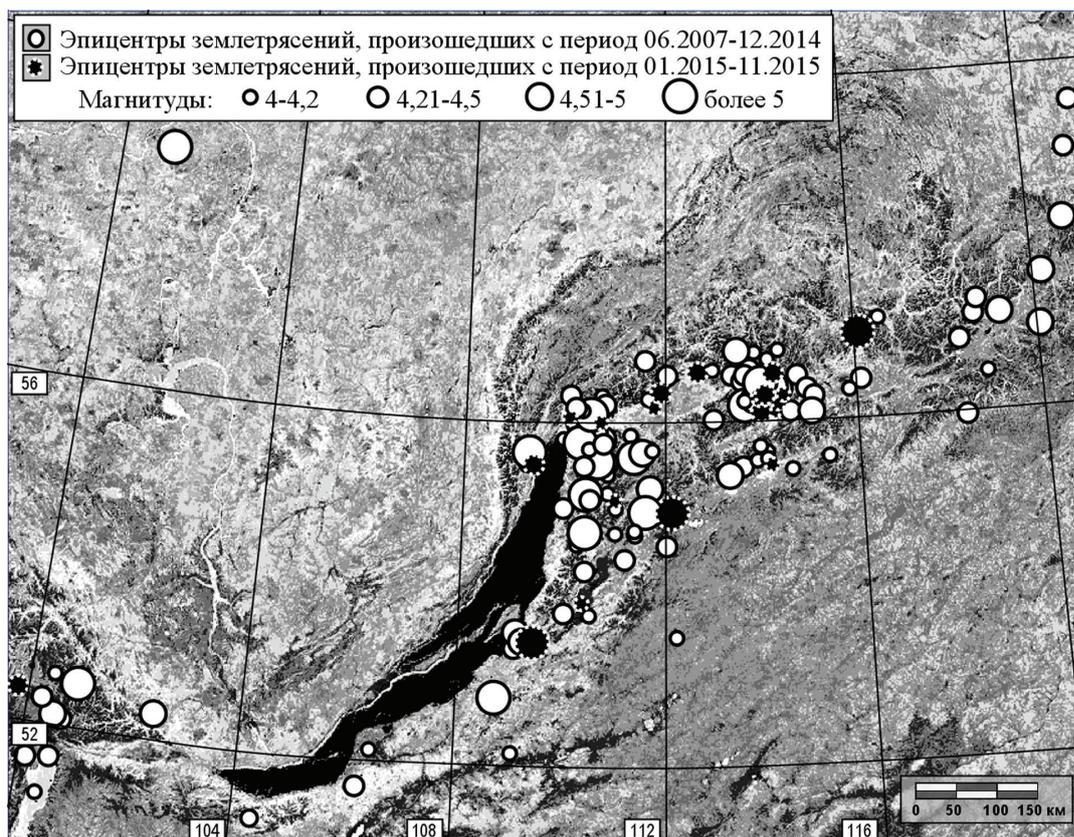


Рис. 2. Цифровая мозаика материалов съемки спутниками серии Landsat (по данным Google) и эпицентры землетрясений на участке исследований

Методика работ

Построение сети линеаментов и расчёт производных карт

Путем визуального дешифрирования материалов космических съёмок изучаемой территории в среде ГИС РАПИД (Бусыгин, Никулин, 2016) было выделено 974 линейных элемента. Из них 783 формируют две системы с азимутами $0 \pm 12,5^\circ / 90 \pm 12,5^\circ$ и $45 \pm 12,5^\circ / 135 \pm 12,5^\circ$ (рис. 3), которые являются наиболее распространёнными на большей части земной поверхности.

