

Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссии [OI] 557,7 нм в периоды сейсмических событий в Байкальской рифтовой зоне

А.В. Михалев*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291*

Поступила в редакцию 11.05.2016 г.

Представлены результаты исследования поведения атмосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557,7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) во время землетрясений (ЗТ) с магнитудой $M \geq 5$ в Байкальской рифтовой зоне в 2014–2016 гг. Выявлены более высокие значения средних ночных интенсивностей этой эмиссии в дни, предшествующие ЗТ, по сравнению с последующими днями. Рассмотрены возможные механизмы вариаций эмиссии 557,7 нм в периоды ЗТ.

Ключевые слова: землетрясение, свечение верхней атмосферы, эмиссия 557,7 нм; earthquake, airglow, 557.7 nm emission.

Введение

Собственное излучение верхней атмосферы Земли, к которому относится эмиссия атомарного кислорода [OI] 557,7 нм, является проявлением сложного комплекса физико-химических процессов в атмосфере Земли, подверженных влиянию гелиогеофизических воздействий и возмущений различной природы, в частности, возникающих в нижней атмосфере. Результаты ряда работ указывают также на существование статистической связи между проявлениями сейсмической активности и вариациями некоторых атмосферных эмиссий. Так, в работах [1–7] для среднеазиатской сейсмической зоны был осуществлен анализ характеристик собственного свечения ночной атмосферы в линиях кислорода [OI] 557,7 и 630 нм, натрия NaI 589,3 нм и полосах гидроксила OH (8–3) в связи с сейсмической активностью. В результате было показано, что в период подготовки и развития землетрясений в указанных эмиссиях наблюдаются возмущения различных временных масштабов. В частности, для эмиссии 557,7 нм по большой статистике (около 400 землетрясений с магнитудой $M < 4$) было установлено увеличение интенсивности данной эмиссии за сутки до землетрясения [5]. По мнению авторов работы [6], существенное усиление эмиссии 557,7 нм имеет место за двое суток до землетрясения, с резким ослаблением ее в последующие после землетрясения сутки. В работе [4] отмечается увеличение числа и амплитуд максимумов в спектрах колебаний в диапазоне коротких периодов (единицы–десятки минут) в моменты времени, близкие к магистральному разрыву.

В этих работах также указывается, что влияние отдельных землетрясений может различаться в некоторой степени в зависимости от расположения эпицентра относительно места наблюдения, глубины очага H , атмосферных условий и, возможно, особенностей сейсмического региона. Подобные результаты для эмиссии 557,7 нм были получены в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) по данным наблюдений четырех землетрясений с магнитудами M от 3,8 до 4,7 [8, 9]. В работе [10] дается возможная теоретическая интерпретация увеличения эмиссии 557,7 нм во время землетрясений (ЗТ). Одним из нерешенных вопросов в этих исследованиях является установление механизма возмущений атмосферных эмиссий в периоды подготовки и развития ЗТ. В настоящей работе представлены результаты исследования поведения атмосферной эмиссии атомарного кислорода [OI] 557,7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) во время землетрясений с магнитудой ≥ 5 в Байкальской рифтовой зоне.

Аппаратура и методика наблюдений

В работе использовались данные измерений излучения верхней атмосферы Земли в Геофизической обсерватории (ГФО) Института солнечно-земной физики СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) и оперативные данные по землетрясениям Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН (<http://www.seis-bykl.ru/>). Собственное излучение верхней атмосферы Земли в ГФО ИСЗФ СО РАН регистрируется в линиях атомарного кислорода OI 557,7 нм (максимум высоты высвечивания ~ 97 км) и 630 нм (~ 250 км), натрия NaI 589,0–589,6 нм (~ 92 км), в эмиссионных полосах молекул гидроксила OH (~ 87 км) и кисло-

* Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru).

