

ИНФРАЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 5 ДЕКАБРЯ 2014 г. В АКВАТОРИИ ОЗЕРА ХУБСУГУЛ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)

А. Г. Сорокин^{1,*}, А. В. Ключевский²

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 21.08.2018 г.

Поступило 06.09.2018 г.

Комплексный анализ волновых форм сейсмических и инфразвуковых колебаний от главного землетрясения 5 декабря 2014 г. в акватории оз. Хубсугул показал, что записанный в пункте Геофизическая обсерватория ИСЗФ “Торы” инфразвуковой сигнал формируется источниками трёх типов генерации: локальным, вторичным и эпицентральной. Полученные результаты дают основание предложить модель генерации эпицентрального инфразвукового сигнала за счёт изгибных волн упругой ледовой мембраны на поверхности оз. Хубсугул.

Ключевые слова: афтершок, землетрясение, гипоцентр, сейсмическая волна, инфразвуковая волна, изгибная волна, эпицентр.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845610-614>

Ночью 5 декабря 2014 г. в акватории оз. Хубсугул на севере Монголии произошли два землетрясения, а на расстоянии около 180 км в пункте “Торы” (Тункинская котловина, Россия) были зарегистрированы инфразвуковые сигналы, соответствующие толчкам во времени, по разности времён и по энергетическим классам. Анализ записей сейсмических и инфразвуковых колебаний показал, что инфразвуковой сигнал формируется от источников трёх типов генерации: локального, вторичного и эпицентрального. Предложена модель генерации эпицентрального инфразвукового сигнала изгибными волнами в упругой ледовой мембране на поверхности оз. Хубсугул, возникающими при прохождении пакетов продольных Р-, поперечных S- и поверхностных L-волн. Модель объясняет подобие сейсмического и эпицентрального инфразвукового сигналов, отрицательную начальную фазу эпицентральных инфразвуковых волн, а также фиксацию слабого инфразвукового сигнала, возникшего после афтершока малой магнитуды.

Одним из источников инфразвуковых колебаний являются землетрясения; совместные

сейсмические и инфразвуковые сигналы от сильных землетрясений регистрируются давно и достаточно часто. По результатам изучения Великого Аляскинского землетрясения (27.03.1964 г., магнитуда $M \sim 9,0$) сообщалось, что инфразвуковые колебания генерируются вертикальными движениями земной поверхности при транзите волн Рэлея [1], сотрясениями хребта Скалистые горы [2] и колебаниями земной поверхности в эпицентральной области [3]. Описание инфразвуковых колебаний от катастрофического Гоби-Алтайского землетрясения (4.12.1957 г., $M = 8,1$) также указывает на формирование сигнала от источников трёх типов генерации: локального, вторичного и эпицентрального [4].

Начиная с 1972 г. в пунктах “Бадары” и “Торы” на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны были зарегистрированы инфразвуковые колебания различной природы [5, 6], но землетрясения как источники инфразвуковых сигналов не были идентифицированы. На рис. 1 представлена карта эпицентров 149 землетрясений с магнитудой $M_{LH} \geq 4$, произошедших на этой территории с 1972 по 2014 г. и являющихся потенциальными источниками инфразвуковых колебаний [7]. Исключение составляют два толчка, произошедшие недавно в акватории оз. Хубсугул (землетрясение 05.12.2014 г.; 18:04:19,7 UT, $\phi = 51,37^\circ$ с.ш., $\lambda = 100,63^\circ$ в.д., энергетический класс $K_p = 13,9$, моментная магнитуда $M_w = 4,9$ и его афтершок 05.12.2014 г.; 18:25:09,3 UT, $\phi = 51,36^\circ$ с.ш.,

¹ Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск

² Институт земной коры
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск

* E-mail: sor@iszf.irk.ru

$\lambda = 100,65^\circ$ в.д., $K_p = 11,9$, $M_w = 4,2$). При этих толчках в п. “Торы” (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН) выделены инфразвуковые сигналы, близко соответствующие времени в очаге и коррелируемые по разности времени между толчками, а также по магнитуде, что является доказательством совместного причинно-следственного явления. Уникальность сейсмоакустического парного явления позволяет предположить неординарную природу источника генерации инфразвуковых сигналов.