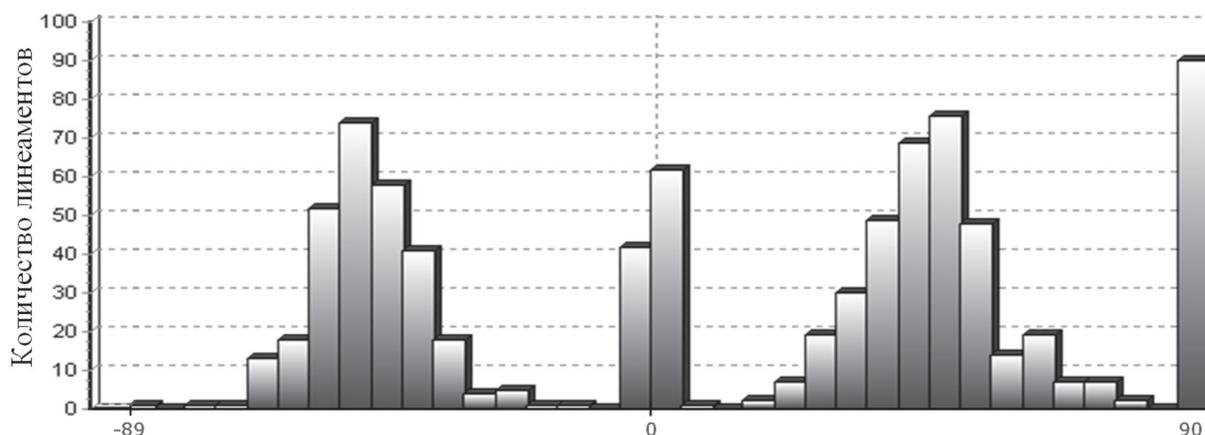


Рис. 3. Диаграмма распределения азимутов линеаментов

Выделенные линеаменты послужили основой для расчёта ряда карт, отражающих различные аспекты строения сети линеаментов: плотность в скользящем окне размером 25х25 км, количество встречающихся внутри окна азимутов линеаментов, различные соотношения между плотностями линейных объектов разного азимута и др.

Отдельно от линеаментов были выделены и исследованы контрастные границы на космическом снимке – зоны высоких градиентов его яркости. Процедуры выделения контрастных границ, разработанные в теории обработки изображений (Gonzalez, Woods, 2008), широко используются для решения разнообразных задач обработки и анализа графической информации (скелетизация и сегментация изображений, определение и связывание контуров объектов, распознавание образов и др.). В геологической практике контрастные границы служат исходным материалом для автоматического выделения линеаментов, и самостоятельно при прогнозе и поисках геологических объектов, как правило, не используются. Вместе с тем в работе (Никулин, 2012) показано, что они несут ценную информацию о геологическом строении территории. Была построена карта, отражающая общую длину контрастных границ внутри скользящего окна размером 25×25км.

Все построенные карты, наряду со схемой пространственного распределения эпицентров землетрясений, послужили основой для последующих исследований.

Выявление пространственной взаимосвязи линеаментов и эпицентров

Как указывалось выше, в настоящее время признано, что эпицентры землетрясений тяготеют к линеаментам и участкам их пересечения. Однако непосредственное применение этого факта не позволяет получать сколь-либо практически ценные результаты в силу повсеместного распространения линеаментов и ограниченности сейсмоактивных площадей. Поэтому была предпринята попытка более углублённого изучения взаимосвязи линеаментов и землетрясений для выработки практически полезных способов изучения сейсмоактивности методами линеаментного анализа.

При выявлении закономерностей взаимного пространственного расположения эпицентров землетрясений и элементов линеаментной сети (иначе – пространственных связей эпицентров и линеаментов) использовано 3 основных подхода, базирующихся на следующих характеристиках:

- *исключительности (аномальности)*: предполагает, что очаги землетрясений, являясь аномальными объектами, формируются на участках с геологическим строением, существенно отличным от строения прилегающей территории;

- *аналогии (подобии)*: предполагает, что сходные по своим свойствам геологические объекты (очаги землетрясений) формируются на участках со сходным геологическим строением, которое отражается на КС через косвенные дешифровочные признаки – формы рельефа, строение гидрографической сети и т.п.

- *повышенной сложности геологического строения*: предполагает, что наличие очагов землетрясений приводит, за счёт интенсивного выделения сейсмической энергии, к увеличе-

нию количества геологических объектов и усложнению их формы в некоторой прилегающей области земных недр. Соответственно, более сложное геологическое строение может служить своеобразным индикатором повышенной сейсмоактивности. На практике оценка сложности может выполняться на основе процедур анализа линеаментов и контрастных границ на снимках, которые являются отражением разрывных нарушений и геологических границ, как дизъюнктивных, так и литолого-стратиграфических.

