

УДК 550.34.016+550(348+394)

## ИЗЛУЧЕНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ЭМИССИИ [OI] 557.7 НМ В СВЯЗИ С ХУБСУГУЛЬСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 11 ЯНВАРЯ 2021 ГОДА (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ФЛАНГ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ)

© 2022 г. **А. В. Ключевский**<sup>1</sup>, **А. В. Михалев**<sup>2,\*</sup>,  
член-корреспондент РАН **А. В. Медведев**<sup>2</sup>, **В. М. Демьянович**<sup>1</sup>

Поступило 08.12.2021 г.  
После доработки 16.02.2022 г.  
Принято к публикации 17.02.2022 г.

На основе результатов инструментальных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, анализируется реакция верхней атмосферы на сильное Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 г. (магнитуда  $M_W = 6.7$ ). В излучении верхней атмосферы Земли в эмиссии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм выявлен отклик после землетрясения. В качестве возможной причины возмущения излучения атмосферы рассматриваются акустико-гравитационные и внутренние гравитационные волны, распространяющиеся из эпицентральной зоны землетрясения и возникшие над пунктом наблюдения при прохождении сейсмических волн.

*Ключевые слова:* Хубсугульское землетрясение, верхняя атмосфера, эмиссия 557.7 нм, отклики

**DOI:** 10.31857/S2686739722060081

Литосфера, гидросфера, атмосфера и околоземное пространство представляют собой сложную взаимосвязанную динамическую геосистему, при изучении которой исследуются отдельные геосферы и взаимодействия между ними, моделируются механизмы трансформации и передачи сигналов на Землю и от ее поверхности в окружающее пространство, а также ведется поиск источников геосферных возмущений. Среди литосферных источников естественных возмущений с характерными для геофизики “быстрыми” временами наиболее значительными и распространенными являются землетрясения (ЗТ): в зонах очагов сильных ЗТ реализуются чрезвычайно мощные импульсные воздействия и деформации, формируются сложные объемные колебания и мгновенно образуются протяженные разрывы поверхности литосферы [1]. При распространении возникающие при ЗТ сигналы затухают с расстоянием, но иногда наблюдаются как “отклики” в других геосферах [2, 3]. Так, наземные электрические, магнитные и сейсмологические измерения указывают на связанные с сильными ЗТ изменения геомагнитных пульсаций, электри-

ческих полей и собственных колебаний Земли [4, 5]. В гидросфере сильные ЗТ формируют цунами, которые часто возбуждают инфразвук [6]. В ионосфере и верхней атмосфере при сильных ЗТ наблюдались различные эффекты в электронной плотности, общем электронном содержании, температуре, собственном излучении верхней атмосферы и других параметрах [7–9]. Некоторые из возмущений, в том числе и инфразвуковые колебания, связаны с акустико-гравитационными волнами (АГВ) и внутренними гравитационными волнами (ВГВ) [10], и особый интерес представляет рассмотрение отклика атмосферы на вертикальные движения земной поверхности, вызванные землетрясениями и сейсмическими волнами.