рода O_2 (~ 97 км), в эмиссионном континууме с помощью светосильных спектрографов с записью спектров на ПЗС-матрицы. В настоящей работе использовались только данные регистрации эмиссии 557,7 нм спектрографом SATI, изготовленным на базе модернизированного спектрографа ИСП-51 с регистрацией спектров на камеру «ВИДЕОСКАН-285» с ПЗС-матрицей SONY ICX285AL (<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr>). Анализировался интервал времени с декабря 2011 г. по март 2016 г. Выбор интервала наблюдений обусловлен переходом на ежедневные наблюдения собственного ночного излучения верхней атмосферы в ГФО, что практически исключало отсутствие оптических данных в периоды сейсмических событий. Это обстоятельство позволило использовать непрерывные данные наблюдений за длительные интервалы времени до и после ЗТ без дополнительных аппроксимаций при их статистическом анализе. В предыдущие 1997–2011 гг. эти наблюдения проводились в течение 1–2 недель каждого месяца.

Результаты и обсуждение

Для анализа использовался региональный каталог ЗТ Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН за период с декабря 2011 г. по март 2016 г. Рассматривались землетрясения с энергетическим классом $K \geq 13$ (магнитуда $M \geq 5$). За рассматриваемый период в БРЗ произошло 17 землетрясений с магнитудами $M \geq 5$, два из которых произошли в один день. Это самые сильные ЗТ в БРЗ за рассматриваемый период. При этом следует отметить, что все они произошли в 2014–2016 гг., что,

вероятно, может указывать на усиление сейсмической активности в последние годы. В таблице приведены характеристики выделенных землетрясений с указанием даты ЗТ, времени, координат эпицентра, энергетического класса K и магнитуды M землетрясений.

Характеристики землетрясений в БРЗ с магнитудой $M \geq 5$ в 2014–2016 гг.

Дата	Время, UT	Широта	Долгота	K/M
2014-01-17	07:01:26	58,53	101,69	13,3/5,2
2014-01-27	15:13:56	54,87	111,24	13,3/5,2
2014-05-23	19:42:27	56,07	113,88	14,3/5,7
2014-06-21	08:01:54	56,60	121,57	13,1/5,1
2014-08-16	15:50:57	57,33	120,73	13,7/5,4
2014-11-01	00:51:58	52,56	101,25	13,6/5,3
2014-12-05	18:04:20	51,37	100,63	13,9/5,5
2015-01-03	12:30:23	56,11	113,84	13,2/5,1
2015-01-18	06:41:30	56,11	113,73	13,3/5,2
	23:06:17	56,11	113,74	13,0/5,0
2015-07-07	14:15:51	55,70	110,36	13,0/5,0
2015-09-02	19:46:52	56,72	115,71	13,8/5,4
2015-09-25	23:24:11	54,87	111,74	13,2/5,1
2015-12-04	13:27:06	57,19	120,60	13,1/5,1
2015-12-13	05:53:18	54,86	111,71	13,0/5,0
2016-02-03	18:27:52	52,86	107,63	13,0/5,0
2016-02-13	20:31:47	55,99	112,60	13,1/5,1

На рис. 1 показано широтно-долготное распределение эпицентров ЗТ, приведенных в таблице, и место расположения ГФО ИСЗФ СО РАН, а также для сравнения карта всех зарегистрированных землетрясений в БРЗ в 2014 г., представленная на сайте Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН.