Чувствительность инфразвуковой аппаратуры в п. “Торы” устанавливается и настраивается с помощью калибратора инфразвуковых микрофонов. Действие калибратора основано на адиабатическом законе Пуассона, из которого следует соотношение между вариацией объёма и соответствующими изменениями давления в данном объёме. Используется калибровочное устройство типа пистонфон со следующими параметрами: рабочий диапазон частот 0,01–4 Гц, диаметр поршня пистонфона 5 мм, длина хода 1 см, ёмкость референтного объёма 36 дм³, амплитуда искусственного давления (сигнала) составляет 8 дин/см² (мкбар). При амплитуде калибровочного сигнала в 8 мкбар выходной электрический сигнал микробарографа равен 0,8 В и чувствительность аппаратуры в полосе частот пропускания составляет 0,1 В/мкбар. Амплитуда инфразвукового сигнала от главного землетрясения 05.12.2014 г. на записи составляет около 0,1 В (1–1,5 мкбар) и примерно в два раза выше уровня атмосферного фона (микробаром). Такая чувствительность системы из трёх микробарографов, расположенных в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника со стороной 500 м, позволяет (особенно в зимнее время с применением пространственных фильтров ветровых помех в виде двух дюймовых трубных линий с системой капиллярных отверстий) уверенно регистрировать штормовые микробаромы с северо-западного направления с амплитудой менее 1 мкбар. Инфразвуковая станция ИСЗФ СО РАН фиксирует инфразвуковые волны от пролетающих реактивных самолётов, от космических ракет, стартующих с Байконура и проходящих над Иркутской областью, сигналы от карьерных взрывов и грозовых разрядов, которые очень активны вдоль горной системы Восточных Саян [5, 6].

В простейшем случае для определения расположения источника инфразвуковых сигналов по данным одного пункта наблюдения нужно знать азимут на источник, скорость и время распространения сигнала в атмосфере. К сожалению, по техническим причинам время в п. “Торы”

существенно отставало от точного мирового времени, и поэтому время прихода инфразвукового сигнала в пункт регистрации нельзя использовать для определения положения основного источника. С целью определения местоположения источника, исследования природы и механизма генерации инфразвуковых сигналов от двух землетрясений 05.12.2014 г. нами выполнен анализ волновых форм сейсмических и инфразвуковых записей, а также смоделирована трасса распространения инфразвуковых сигналов при реальной температурной стратификации атмосферы. На основе высотного профиля температуры атмосферы методом лучевых траекторий от источника излучения до приёмной инфразвуковой станции было локализовано место возбуждения основного инфразвукового сигнала, которое совпало с эпицентром землетрясения (рис. 1).

Записи широкополосной аппаратурой “Güralp” скорости смещения почвы на сейсмостанциях представлены на рис. 1. Как обычно, на таких небольших гипоцентральных расстояниях отчётливо выделяются пакеты продольной Р- и поперечной S-волн примерно равной амплитуды, но разного частотного состава, а поверхностные L-волны Лява наблюдаются только на станции “Кырен” (KRN), расположенной в Тункинской

