© Б.И. Клячин, 2018, Океанологические исследования, 2018, Том 46, № 2, С. 28–36

УДК 551.463.21 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).3

НИЗКОЧАСТОТНОЕ ПОЛЕ ШУМОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Б.И. Клячин

Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, 127051, ул. Сретенка, 29 тел. 8(909)640-66-09, e-mail: klboris@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

Широко известны многочисленные исключительные особенности озера Байкал. В данной работе рассматривается еще одно уникальное свойство озера: собственное низкочастотное шумовое поле Байкала сильно похоже на низкочастотное шумовое поле глубокого океана. Рассчитывается глубинная зависимость шума в озере летом. Производится подробное сравнение основных характеристик низкочастотного шума в глубоком океане и Байкале.

Ключевые слова: Байкал, низкочастотное поле шумов, глубинная зависимость шумов

Вступление

Известно, что шумовое поле глубокого океана обладает некими характерными параметрами. Это поле собирается с большой акватории благодаря многократным отражениям от поверхности океана. При этом преобладает шум в так называемых водных лучах, отраженных от поверхности и не дошедших до дна. Размер области, где собирается шум, может составлять сотни километров. В последнее время возрос интерес к исследованию распространения звука в озерах. В основном озера используются как более доступный, чем океан, объект для изучения распространения звука. И процессы распространения звука в разных озерах могут быть похожи на соответствующие законы в океане.

Другое дело низкочастотные шумы. Размеры озер, даже самых больших, сопоставимы или меньше размеров области, с которой собираются низкочастотные шумы глубокого океана. Поэтому в озерах, как правило, нет достаточно протяженной области, где шумовое поле будет однородно по горизонтали. Везде, в любой точке озера, будут «краевые эффекты» – форма берегов и расстояние от этой точки до берегов. Возможно, конечно, найти относительно мелкое озеро, где будет горизонтально однородное низкочастотное шумовое поле, но оно совсем не такое, как в глубоком океане. По-видимому, единственным исключением является Байкал. (Озеро Танганьика похоже на озеро Байкал по форме и глубине. Но там, ввиду жаркого климата, скорость звука у поверхности весьма велика, не меньше, чем скорость звука у дна озера. В результате, в Танганьике нет водных лучей, которые не испытывают отражения от дна, и нет характерного для океана низкочастотного шумового поля).

Методы исследования

В Байкале проводились измерения высокочастотных акустических шумов при работах, связанных с нейтринным телескопом (Айнутдинов, 2006).

Определим точнее частоты шумовых полей, которые исследуются в данной работе. Мы будем применять лучевую теорию (точнее теорию переноса излучения). Это можно делать, когда на толщине волновода укладывается десять и более длин волн. Для океана (глубина 6 км) это соответствует частоте в единицы герц и выше. Для озера (1.6 км) – первые десятки герц и выше.

С другой стороны, пренебрежение полем донных лучей (эти лучи испытывают донные отражения) связано с малым затуханием звука на циклах водных лучей. Это ограничивает частоту исследуемых здесь полей сверху. Для океана – это сотни герц и ниже, для озера (короткие лучи) – первые килогерцы и ниже.

Для расчета шумового поля в озере Байкал воспользуемся работой (Клячин, 2009), где посчитано поле шумов в разломе дна в океане. Байкал представляет собой разлом земной коры, заполненный пресной водой. Рассчитать шумовое поле в этом озере даже проще, чем в разломе дна в океане. Действительно, при анализе шумового поля в разломе дна в океане и над ним необходимо рассчитать шум и в слоистой части океана, и в разломе. А здесь нам нужно исследовать только шум в разломе (озере).

Более подробно метод расчета изложен в работе (Курьянов, Клячин, 1981). В работе (Клячин, 2017) приведены некоторые примеры теоретического изучения похожих объектов в океане.