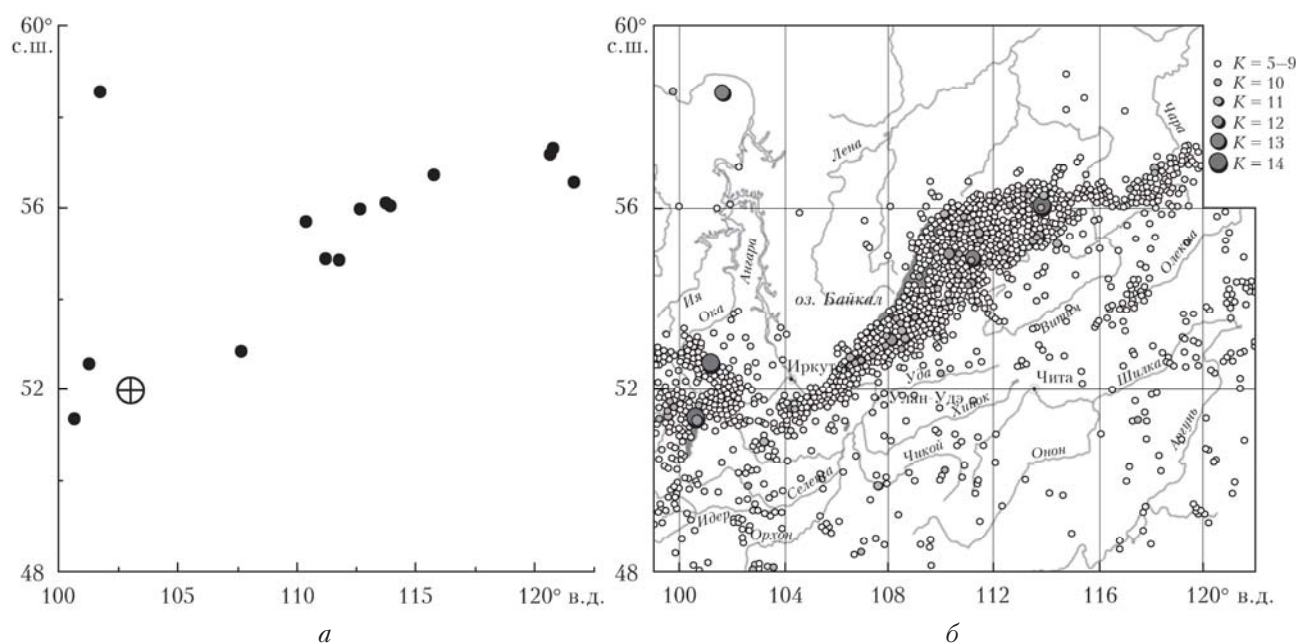


Рис. 1. Широтно-долготное распределение эпицентров землетрясений в БРЗ с магнитудой $M \geq 5$ (точки) в 2011–2016 гг. и место (круг) расположения ГФО ИСЗФ СО РАН (а). Распределение эпицентров всех зарегистрированных землетрясений в БРЗ в 2014 г. (б)

На рис. 2 приведены примеры вариаций средних ночных интенсивностей эмиссии 557,7 нм для пяти из указанных в таблице землетрясений: 17 января 2014 г., 21 июня 2014 г., 18 января 2015 г., 3 и 13 февраля 2016 г. Интенсивности эмиссии 557,7 нм приведены в Релеях. Использовались оптические данные наблюдений за 15 дней до и 15 дней после ЗТ. На рисунках за нулевой день принят день соответствующего ЗТ (для ЗТ 3 и 13 февраля 2016 г. за нулевой день принято 3 февраля).

Анализ приведенных на рис. 2 данных наблюдений позволяет сделать предварительный вывод о тенденции превышения (увеличения) интенсивности атмосферной эмиссии 557,7 нм перед ЗТ по сравнению с интервалами времени после ЗТ (уменьшение интенсивности эмиссии 557,7 нм после ЗТ). Такая тенденция относительно хорошо просматривается в 11 из 16 рассматриваемых событий (два ЗТ 18 января 2015 г. объединены в одно событие). Максимум интенсивности эмиссии 557,7 нм отмечается от 1–2 дней (ЗТ 3 и 13 февраля 2016 г.) до 6–7 дней до ЗТ.

Для определения средних характеристик отмеченной тенденции поведения эмиссии 557,7 нм для рассматриваемых событий был использован статистический метод наложения эпох. На рис. 3 приведены результаты применения метода наложения эпох для разных выборок из указанных событий. Интенсивности эмиссии 557,7 нм предварительно норми-

ровались на средние значения за соответствующие периоды (31 день: 15 дней до ЗТ, 15 дней после ЗТ и день ЗТ) для каждого ЗТ. Вертикальными тонкими линиями указаны стандартные отклонения от среднего.

Данные, приведенные на рис. 3, показывают, что существуют некоторые интервалы времени до ЗТ и несколько дней сразу после ЗТ, для которых интервалы ошибок не перекрываются. Это позволяет утверждать, что общей характерной особенностью приведенных на рис. 2 и 3 данных наблюдений являются более высокие уровни средних ночных значений интенсивностей эмиссии 557,7 нм в дни, предшествующие ЗТ, по сравнению с последующими днями, что качественно согласуется, например, с данными работ [5, 6]. Амплитуда изменений средних ночных значений эмиссии 557,7 нм от максимальных перед ЗТ до минимальных в последующие дни в среднем равна 40–60%, а при анализе отдельных событий может достигать значений ≥ 100 –200%.