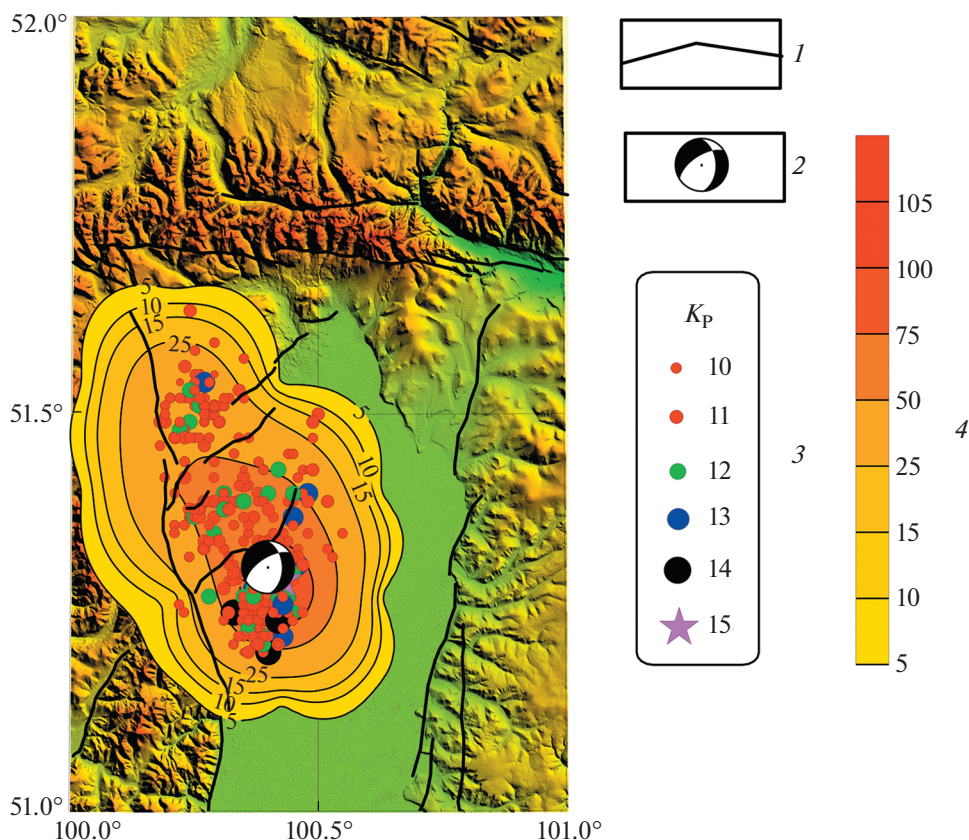
### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Байкальская рифтовая зона (БРЗ) характеризуется высокой сейсмической активностью, что дает возможность изучения литосферно-атмосферно-ионосферных связей. В настоящей работе результаты измерений излучения верхней атмосферы Земли проанализированы в связи с сильнейшим Хубсугульским землетрясением, произошедшим 11.01.2021 на юго-западном фланге БРЗ (21:32:59.3 УТ,  $\varphi = 51.31^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 100.40^\circ$  в.д.; энергетический класс  $K_p = 15.7$ , магнитуда  $M_W = 6.7$ , сбросовый тип подвижки) [11, 12]. В работе использованы материалы ночной регистрации интенсивности эмиссии 557.7 нм спектрографом

<sup>1</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*E-mail: mikhalev@iszf.irk.ru



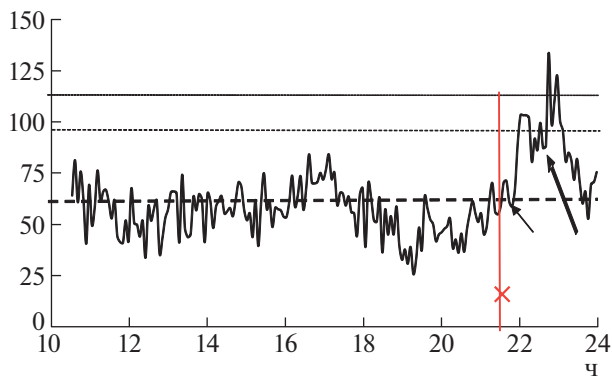
**Рис. 1.** Карта эпицентров и изолиний плотности землетрясений в площадке  $\varphi = 51\text{--}52^\circ \text{N}$ ,  $\lambda = 100\text{--}101^\circ \text{E}$ . 1 – разломы [13], 2 – эпицентр Хубсугульского землетрясения, 3 – эпицентры землетрясений с энергетическим классом  $K_p \geq 10$  (январь–сентябрь 2021 г.), 4 – шкала изолиний плотности эпицентров в площадках  $15 \times 15 \text{ км}^2$ .

SATI-1M, изготовленным на базе модернизированного спектрографа ИСП-51 с регистрацией спектров на цифровую камеру “ВИДЕОСКАН-285” и установленным в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН ( $52^\circ$  с.ш.,  $103^\circ$  в.д.) на расстоянии около 200 км от эпицентра Хубсугульского землетрясения.