Математическая модель шумового поля

Отметим, что, как и в океаническом разломе, в Байкале шум будет накапливаться вдоль самого разлома. В перпендикулярном направлении шум накапливаться не будет. Байкал состоит из трех котловин с горизонтальным размером около 100 км каждая, вытянутых вдоль разлома. Максимальная глубина озера чуть больше, чем 1.5 км. Это существенно меньше, чем в океане. Но при этом выполняется условие: скорость звука у поверхности меньше, чем у дна (Макаров, Ченский, 2009; Юрин, 2009; Толмачева, 2012; Овчинникова, 2008). Длина цикла водного луча будет 2–3 км, что существенно меньше, чем в океане, где глубина обычно более 5 км. И длина цикла водного луча океана составит 20–30 км. Следовательно, размер области, где шумовое поле станет самосогласованным, у озера существенно меньше, чем в океане. В каждой из трех котловин Байкала укладывается значительно больше, чем десять циклов лучей. (Что достаточно для наличия установившегося шумового поля, однородного по горизонтали). Итак, размер области, где среда и источники шума должны быть однородны по горизонтали, – более 30 км для озера и более 300–500 км для океана.

Опишем пучок водных лучей озера более детально. Самый короткий (первый) водный луч является касательным к поверхности озера. И этот луч заворачивает

на критической глубине, где скорость звука становится равной скорости звука у поверхности. Самый длинный (второй) водный луч выходит с поверхности и заворачивает на дне. Все остальные водные лучи оказываются между этими двумя лучами. Этот пучок весьма узок.

Основным фактором, влияющим на скорость звука в озере, является температура (Макаров, Ченский, 2009; Юрин, 2009). Распределение скорости звука по глубине стабильно зимой и летом и меняется весной и осенью. Мы будем рассматривать шумовое поле в стабильный период (летом и зимой). При этом характерное для Байкала распределение скорости звука с глубиной летом отличается очень высоким положением оси подводного звукового канала – горизонтом минимума скорости звука. Глубина этой оси – всего 100 м. Данное обстоятельство приводит к тому, что критическая глубина (где скорость звука равна скорости звука у поверхности) так же находится очень высоко (750 м). Отсюда следует, что пучок водных лучей будет формироваться на промежуточных глубинах – более 750 м. А это значительная часть акватории, в особенности в южной и центральной котловинах. Следовательно, детали рельефа, отраженные точными картами, мало скажутся на представленном результате – шуме озера в центральных районах южной и центральной котловин.

Мы используем теорию переноса излучения (Исимару, 1981; Курьянов, Клячин, 1984). Основной величиной является плотность потока мощности шума в единичный телесный угол и на единичную площадку – I. В слоистой среде вдоль луча выполняется соотношение: $Ic^2 = const$, где c – скорость звука. Известно, что затухание низкочастотного звука мало́. Пренебрежем затуханием шума на одном цикле луча. (Это не означает отсутствие затухания шума на многих циклах луча).

Расчет мог бы быть выполнен и по-другому. Можно воспользоваться классической лучевой теорией и учесть все многократные отражения шумового поля от всех источников, находящихся на поверхности водоема. Результат, естественно, будет такой же (Фурдуев, 1974).

Рассчитаем график распределения интенсивности шумового поля от глубины в центральной части котловин озера, где выполняется условие горизонтальной однородности среды. Уже отмечалось, горизонтальная однородность среды приводит к горизонтальной однородности шумового поля. Следовательно, лучевая интенсивность в любой точке поверхности во всех лучах узкого водного пучка будет одна и та же – I_n (это не интенсивность реального излучения на поверхности озера. Мы можем относительно легко рассчитать связь между этими двумя интенсивностями, проследив лишь один полный цикл шумового луча (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981)). Но здесь такое исследование не требуется.

Итак, используя I_n, получим лучевую интенсивность шума в любом водном луче на глубине z: $I_z = I_n(c_n^2/c_z^2)$, где c_n – скорость звука у поверхности, c_z – скорость звука на глубине z.

Чтобы перейти к итоговой интенсивности (энергии) шума в точке z, нужно просуммировать лучевые интенсивности по всему телесному углу, который заполнен водными лучами. Кроме того, нужно ввести множитель $1/c_z$ (чем меньше c_z,

тем больше энергии «застрянет» в данной точке (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981)).

Мы считаем I_n одинаковыми для всех водных лучей, тогда I_z будет также одинакова для всех этих лучей. Следовательно, зависимость интенсивности (энергии) шума от глубины определяется, почти исключительно, изменением телесных углов прихода водных лучей на разные глубины. Эта глубинная зависимость определяется формой пучка водных лучей.