В рамках подхода, основанного на исключительности геологического строения, анализу подвергались те линеаменты, которые не соответствуют «стандартным», распространённым на всей Земной поверхности, азимутам. Вся совокупность линеаментов была разделена на 2 группы (рис. 4): первая включала линеаменты с азимутами $0\pm 12,5^\circ$, $45\pm 12,5^\circ$, $90\pm 12,5^\circ$ и $135\pm 12,5^\circ$; во вторую вошли линеаменты с азимутами $22,5\pm 12,5^\circ$, $67,5\pm 12,5^\circ$, $112,5\pm 12,5^\circ$, $157,5\pm 12,5^\circ$. В первой группе оказалось 783 объекта (80,4% от общего количества), во второй – 191 (19,6%). Несмотря на то, что объём второй группы значительно меньше объёма первой, именно в зонах концентрации линеаментов второй группы локализуется большинство эпицентров – 66 из 75 (88%), произошедших в период 2006–2014 гг., и 18 из 19 (95%), произошедших в 2015 г. При этом линеаменты второй группы практически отсутствуют вне сейсмоопасных зон (рис. 5а).

В ходе работ был выявлен и другой факт – эпицентры землетрясений в большей степени тяготеют не к собственно линеаментам, а к точкам их разрывов и изломов. Возможно, это объясняется влиянием интенсивных горизонтальных движений на активных участках рифтовой зоны, что приводит к изменению первоначальной ориентации линеаментов и их деформации.