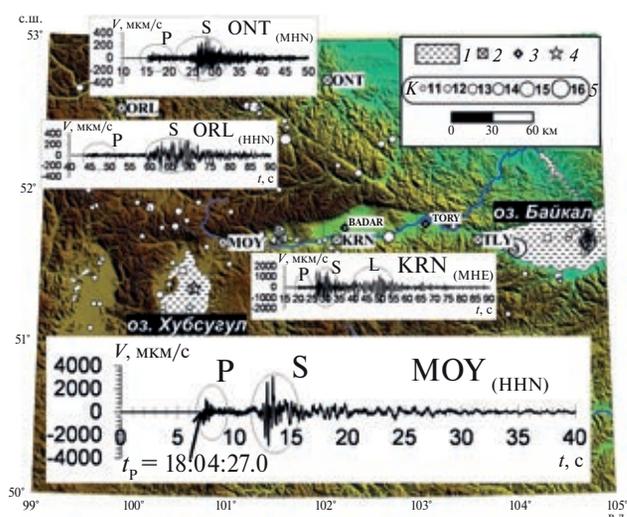


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений с $M_{LH} \geq 4$, зарегистрированных на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны с 1972 г. 1 — озера Хубсугул и Байкал, 2 — сейсмические станции, 3 — инфразвуковые станции, 4 — эпицентры главного землетрясения 05.12.2014 г. и его афтершока, 5 — эпицентры землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 11$ (магнитуда $M_{LH} \geq 4$). На врезках приведены записи главного землетрясения на сейсмических станциях, оснащенных широкополосной аппаратурой “Güralp” (Орлик (ORL), Онот (ONT), Кырен (KRN)). Внизу — запись сейсмостанции Монды (MOY), время вступления Р-волны $t_p = 18:04:27.0$.

впадине; аналогичная картина наблюдается на сейсмограммах афтершока. На самой близкой к эпицентру сейсмостанции “Монды” (МОУ) запись Р-волны главного землетрясения имеет длительность $L \approx 1$ с, состоит из $n \approx 3-4$ гладких колебаний с максимальной амплитудой $A \approx 1770$ мкм/с и частотой $f \approx 3-4$ Гц (рис. 1, внизу). Примерно через 5,5 с после начала записи вступает объёмная поперечная S-волна длительностью до 5 с с $A \approx 1850$ мкм/с и $f \approx 1,3$ Гц. Разность между вступлениями Р- и S-волн составляет около 5,5 с, что даёт величину гипоцентрального расстояния $r \approx 45$ км ($8,1$ км/с \cdot $5,5$ с $\approx 44,5$ км). Расчётами установлено, что среднее значение сейсмического момента главного землетрясения равно $M_0 \approx 1,60 \cdot 10^{17}$ Н \cdot м (тип подвижки сбросо-сдвиг), а афтершока — $M_0 \approx 1,20 \cdot 10^{16}$ Н \cdot м (сброс). Средние радиусы дислокации и смещения по разлому равны $R \approx 2,0$ и $R \approx 1,4$ км, $D \approx 1,12$ и $D \approx 0,26$ м для главного толчка и афтершока соответственно.

Запись инфразвуковых сигналов в пункте регистрации “Торы” содержит два разделённых во времени пакета: первый пакет от главного землетрясения начинается на фоне низкочастотных шумов слабыми колебаниями, которые перерастают в колебания большой амплитуды (рис. 2). Второй пакет от афтершока, зафиксированный примерно через 20 мин после первого, представлен слабыми колебаниями на фоне низкочастотных шумов; колебания значительной амплитуды отсутствуют. Записи пакетов достаточно близко соответствуют времени в очаге землетрясений, временной лаг между пакетами (примерно 20 мин.) совпадает с интервалом времени между сейсмическими толчками (20 мин 50 с), а уровень колебаний коррелирует с магнитудами главного толчка и афтершока. Азимут источника инфразвукового сигнала, рассчитанный по кросскорреляционным задержкам между инфразвуковыми каналами, составляет около 270° и соответствует направлению на эпицентр землетрясения. Всё это служит доказательством факта генерации инфразвуковых сигналов двумя землетрясениями, произошедшими 05.12.2014 г. в акватории оз. Хубсугул.

Колебания малой амплитуды в начальной части записи могут свидетельствовать о подходе слабых инфразвуковых сигналов с частотой около 2–3 Гц, возбуждаемых различными локальными и вторичными источниками при распространении сейсмических волн (рис. 2) (local infrasound, secondary infrasound [7]). По записям одной инфразвуковой станции “Торы” источники этих колебаний идентифицировать трудно: скорее всего, это влияние особенностей рельефа. Если связывать их с проявлениями L-волн, то влияние могут