Анализ вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм, выполненный для БРЗ, указывает на существование особенностей в их межсуточных вариациях во время ЗТ, аналогично выявленным в среднеазиатской сейсмической зоне. Описанные выше вариации эмиссии 557,7 нм во время ЗТ в БРЗ качественно согласуются с экспериментальными фактами, полученными для других характеристик верхней атмосферы.

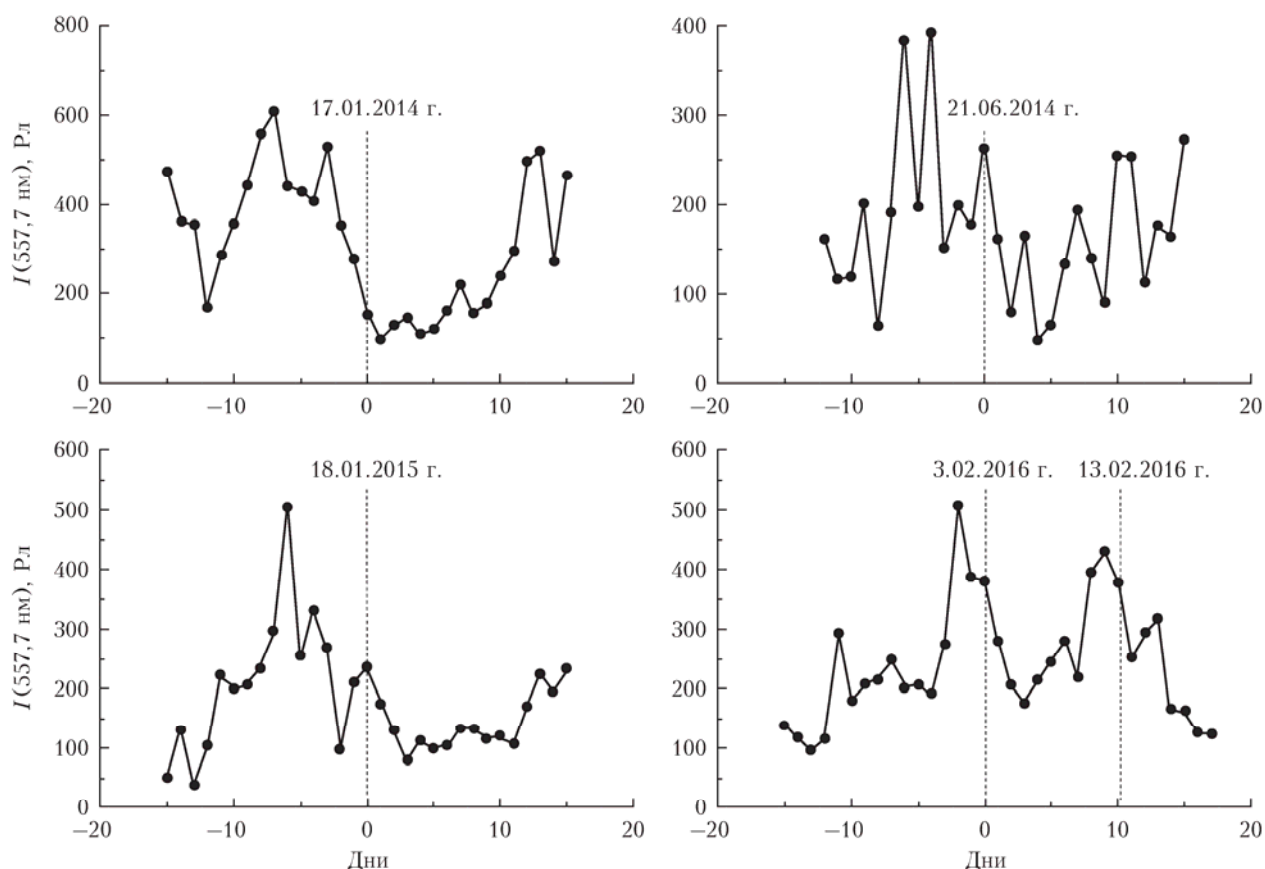


Рис. 2. Примеры вариаций средних ночных интенсивностей эмиссии 557,7 нм в период ЗТ. Вертикальной штриховой линией показан день ЗТ