Согласно закону Снелиуса, угол первого граничного водного луча на горизонте z – $\theta_z^I=arcsin(c_z/c_n)$ – (луч касательный к поверхности). Второй граничный луч (касательный ко дну) имеет на горизонте z *угол* $\theta_z^{II}=arcsin(c_z/c_\partial)$, где с – скорость звука у дна озера.

Итак, интенсивность шума на глубине z будет пропорциональна разности между этими углами:

$$E(z)=K\,[arcsin(c_z/c_n) - arcsin(c_z/c_\partial)]/c_z^3, \qquad (1)$$

где K – коэффициент пропорциональности. В него входят в качестве множителей: лучевая интенсивность шума на поверхности озера I_n, c_n^2, затухание звука.

Кроме того, нужно учесть, что не все 2π горизонтальных направлений будут наполнены шумом. Шумом будут наполнены только те горизонтальные направления, где луч успеет проделать десять и более полных циклов водного луча прежде, чем выйдет за границы разлома. Так мы учитываем то, что имеем дело с разломом. Это обстоятельство приведет к наличию еще одного множителя < 1 в коэффициенте K.

Поскольку мы будем в дальнейшем представлять результаты расчетов в децибелах, коэффициент пропорциональности K не повлияет на окончательный результат.

Важно отметить, что для глубин больших критической глубины $z \geq z_o$ (z_o –критическая глубина, где скорость звука равна скорости звука на поверхности), формула (1) будет выглядеть несколько иначе:

$$E(z)=K[\pi/2 - arcsin(c_z/c_\partial)]/c_z^3, \qquad (2)$$

Поскольку на данных глубинах угол первого граничного луча водных лучей всегда равен π/2.

Из этих формул видно, что для конкретного распределения скорости звука по глубине $E(Z)$ зависит только от $C(Z)$. Следовательно, как и в океане (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981), выполняется закон «сопряженных глубин»: интенсивность шума одинакова на глубинах с равной скоростью звука. (В частности на критической глубине интенсивность шума равна интенсивности шума на поверхности).

Поле шумов летом

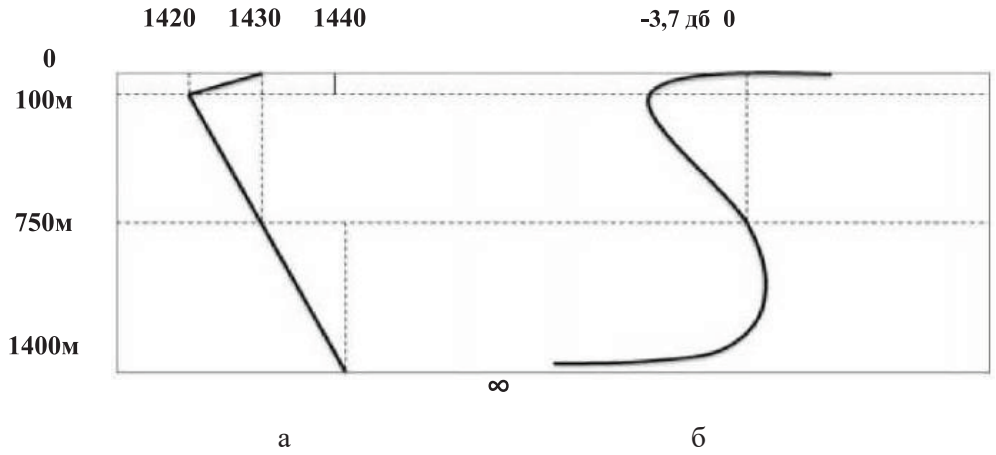

Рис. 1.

На рисунке 1 приведены результаты расчетов по этим формулам. На рисунке 1а представлено летнее распределение скорости звука с глубиной в Байкале. Это распределение очень похоже на океаническое. Отличия: относительно малая глубина (около 1.5 км). Ось подводного канала и критическая глубина на небольших глубинах –100 м и 750 м соответственно. Скорость звука на поверхности – 1430 м/с, на оси канала 1420 м/с, у дна – 1440 м/с. Скорость звука везде существенно меньше океанической (пресная вода).

На рисунке 1б приведена летняя глубинная зависимость интенсивности шума. Минимум на оси канала (-3.7 дб), максимум чуть ниже критической глубины. При приближении ко дну интенсивность шума убывает до бесконечности (в децибелах).

Такие особенности глубинной зависимости связаны, как это уже упоминалось, с формой пучка водных лучей.