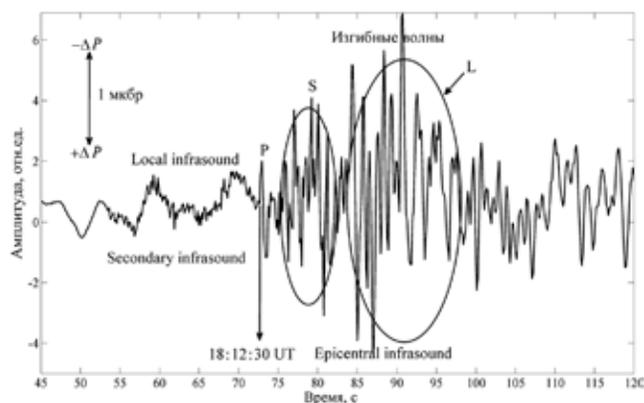


Рис. 2. Группы волн на записи инфразвуковых колебаний от главного землетрясения и их интерпретация. Подписи на рисунке Local infrasound, Secondary infrasound и Epicentral infrasound (по аналогии из [7]) разделяют запись инфразвуковых колебаний на участки по месту и природе генерации: локальные (около станции “Торы” при транзите сейсмических волн), вторичные (топография и прочие особенности земной коры при транзите сейсмических волн) и эпицентральные (поверхностные пульсации над очагом землетрясения). P, S и L — сигналы, сгенерированные ледовой поверхностью при прохождении объёмной продольной Р-волны, объёмной поперечной S-волны и поверхностной L-волны и формировании изгибных волн.

оказать особенности морфологии фундамента и распределения по глубине осадков в Тункинской и Торской впадинах. Далее на записи выделяется основной сигнал (epicentral infrasound [7]), инфразвук, генерируемый пульсацией поверхности над очагом землетрясения), начинающийся одним гладким импульсом значительной амплитуды с частотой около 1,2 Гц и длительностью менее 1 с (P). За ним в течение 1 с снова видны высокочастотные колебания малой амплитуды. Далее в течение 5 с виден цуг из нескольких колебаний повышенной амплитуды с частотой около 1 Гц (S), после которого сигнал ослабевает и в интервале 1 с снова видны высокочастотные колебания малой амплитуды. Разность времен начала первого гладкого импульса (P) и цуга (S) составляет около 2 с. Далее на записи видна группа максимальных амплитуд с частотой менее 1 Гц и продолжительностью 6–7 с (L) (рис. 2).

Совместный анализ волновых форм инфразвукового сигнала и сейсмограммы землетрясения позволяет связать первый значительный гладкий импульс (P) с продольной Р-волной в зоне очага землетрясения, когда из-за небольшого гипоцентрального расстояния сейсмическая волна имеет малую длительность и не осложнена неоднородностями среды. Цуг из нескольких колебаний повышенной амплитуды (S) с частотой около 1 Гц и

продолжительностью около 5 с интерпретируется нами как реализация поперечной S-волны. Поскольку разность времён начала первого гладкого импульса и цуга составляет около 2 с, то источник генерации инфразвука находился на расстоянии около 16 км от гипоцентра землетрясения ($8,1 \text{ км/с} \cdot 2 \text{ с} \approx 16 \text{ км}$). Как видно на рис. 1, примерно на таком расстоянии расположены от эпицентра береговые горные сооружения на западе и востоке оз. Хубсугул, которые могут служить источником инфразвуковых волн при сейсмических колебаниях большой амплитуды [8]. Однако присутствие на записи группы максимальных амплитуд с частотой менее 1 Гц и продолжительностью 6–7 с даёт возможность высказать более интересное и достаточно обоснованное предположение о генерации этой группы инфразвуковых волн пульсацией ледовой поверхности оз. Хубсугул в результате прохождения поверхностных L-волн, созданных в осадочном слое Хубсугульской впадины. В таком случае гладкий импульс и два цуга, описанные выше, обусловлены

пульсацией ледовой поверхности озера при формировании изгибных волн во время прохождения пакетов P-, S- и L-волн [9, 10]. Расстояние в 16 км нужно рассматривать как гипоцентральное расстояние, т.е. как глубину гипоцентра главного землетрясения, которая по обоснованным данным составляет $16,5 \pm 4,3$ (NEIC) и $22,8 \pm 1$ км (GCMT) [11]. В целом гипотеза пульсации ледовой поверхности объясняет уникальность генерации инфразвуковых сигналов от землетрясений 5 декабря 2014 г. под оз. Хубсугул и единственность их регистрации при почти 150 произошедших землетрясениях с магнитудой $M_{\text{LH}} \geq 4$ (с магнитудой $M_{\text{LH}} \geq 5$, соответствующей магнитуде главного землетрясения $M_{\text{W}} = 4,9$, зарегистрировано 17 землетрясений).