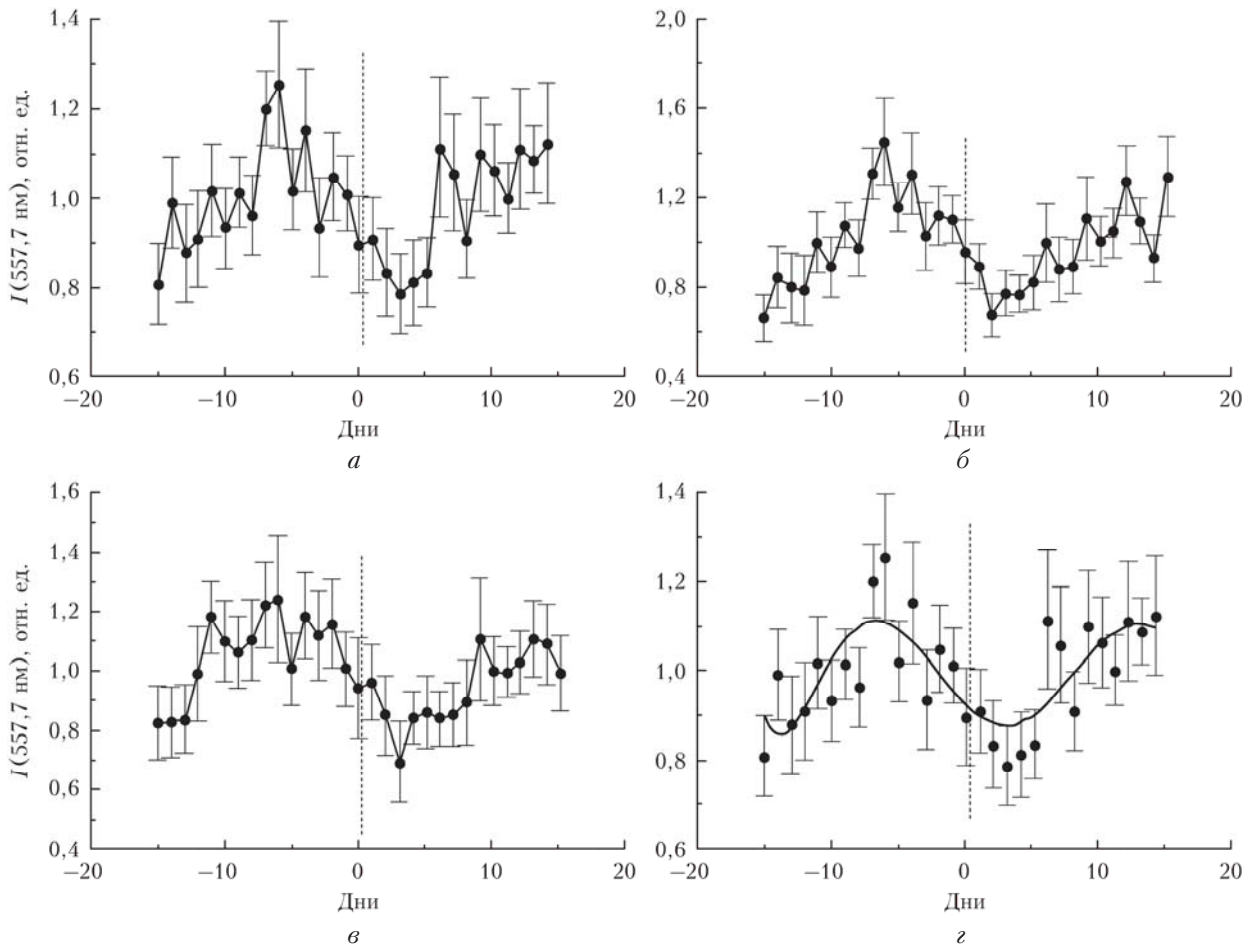


Рис. 3. Вариации относительных интенсивностей эмиссии 557,7 нм в период ЗТ (относительно средних значений за рассматриваемые периоды): *a* – все анализируемые события ($N = 16$); *b* – события с выраженной наблюдаемой тенденцией вариации интенсивности 557,7 нм ($N = 11$); *v* – события в зимний период ($N = 9$); *z* – аппроксимация полиномом 6-й степени. День ЗТ указан вертикальной штриховой линией