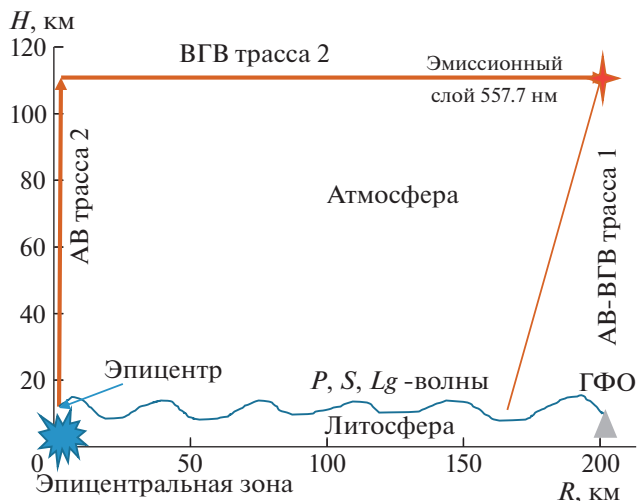
Анализ сейсмичности в площадке  $\varphi = 51\text{--}52^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 100\text{--}101^\circ$  в.д. за 2021 г. показывает, что на северо-западе Хубсугульской впадины формируется вытянутая вдоль Хубсугульского разлома зона высокой плотности эпицентров толчков-афтершоков (рис. 1). К середине сентября 2021 г. было зафиксировано и обработано около 290 толчков  $K_p \geq 10$ , среди них 7 крупных сейсмособытий с  $K_p \approx 13$ , 3 – с  $K_p \approx 14$  и необычно сильный афтершок  $K_p = 14.8$  [11]. Появление и развитие области высокой плотности афтершоков указывают на мощную сеймотектоническую активизацию литосферы с диссипацией энергии сеймотектонического деформирования в локальном очаговом пространстве [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлено поведение интенсивности эмиссии  $557.7 \text{ нм}$ , полученное в течение ночи 11.01.2021 г. До момента ЗТ наблюдаются естественные вариации интенсивности эмиссии  $557.7 \text{ нм}$  около среднесуточного уровня  $61.04 \pm \pm 17.79 \text{ Рл}$ . В частности, в интервале времени 10–21 UT можно выделить один из наблюдаемых типов ночного хода этой эмиссии с максимумом около полуночи, который, как правило, может модулироваться более высокочастотными вариациями интенсивности этой эмиссии. Через 15 мин (тонкая короткая стрелка) после реализации Хубсугульского ЗТ (крестик и вертикальная линия) можно отметить формирование низкочастотного колебания длительностью около получаса при уровне значимости выше двух стандартных отклонений. Далее в сигналах эмиссии  $557.7 \text{ нм}$  наблюдается усиление высокочастотных колебаний с максимумом на уровне значимости выше трех стандартных отклонений (толстая длинная стрелка).



**Рис. 2.** Ночной ход интенсивности эмиссии 557.7 нм в ночное время 11.01.2021 г. Крестик и вертикальная линия маркируют момент сильного Хубсугульского землетрясения (21.549 ч, UT). Две стрелки указывают на начало формирования двух возмущений с разными трассами распространения. Жирная штриховая линия маркирует среднесуточный уровень эмиссии 577.7 нм. Пунктирная и точечная линии маркируют уровни двух и трех стандартных отклонений соответственно.



**Рис. 3.** Схема распространения акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере и сейсмических ( $P$ ,  $S$ ,  $Lg$ ) волн в литосфере.  $R$  и  $H$  – расстояние от эпицентра и высота.

На рис. 3 показаны возможные трассы распространения возмущений от точки эпицентра ЗТ до эмиссионного слоя 557.7 нм на высоте около 100 км и удалении от эпицентра на расстояние 200 км. В качестве возможных механизмов распространения возмущения от землетрясения до верхней атмосферы в удаленной от эпицентра зоне предварительно рассматриваются акустические волны (АВ), АГВ, ВГВ и поверхностные сейсмические волны Рэлея.

В настоящее время в литературе рассматриваются несколько возможных каналов поступления и преобразования высвобождаемой при ЗТ энергии в верхнюю атмосферу и ионосферу [3, 14–17]. Достаточно широко обсуждается концепция формирования возмущений в верхней атмосфере и ионосфере вследствие вертикального распространения АВ и их непосредственного воздействия на параметры среды и диссипации на высотах верхней атмосферы. В этом случае колебания земной поверхности при ЗТ сопровождаются возбуждением в атмосфере широкополосных акустических волн, которые могут распространяться вертикально вверх в достаточно узкой угловой диаграмме направленности [3]. Вследствие диссипации АВ над источником формируется область пространственных возмущений состояния верхней атмосферы, которая в свою очередь может являться источником ВГВ и их волноводному распространению на большие расстояния [18]. Применительно к рассматриваемому Хубсугульскому ЗТ этому сценарию на рис. 3 соответствует трасса 2, которая позволяет выполнить оценку возможной временной задержки наблюдаемого возмущения в эмиссии 557.7 нм. При скорости рас-