Рис. 4. Схема дешифрирования линеаментов

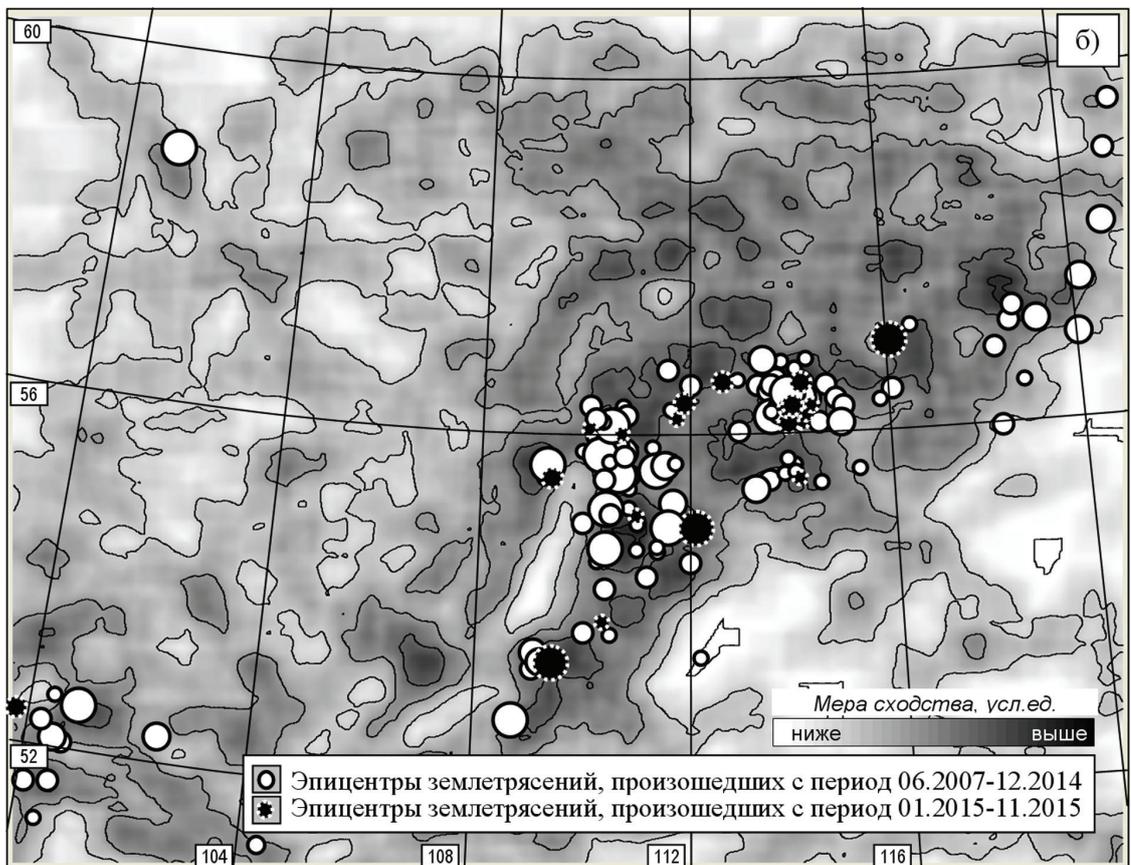
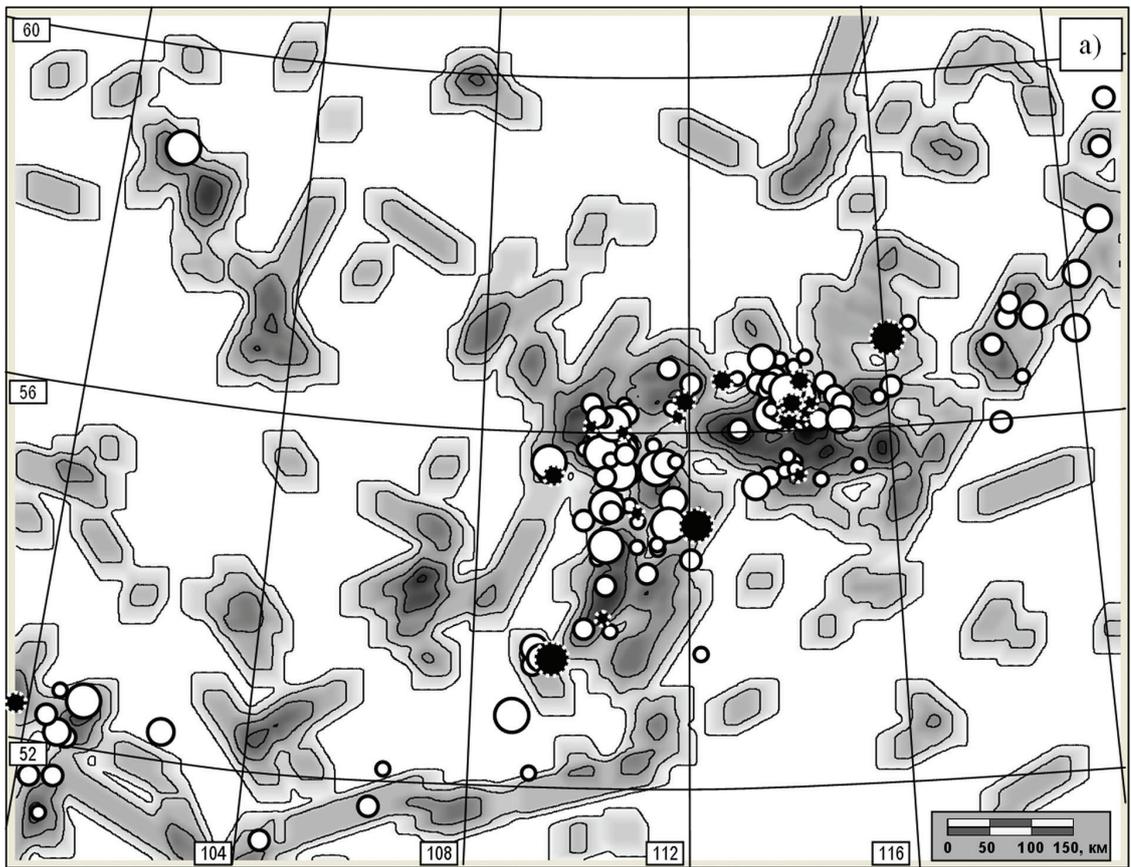


Рис. 5. Карта, отражающая плотность линеаментов второй группы (а), и карта меры сходства территории по отношению к эталонам (б)

Кроме того, в результате экспериментальных исследований установлено, что в пределах наиболее сейсмоактивных участков рифтовой зоны минимальна плотность линеаментов с азимутом 0° . Данный вывод подтверждается и известной схемой разломных структур и линеаментов Прибайкалья, составленной К.Г. Леви (Куснер и др., 2008), из которой следует, что линейные структуры с азимутом, близким к 0° , в пределах внутренней части рифтовой зоны практически не представлены.