В работе [11] при анализе критических частот f_0F_2 за 1–3 сут до землетрясения отмечалось увеличение N_e в F -слое, в [12] за 2–3 сут зарегистрирован рост f_0F_2 , а за 1–2 сут – усиление флуктуаций f_0F_2 с периодами 40–120 мин. В работе [13] авторами на основе анализа ионограмм сделан вывод, что за 1–3 сут до ЗТ вблизи эпицентра возрастает доля регулярных крупномасштабных движений, увеличивается изменчивость E_s -слоя. В работе [14] за 12–24 ч до землетрясения отмечен всплеск ОНЧ-излучений (10–15 кГц), в [15] за 3 сут до землетрясения и спустя 1 сут после землетрясения наблюдались возмущения в F -слое ионосферы.

К настоящему времени не определены механизмы влияния сейсмической активности на эмиссии верхней атмосферы и высказываются лишь отдельные гипотезы [3–5, 10], требующие детального изучения проблемы. Среди возможных механизмов возникновения возмущений в свечении верхней атмосферы рассматриваются: ОНЧ-излучение очага землетрясения, вызывающее высыпание электронов на ионосферные высоты; возбуждение и проникновение в атмосферу инфразвуковых колебаний; генерация внутренних акустико-гравитационных волн в сей-

мически активных областях; генерация электромагнитного излучения. Указанные выше возможные механизмы возмущений предполагают поиск конкретного источника в сейсмическом регионе, непосредственно связанного с подготовкой и развитием ЗТ. Между тем, в работе [16] в качестве причины корреляции поведения эмиссии 557,7 нм и сейсмической активности рассматривается возможное независимое влияние динамических процессов в тропосфере как на литосферу, в ряде случаев стимулирующих ЗТ, так и на верхнюю атмосферу, в частности, посредством распространения внутренних гравитационных и планетарных волн. Если допустить, что атмосферная циркуляция оказывает воздействие на сейсмичность региона [17, 18], то реакция литосферы, скорее всего, должна иметь вероятностный характер и зависеть от «подготовленности» литосферы, особенностей геологического строения региона, пространственно-временных распределений атмосферных аномалий. Возможны ситуации, когда достаточно мощные тропосферные возмущения не приводят в конечном итоге к землетрясениям, но вызывают «сеймоподобные» возмущения в верхней атмосфере. Последнее обстоятельство и может приводить

к сложности и неоднозначности определения атмосферных предвестников ЗТ, когда наблюдаются специфические возмущения в тропосфере, стратосфере, верхней атмосфере, но в ряде случаев они сопровождаются землетрясениями, а в других нет.

Заключение

Проведенный анализ вариаций атмосферной эмиссии [OI] 557,7 нм в периоды зарегистрированных ЗТ с магнитудой $M \geq 5$ в БРЗ в 2014–2016 гг. позволил выявить более высокие значения средних ночных интенсивностей этой эмиссии в дни, предшествующие ЗТ, по сравнению с последующими днями. Амплитуда изменений средних ночных значений эмиссии 557,7 нм от максимальных перед ЗТ до минимальных в последующие дни в среднем составляет 40–60%, а для отдельных событий может достигать значений ≥ 100 –200%. Возможные механизмы вариации эмиссии 557,7 нм в периоды ЗТ могут быть связаны как непосредственно с источниками и процессами в литосфере, сопутствующими подготовке и развитию ЗТ, так и независимым одновременным влиянием динамики нижней атмосферы на сейсмическую активность и верхнюю атмосферу. Во втором случае может отмечаться корреляция этих процессов, но она не будет обусловлена причинно-следственными связями рассматриваемых процессов.

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование системы «литосфера–атмосфера–ионосфера» в экстремальных условиях» (№ 0344-2015-0019) программы Президиума РАН № 15.

1. Насыров Г.А. О связи эмиссии ночного неба с сейсмической активностью // Изв. АН Туркменской ССР. 1978. № 2. С. 119–121.
2. Фишкова Л.М. Об эффекте сейсмической активности в вариациях ночного излучения верхней атмосферы Земли // Сообщение АН Груз. ССР. 1984. Т. 116, № 1. С. 89–92.
3. Fishkova L.M., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A. Relationship between night airglow and seismic activity // Ann. Geophys. 1985. V. 3, N 6. P. 689–694.
4. Горошелидзе Т.И., Фишкова Л.М. Анализ колебаний ночного излучения средней и верхней атмосферы, предшествующих землетрясениям // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 2. С. 313–316.
5. Фишкова Л.М., Горошелидзе Т.И. Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба // Полярные сияния и свечения ночного неба. 1989. № 33. С. 17–23.