Расчёты основной моды колебаний ледовой поверхности-мембраны выполнены на фиксированной пространственной сетке для 0,38-секундного интервала времени по программе [12]. Принята равномерная координатная сетка 22×22 для четырёхкилометровой квадратной области, что

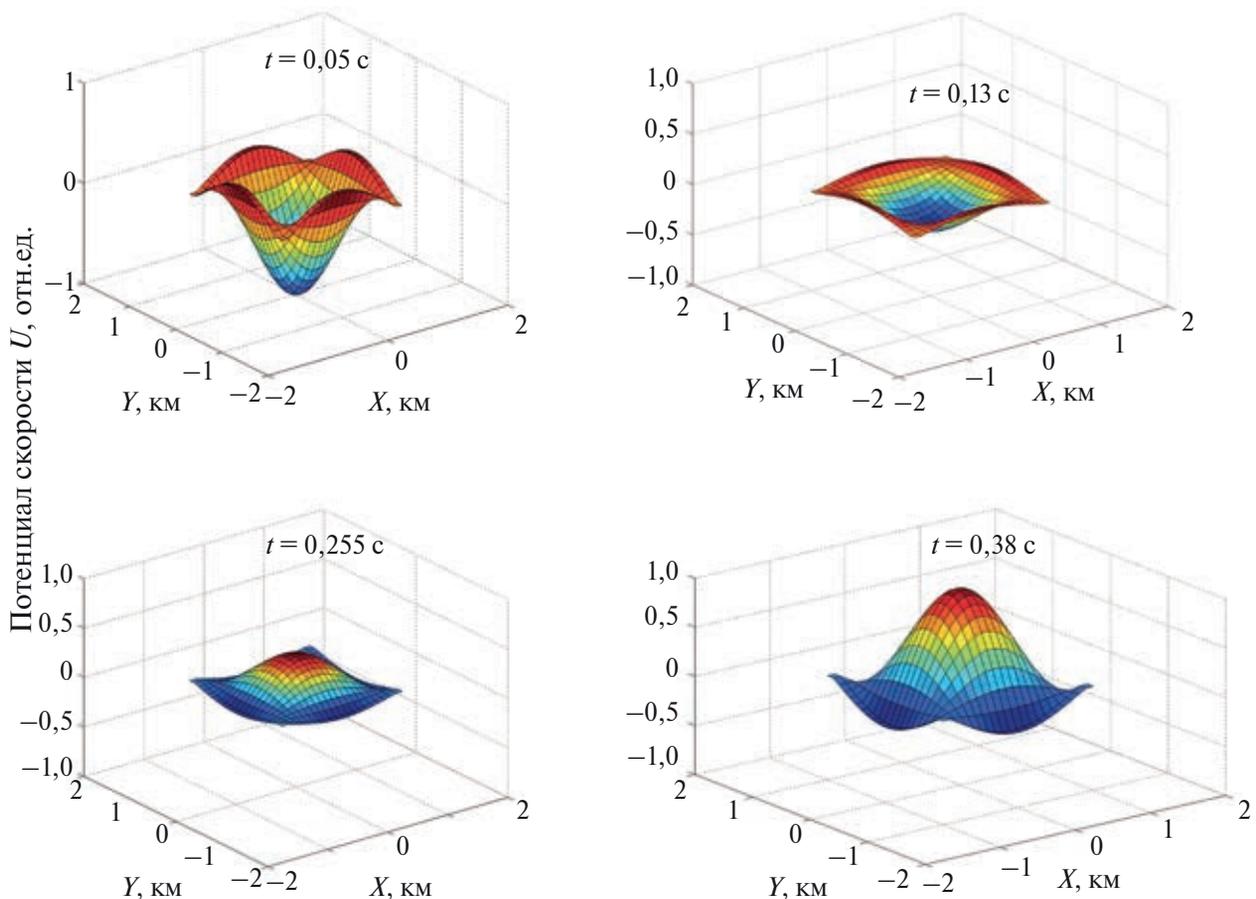


Рис. 3. Морфология основной моды колебаний ледовой поверхности-мембраны в моменты времени: $t = 0,050; 0,130; 0,255; 0,380$ с.