Для реализации подхода, основанного на аналогии (подобии), выполнялись процедуры распознавания и ранжирования с эталонами (Бусыгин, Мирошниченко, 1991), в качестве которых выступали участки территории размером 5×5 км, соответствующие эпицентрам землетрясений 2000–2014 гг. (рис. 5). Контрольная выборка была составлена из участков, соответствующих эпицентрам землетрясений 2015 года. В качестве признаков использованы 11 карт, отражающих разные аспекты строения линеаментной сети, рассчитанные в окне размером 25×25 км:

1. карта плотности всех выделенных линеаментов;
2. карта плотности линеаментов первой группы;
3. карта плотности линеаментов второй группы;
4. карта плотности линеаментов с азимутами $45 \pm 12,5^\circ$ и $90 \pm 12,5^\circ$;
5. карта плотности наиболее протяжённых и ярко проявленных линеаментов (общее количество – 281);
6. карта плотности контрастных границ на космоснимке;
7. карта, отражающая количество уникальных направлений протяжённых и ярко выделенных линеаментов внутри скользящего окна;
8. карта, отражающая количество уникальных направлений всех линеаментов внутри скользящего окна;
9. карта, отражающая количество уникальных направлений линеаментов второй группы внутри скользящего окна;
10. карта, отражающая плотность деформаций (изломов, смещений и обрывов) всех линеаментов;
11. карта, отражающая плотность деформаций всех линеаментов второй группы.

На рис. 5б показана карта, отражающая меру сходства территории по отношению к эталонам. Из 19 объектов контрольной выборки, соответствующих эпицентрам землетрясений 2015-го года, 16 (84%) попадают в пределы участков, характеризующихся повышенными значениями сходства. Данные участки сформированы из пикселей со значениями выше порога P . Значение P подобрано таким образом, чтобы выделенные в результате участки занимали ровно 30% общей площади.

Для выявления участков с геологическим строением повышенной сложности была построена карта, являющаяся результатом суммирования нормированных значений 5 отдельных карт (номера 1, 5, 6, 8, 10 в списке), отражающих те или иные аспекты сложности.

Полученная в результате суммирования карта (рис. 6) отражает, по сути, значения некоторой меры сложности геологического строения.

Оказалось, что 89% (17 из 19) эпицентров землетрясений 2015 года и 88% (66 из 75) эпицентров землетрясений 2006–2014 гг. попадают в пределы участков, характеризующихся повышенными значениями меры сложности (площадь участков составляет 30% от общей площади).