6. Коробейникова М.П., Кулиева Р.Н., Гошджанов М., Хамидулина В.Г., Шамов А.А. Вариации эмиссий ночного неба 557,7 нм, 630 нм и Na в период землетрясений // Полярные сияния и свечения ночного неба. 1989. № 33. С. 24–27.
7. Горошелидзе Т.И. Анализ проблем аэронамики по излучению верхней атмосферы. Тбилиси: МЕЦНИЕРЕБА, 1991. 216 с.
8. Михалев А.В., Попов М.С. Проявление сейсмической активности в вариациях излучения верхней атмосферы Земли // Взаимодействие излучений и полей с веществом: Материалы Второй Байкальской школы по фундаментальной физике. Иркутск: Изд-во СиЛаП, 1999. Т. 2. С. 554–557.
9. Mikhalev A.V., Popov M.S., Kazimirovsky E.S. The manifestation of seismic activity in 557.7 nm emission variations of the Earth's upper atmosphere // Adv. Space Res. 2001. V. 27, N 6–7. P. 1105–1108.
10. Kaladze T.D., Horton W., Garner T.W., Van Dam J.W., Mays M.L. A method for the intensification of atomic oxygen green line emission by internal gravity waves // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A12307. DOI: 10.1029/2008JA013425.
11. Липеровский В.А., Алимов О.А., Шалимов С.Л., Гохберг М.Б., Липеровская Р.Х., Саидишоев А. Исследование F-области ионосферы перед землетрясениями // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1990. № 12. С. 77–86.
12. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Денуев В.Х. и др. Ионосферные эффекты Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. // Ионосферные эффекты землетрясения: Тез. докл. 3-го Всесоюз. совещ. Ашхабад: АН ТССР, 1991. С. 3.
13. Хакимов Ф.Х., Липеровский В.А., Шалимов С.Л., Алимов О.А., Липеровская Р.Х., Рубцов Л.Н. О возмущениях в ионосфере перед рядом землетрясений в Таджикистане 1987 г. // Докл. АН Тадж. ССР. 1989. Т. 32, № 12. С. 824–827.
14. Молчанов О.А., Мажаева О.А., Протопопов М.Л. Наблюдение электромагнитных ОНЧ-излучений сейсмогенного происхождения на ИСЗ «Интеркосмос-24» // Геомагнетизм и аэрон. 1992. Т. 32, № 6. С. 128–137.
15. Гохберг М.Б., Кустов А.В., Липеровский Р.Х., Харин Е.П., Шалимов С.Л. О возмущениях в F-области ионосферы перед сильными землетрясениями // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1988. № 4. С. 12–20.
16. Кочеткова О.С., Михалев А.В., Мордвинов В.И., Татарников А.В. Динамика атмосферы и сейсмическая активность в байкальской рифтовой зоне // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 3. С. 55–61.
17. Сытинский А.Д. О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрон. 1997. Т. 37, № 2. С. 132–137.
18. Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Ученые записки РГТМУ. 2010. № 14. С. 89–100.

A.V. Mikhalev. Airglow emission at [OI] 557.7 nm during seismic events in the Baikal rift zone.

The paper presents the study of atomic oxygen [OI] 557.7 nm atmospheric emission (airglow heights of 85–115 km) during earthquakes (EQ) with a magnitude of $M \geq 5$ in the Baikal rift zone during 2014–2016. The analysis of variations in OI 557.7 nm atmospheric emission during the recorded EQs is carried out; it revealed higher values of average nocturnal intensities of this emission within several days before an EQ in comparison with subsequent days. The amplitude of the variations in average nocturnal values of 557.7 nm emission from maximum before an EQ to minimum in subsequent days is 40–60% on the average and can reach ≥ 100 –200% for some events. The analysis of possible mechanisms of the variations in 557.7 nm emission during EQs can be associated with the sources directly contributing to EQ preparation and with the dynamics of the lower atmosphere independently affecting seismic activity and the upper atmosphere. The latter leads to a correlation between these processes not connected by cause F-effect relations.