пространения акустической волны 340–400 м/с и высоте эмиссионного слоя эмиссии 557.7 нм 100 км (близкой к высотам мезопаузы и диссипации акустических волн) время распространения акустического возмущения до высоты 100 км составляет около 4–5 мин. К этому времени необходимо добавить время волноводного распространения ВГВ от возмущенной области до ГФО, находящейся на расстоянии 200 км. При групповой скорости ВГВ 250–300 м/с время распространения до ГФО составляет около 11–13 мин. В этом случае общее время распространения возмущений по трассе 2 будет составлять 15–18 мин, что практически совпадает с наблюдаемой задержкой появления начала возмущения в эмиссии 557.7 нм после момента ЗТ.

Рассматривается также механизм преобразования у поверхности Земли сейсмических волн Рэлея в акустические колебания, которые распространяются снизу вверх с некоторым углом к горизонту [14, 17] и которые затем могут проявляться в вариациях ионосферных параметров с периодами ВГВ с задержкой относительно ЗТ десятки минут [3]. При вертикальной фазовой скорости ВГВ 40–80 м/с время достижения эмиссионного слоя 557.7 нм на высоте 100 км составляет около 17–42 мин. Этому сценарию на рис. 3 условно схематично может соответствовать трасса 1.

Не следует исключать и передачи импульса звуковой волны атмосферной среде, обусловливающей возникновения упорядоченного потока частиц. Скорость такого “звукового” ветра может достигать на высотах верхней атмосферы от 10 до 100 м/сек [14]. Это может приводить к дополнительному поступлению атомарного кислорода О

снизу на высоты эмиссионного слоя 557.7 нм и усилению его интенсивности, которая согласно общепринятым механизмам возбуждения этой эмиссии пропорциональна  $[O]^3$ . Возможно этим эффектом можно объяснить наблюдаемое, вероятно, на фоне естественного ночного хода эмиссии 557.7 нм дополнительное усиление интенсивности эмиссии 557.7 нм после ЗТ.

Что касается наблюдаемого усиления высокочастотных колебаний интенсивности эмиссии 557.7 нм (около 23 УТ) можно заметить, что этот эффект ранее отмечался в некоторых работах. Так, в работе [9] отмечалось увеличение числа и амплитуд максимумов в спектрах колебаний эмиссий верхней атмосферы в диапазоне коротких периодов (единицы—десятки минут) в моменты времени, близкие к магистральному разрыву. Подобные результаты для эмиссии 557.7 нм были получены и для Байкальской рифтовой зоны [7].

В работе [20] дается возможная теоретическая интерпретация увеличения интенсивности эмиссии 557.7 нм перед землетрясениями в результате распространения ВГВ и создания на высоте эмиссионного слоя вихревых структур, которые обеспечивают увеличение концентрации атомарного кислорода  $[O]$  на высотах ионосферного слоя Е.

Для большинства исследуемых сейсмических толчков в БРЗ отклик атмосферной эмиссии 557.7 нм после землетрясений ранее выявить не удавалось [7, 19]. Полученные в настоящей работе результаты указывают на значимые изменения в динамике эмиссии 557.7 нм на фоне ее естественных вариаций после сильного Хубсугульского землетрясения. Постсейсмический эффект в излучении эмиссий верхней атмосферы, вероятно, возможно наблюдается только для сильных землетрясений со сбросовой подвижкой в очаге (вертикальном движении поверхности Земли в эпицентральной зоне) и при больших амплитудах сейсмических колебаний. Это согласуется с работой [14], в которой утверждается, что эффекты нагревания и ускорения атмосферы акустическими волнами являются эффективными только после мощных ЗТ.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за высокопрофессиональное, принципиальное и одновременно доброжелательное рецензирование работы, способствовавшее существенному улучшению статьи.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и РФФИ (РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011). Результаты

получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckprf.ru/ckpr/3056/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C., Kisslinger C. (eds.). Academic Press: Amsterdam, Boston, New York, Tokyo, 2002. Part A. 934 p.
2. Шалимов С.Л., Нестеров И.А., Воронцов А.М. О возмущениях ионосферы, регистрируемых посредством GPS после землетрясения и цунами в Тохоку 11.03.2011 // Физика Земли. 2017. № 2. С. 1–12.
3. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск. 2006. 480 с.
4. Meloni A., di Mauro D., Mele G., Palangio P., Ernst T., Teisseyre R. Evolution of Magnetotelluric, Total Magnetic field, and VLF Field Parameters in Central Italy: Relations to Local Seismic Activity // Annali di Geofisica. 2001. V. 44. P. 383–394.
5. Соболев Г.А. Вызванные землетрясениями когерентные колебания Земли // Физика Земли. 2015. № 1. С. 18–27. <https://doi.org/10.7868/S0002333715010135>
6. Raveloson A., Kind R., Yuan X., Ceranna L. Locating the Tohoku-Oki 2011 Tsunami Source Using Acoustic-gravity Waves // Journal of Seismology. 2012. V. 16. P. 215–219. <https://doi.org/10.1007/s10950-011-9262-7>
7. 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. № 6–7. P. 1105–1108.
8. Hobara Y., Parrot M. Ionospheric Perturbations Linked to a Very Powerful Seismic Event // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. V. 67. P. 677–685.
9. Торошелидзе Т.И., Фишкова Л.М. Анализ колебаний ночного излучения средней и верхней атмосферы, предшествующих землетрясениям // ДАН СССР. 1988. Т. 302. № 2. С. 313–316.
10. Афраймович Е.И., Первалова Н.П., Плотников А.В., Уралов А.М. The Shock-acoustic Waves Generated by Earthquakes // Annales Geophysicae. 2001. V. 19. P. 395–409.
11. <http://www.isc.ac.uk>
12. Ключевский А.В., Демьянович В.М. Динамика энергетической структуры сейсмичности юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы: бифуркация Андропова-Хопфа // Геология и геофизика. 2019. Т. 60 (3). С. 399–419. <https://doi.org/10.15372/GiG2019020>
13. Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. 420 с.
14. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 295 с.

15. *Gusev V.A.* The Atmosphere Heating Due to Wideband Acoustic and Shock Waves Propagating // *Geoph. J.* 2010. V. 32. № 4. P. 56–57.
16. *Гусев В.А., Жостков Р.А.* Трансформация интенсивных акустических волн, распространяющихся вертикально вверх в изотермической стратифицированной атмосфере // *Изв. РАН.* 2015. Т. 51. № 5. С. 587–597.
17. *Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В.* Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // *Физика Земли.* 2019. № 1. С. 199–213.
18. *Карпов И.В., Кшевцевский С.П.* Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2014. Т. 54. № 4. С. 553–562.
19. *Михалев А.В.* Излучение верхней атмосферы Земли в эмиссии [OI] 557.7 нм в периоды сейсмических событий в Байкальской рифтовой зоне // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 12. С. 1068–1072.
20. *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 // *Journal of Geophysical Research.* 2008. V. 113. A12307.  
<https://doi.org/10.1029/2008JA013425>

## THE EARTH'S UPPER ATMOSPHERE RADIATION IN THE EMISSION [OI] 557.7 nm IN CONNECTION WITH THE HOVSGÖL EARTHQUAKE OF JANUARY 11, 2021 (SOUTHWESTERN FLANGE OF THE BAIKAL RIFT ZONE)

A. V. Klyuchevskii<sup>a</sup>, A. V. Mikhalev<sup>b, #</sup>,

Corresponding Member of the RAS A. V. Medvedev<sup>b</sup>, and V. M. Dem'yanovich<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: mikhalev@iszf.irk.ru*

Based on the results of instrumental observations carried out at the Geophysical Observatory of ISTP SB RAS, the reaction of the upper atmosphere to the major Hovsgöl earthquake of January 11, 2021 (magnitude  $M_W = 6.7$ ) is analyzed. In the radiation of the Earth's upper atmosphere in the emission of atomic oxygen [OI] 557.7 nm, the responses were revealed after the earthquake. Acoustic-gravity waves propagating from the epicentral zone of the earthquake and arising above the observation point during the passage of seismic waves are considered as a possible reason for the excitation of the atmosphere.

*Keywords:* Hovsgöl earthquake, upper atmosphere, 557.7 nm emission, responses