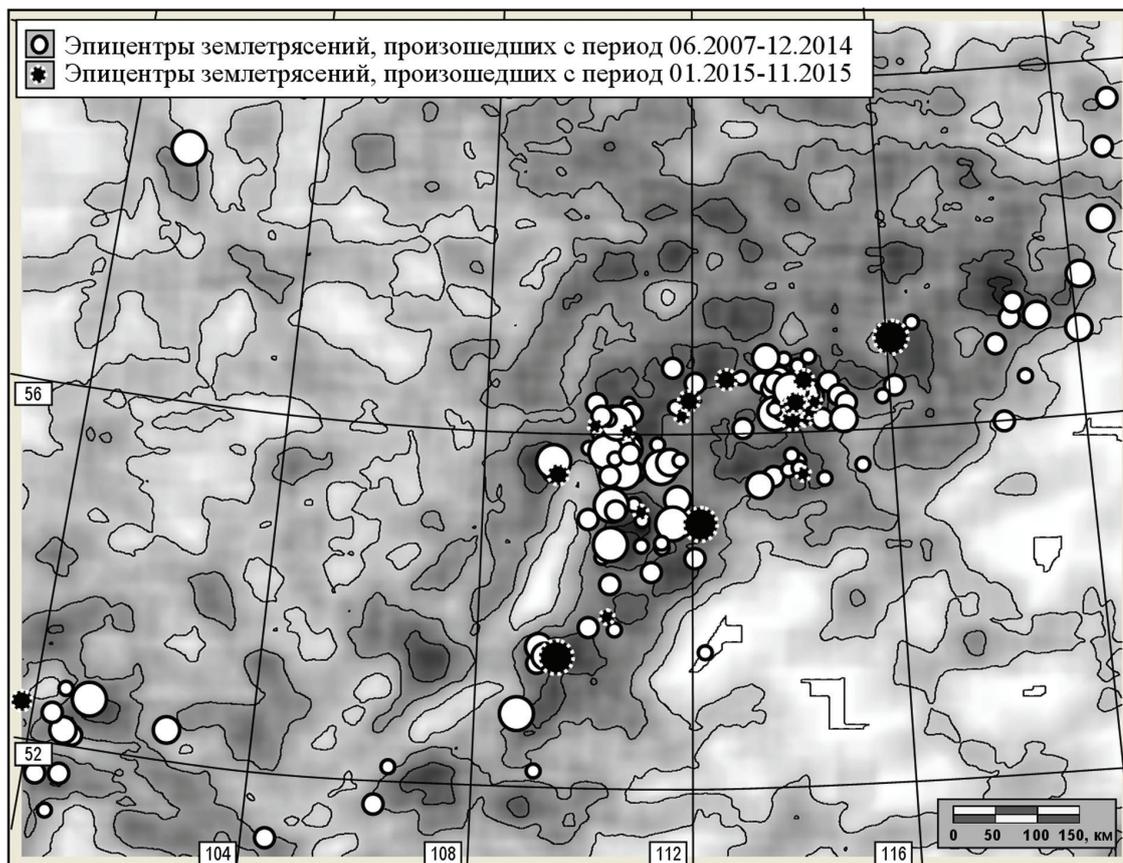


Рис. 6. Карта значений меры сложности геологического строения территории

Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, исследования в рамках каждого из трёх подходов, основанных на исключительности, аналогии и сложности, позволяют с достаточно высокой надёжностью установить пространственную взаимосвязь эпицентров и строения линеamentной сети, проявленной на космических снимках. В целом она носит сложный причинно-следственный характер: с одной стороны, сейсмические процессы ведут к повышению трещиноватости земной коры (и, как следствие, увеличению плотности линеamentов), с другой стороны, существующие сети линеamentов соответствуют «каналам» разрядки тектонических напряжений. Отдельно необходимо отметить сходство карт 5 и 6, полученных совершенно различными способами, что является косвенным подтверждением достоверности приведенных результатов.

Об этом же свидетельствует и оценка, основанная на привлечении объектов контрольной группы, составленной из эпицентров землетрясений, произошедших в 2015 г. Значения, приведенные в предыдущем разделе, по мнению авторов, достаточно убедительно свидетель-

ствуется о достоверности построенных карт (рис. 4–6) и, как следствие, объективном существовании разнообразных связей между пространственным расположением линейментов и эпицентров землетрясений. Этот факт также подтверждается и результатами предварительных исследований, проведенных авторами в пределах нескольких участков Восточно-Африканской рифтовой долины.

Наличие указанных взаимосвязей делает возможным и целесообразным использование методов линейментного анализа космических снимков при изучении сейсмоактивности отдельных участков рифтовых зон.