соответствует размеру дислокации главного землетрясения $R \approx 2,0$ км. Представленные на рис. 3 результаты расчётов носят предварительный характер и дают возможность объяснить происхождение эпицентрального инфразвукового сигнала пульсациями ледовой поверхности оз. Хубсугул над очаговой областью землетрясений, его отрицательную начальную фазу. Расчёты показали, что амплитуда инфразвукового сигнала в источнике составляет около 28 дн/см^2 и соответствуют амплитудам сигналов от промышленных взрывов по программе “МАССА” [13]. Эта оценка близка амплитудам инфразвуковых сигналов от сейсмических источников, наблюдаемым другими авторами [8, 14, 15].

Благодарности. Авторы признательны Н.А. Гилевой (Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН) и В.В. Мордвиновой (Институт земной коры СО РАН) за любезно предоставленные записи землетрясений.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках базового финансирования ФНИ П.16. Результаты получены с помощью оборудования инфразвуковой станции Института солнечно-земной физики СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bolt B.A. // Nature. 1964. V. 202. P. 1095–1096.
2. Young J.M., Greene G.E. // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 71. P. 334–339.
3. Mikuto R. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 2009–2025.
4. Пасечник И.П. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 11. С. 1687–1689.
5. Sorokin A.G., Ponomarev E.A. // J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys. 2008. V. 70. P. 1110–1121.
6. Сорокин А.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 1. С. 102–106.
7. Arrowsmith S.J., Johnson J.B., Drob D.P., Hedlin M. A. H. // Rev. Geophys. 2010. V. 48. RG4003.
8. Le Pichon A., Guilbert J., Vallée M., Dessa J. X., Ulziibat M. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 15. 1814.
9. Черных Е.Н., Ключевский А.В., Ружич В.В. // Вопр. инж. сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 29–38.
10. Черных Е.Н., Ключевский А.В., Ружич В.В. // Сейсм. приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 55–66.
11. International Seismological Centre. On-line Bulletin. <http://www.isc.ac.uk>. Internat. Seismol. Cent. Thatcham, 2013.
12. Рыдин Е.А., Лысенко И.Е. Решения задач математической физики в системе Matlab. Таганрог, 2005. 65 с.
13. Альперович Л.С., Вугмейстер Б.О., Гохберг М.Б. и др. // ДАН. 1983. Т. 269. № 3. С. 573–579.
14. Голицын Г.С., Кляцкин В.И. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3. № 10. С. 1044–1052.
15. Mutschlecner J.P., Whitaker R.W. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. D01108.

INFRASOUND SIGNALS FROM EARTHQUAKES OF DECEMBER 5, 2014 IN THE WATER AREA OF LAKE HOVSGOL, NORTHERN MONGOLIA

A. G. Sorokin¹, A. V. Klyuchevskii²

¹The Institute of Solar- Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

²Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS G. S. Golitsyn August 21, 2018

Received September 6, 2018

A comprehensive analysis of waveforms of seismic and infrasonic vibrations from the earthquake that occurred on December 5, 2014, in the water area of Lake Hovsgol was performed. The analysis showed that the infrasonic signal recorded at the Tory station (Geophysical Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences) was formed by the sources of three generation types: local, secondary, and epicentral. The obtained results allow us to propose the model of epicentral infrasonic signal generation by flexural waves from an elastic ice membrane on the surface of Lake Hovsgol.

Keywords: aftershock, earthquake, hypocenter, seismic wave, infrasonic wave, flexural wave, epicenter.