Литература

1. Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В., Зима А.Л. Исследование из космоса деформационных волн – предвестников землетрясений, проявляющихся в динамике линейментных систем // Исследование Земли из космоса. 2012. № 1. С. 3–20.
2. Бусыгин Б.С., Мирошниченко Л.В. Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. 168 с.
3. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Специализированная геоинформационная система РАПИД: структура, технология, задачи // Геоинформатика. 2016. № 1 (57). С. 22–37.
4. Вацлов Ю.Я., Калинина Л.Ю. Глубинные разломы и линейменты и размещение эпицентров землетрясений на суше Северо-Востока России // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 19–31.
5. Галазий Г.И., Лут Б.Ф. Байкальские землетрясения (одна из возможных причин) // География и природные ресурсы. 2000. № 2. С. 37–42.
6. Горный В.И., Тронин А.А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 116–132.
7. Добрецов Н.Л., Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О совершенствовании способов прогноза землетрясений средствами физического моделирования в ледовом покрове Байкала // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14. № 4. С. 69–79.
8. Куснер Ю.С., Лухнева О.Ф., Лухнев А.В., Царев И.Г. Распределение разломов Байкальской рифтовой зоны как фрактальных объектов // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 67–72.
9. Никулин С.Л. Использование границ яркости геоизображений при автоматизированном прогнозировании геологических объектов // XI Международная конференция: «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты». Киев, 2012. 4 с.
10. Скарятин В.Д., Макарова М.Г. Локализация крупных землетрясений и линейменты // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. Т. 1. С. 103–105.
11. Arellano-Baeza A.A., Zverev A.T., Malinnikov V.A. Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data // Advances in Space Research. 2006. Vol. 37. Issue 4. P. 690–697.
12. Cronin V.S., Millard M., Seidman L., Bayliss B. The seismo-lineament analysis method (SLAM) – A reconnaissance tool to help find seismogenic faults // Environmental & Engineering Geoscience. 2008. Vol. 14. No. 3. P. 199–219.
13. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 3rd edition. USA: Pearson Prentice Hall, 2008. 976 p.
14. Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V. The GIS-EEDB computing system, lineaments, and the earthquake prediction problem // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. in Geoph. 2015. Vol. 18. P. 17–34.
15. Sharifia A., Rajabia M.A., Moghaddamb N.F. Studying the Earthquake Effects on Lineament Density Changes by Remote Sensing Technology // International Proceedings GEOBIA 2008: “Pixels, Objects, Intelligence. Geographic Object Based Image Analysis for the 21st Century”. Calgary, Canada, 2008. URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-C1/Sessions/Session8/6657__Sharifi_Proc_pap.pdf.

The relationships between the lineaments in satellite images and earthquake epicenters within the Baikal Rift Zone

B.S. Busygin, S.L. Nikulin

National Mining University, Dniepro 49005, Ukraine
E-mails: busyginb@yandex.ru, s-nikulin@yandex.ru

The study results of spatial relationship between earthquakes epicenters and lineaments network in satellite images of the Baikal Rift Zone are presented. On the basis of a joint analysis of Google satellite imagery and RAS geophysical service server data on earthquakes occurred in 2007–2015, the authors reveal some facts confirming the existence of a variety of relationships between seismic activity and lineament network of the area, which opens up opportunities to apply lineament analysis techniques for earthquake study and forecast. A specific feature of the research is independent application of several essentially varying methodical approaches – multidimensional classification with samples, estimates of geological structure complexity measure and identification of areas with a geological structure, atypical for the studied territory in general. In particular, it is established that epicenters of earthquakes gravitate to areas which are characterized by a geological structure of the increased complexity with prevalence of lineament with bearing azimuths of $22.5 \pm 12.5^\circ$, $67.5 \pm 12.5^\circ$, $112.5 \pm 12.5^\circ$, $157.5 \pm 12.5^\circ$, which are atypical for the Earth's surface. The results obtained using different approaches have significant similarity, and at the same time are in good agreement with actual data, which indicates their reliability and objectivity.

Keywords: satellite images, earthquakes, rift zone, lineament network, lineament analysis, multidimensional classification

Accepted: 07.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-219-230

References

1. Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V., Zima A.L. Issledovanie iz kosmosa deformatsionnykh voln – predvestnikov zemletryaseniy, proyavlyayuschihsvya v dinamike lineamentnykh system (Space Methods in Predictive Cyclic Dynamics of Lineament System Before Preparation of the Earthquakes), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 1, pp. 3–20.
2. Busygin B.S., Miroshnichenko L.V., *Raspoznavanie obrazov pri geologo-geofizicheskom prognozirovanii* (Pattern recognition for geological and geophysical prognosis). Dnepropetrovsk: DGU publ., 1991, 168 p.
3. Busygin B.S., Nikulin S.L., Spetsializirovannaya geoinformatsionnaya sistema RAPID: struktura, tehnologiya, zadachi (Specialized geoinformation RAPID system: features, structure, tasks), *Geoinformatika*, Kyiv, 2016, No. 1 (57), pp. 22–37.
4. Vashchillov Yu. Ya., Kalinina L. Yu., Glubinnyie razlomyy i lineamentyy i razmeschenie epitsentrov zemletryaseniy na sushe Severo-Vostoka Rossii (Deep-Seated Faults and Lineaments: The Location of Earthquake Epicenters in the Russian Northeast on Land), *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2008, No. 3, pp. 19–31.
5. Galaziy G.I., Lut B.F., Baykalskie zemletryaseniya (odna iz vozmozhnykh prichin) (Baikal earthquakes (one of the possible reasons)), *Geografiya i prirodnyie resursy*, 2000, No. 2, pp. 37–42.
6. Gornyy V.I. Tronin A.A., Obzor dostizheniy poslednego desyatiletia v oblasti primeneniya sputnikovykh metodov distantsionnogo zondirovaniya pri geologicheskikh i geofizicheskikh issledovaniyakh (Review of the last decade major achievements of remote sensing methods application on the geological & geophysical problems solution), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 116–132.
7. Dobretsov N.L., Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.H., Shilko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.I., O sovershenstvovaniy sposobov prognoza zemletryaseniy sredstvami fizicheskogo modelirovaniya v ledovom pokrove Baykala (Advance in earthquake prediction by physical simulation on the Baikal ice cover), *Fizicheskaya mezomehanika*, 2011, Vol. 14, No. 4, pp. 69–79.
8. Kusner Yu.S., Luhneva O.F., Luhnev A.V., Tsarev I.G., Raspredelenie razlomov Baykalskoy riftovoy zonyi kak fraktalnykh ob'ektov (Distribution of breaks of the Baikal rift zone as fractal objects), *Geografiya i prirodnyie resursy*, 2008, No. 1, pp. 67–72.
9. Nikulin S.L., Ispolzovanie granits yarkosti geoizobrazheniy pri avtomatizirovannom prognozirovanii geologicheskikh ob'ektov (Using geoimages brightness borders for automated forecasting of geological objects), *XI International conference: "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, Kyiv, 2012, 4 p.
10. Skaryatin V.D., Makarova M.G., Lokalizatsiya krupnykh zemletryaseniy i lineamentyy (Localization of large earthquakes and lineaments), *Razlomoobrazovanie i seysmichnost v litosfere: tektonofizicheskie kontseptsii i sledstviya* (Breaks creation and seismicity in a lithosphere: the tectonics concepts and consequences), Irkutsk: RAS's Institute of Earth Crust, 2009, Vol. 1, pp. 103–105.
11. Arellano-Baeza A.A., Zverev A.T., Malinnikov V.A., Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data, *Advances in Space Research*, 2006, Vol. 37, Issue 4, pp. 690–697.

12. Cronin V.S., Millard M., Seidman L., Bayliss B., The seismo-lineament analysis method (SLAM) – A reconnaissance tool to help find seismogenic faults, *Environmental & Engineering Geoscience*, 2008, Vol. 14. No. 3, pp. 199–219.
13. Gonzalez R.C., Woods R.E., *Digital Image Processing. 3rd edition*. Pearson Prentice Hall, 2008, 976 p.
14. Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V., The GIS-EEDB computing system, lineaments, and the earthquake prediction problem, *Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. in Geoph.*, 2015, Vol. 18, pp. 17–34.
15. Sharifia A., Rajabia M.A., Moghaddamb N.F., Studying the Earthquake Effects on Lineament Density Changes by Remote Sensing Technology, *International Proceedings GEOBIA 2008: "Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century"*, Calgary, Canada, 2008, URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-C1/Sessions/Session8/6657__Sharifi_Proc_pap.pdf.