Минимум шума на оси канала связан с тем, что здесь углы водных лучей ближе всего к вертикали. (Здесь энергия шума как бы быстрее всего «покидает» эти горизонты).

Максимум шума ниже критической глубины. Это вызвано тем, что углы водных лучей на данной глубине ближе всего к горизонтали. (Водные лучи как бы больше «находятся» на этих горизонтах).

Интенсивность шума убывает ко дну, так как, чем ближе ко дну, тем меньше водных лучей туда доходит.

Это очень похоже на океаническую глубинную зависимость интенсивности шума (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981). Отличия:

1. Разброс значений скорости звука в озере меньше, чем в океане. И разброс значений интенсивности шума в озере также меньше, чем в океане. Так ослабление шума на оси подводного канала в озере не такое большое, как соответствующее ослабление в океане.

2. Вертикальный градиент скорости звука у озера, напротив, больше, чем в океане. И вертикальный градиент интенсивности шума у озера больше.

3. Область ниже критической глубины занимает существенно больший объем озера (1/2), чем аналогичная область в океане (1/5).

Направленность шума до критической глубины (не изображена на рисунке) – два узких лепестка в симметричных направлениях под значительным углом с горизонталью. Ниже критической глубины направленность представляет собой один лепесток в горизонтальном направлении.

Поле шумов зимой

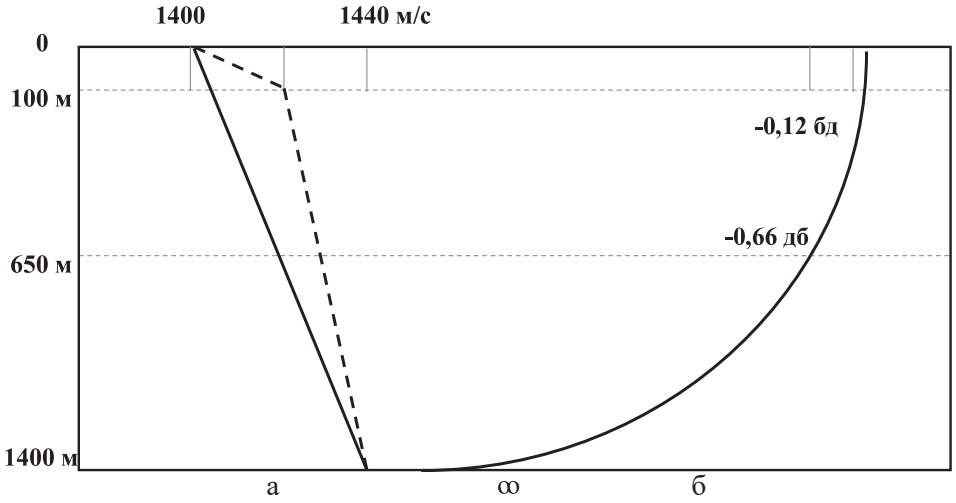

Рис. 2.

Для условий зимней гидрологии (рис. 2а) будем считать, что скорость звука линейно возрастает от 1400 м/с на поверхности до 1440 м/с у дна. В реальности там близкое к указанному, но билинейное распределение. При этом для расчета используется только вторая формула. Зимой Байкал покрыт льдом. Механизмы излучения шума на поверхности озера другие, чем летом. Но пучок усиливающихся водных лучей так же узок. Особенности генерации шума на представленный результат не повлияют. Интенсивность шума падает с глубиной при приближении ко дну до бесконечности. В этом случае все озеро как бы находится ниже критической глубины. Все особенности соответствующей глубинной зависимости уже обсуждались в предыдущем случае.

Заключение

Данная работа посвящена самым общим особенностям низкочастотного шумового поля озера. Следующими шагами в этом направлении исследований скорее всего будет:

1. Учет сложного рельефа дна, особенно прибрежной части Байкала.

2. Исследование шумового поля в период между сезонами, при более сложных, чем в этой работе, гидрологических условиях.

3. Изучение шума впадающих в озеро рек.

Для этого потребуются детальные гидрологические данные (Шерстянкин, Куимова, 1992; Шерстянкин, Куимова, Потемкин 1998). Так же нужны и подробные сведения о рельефе дна озера. Они имеют современное и наглядное представление (Batist, Canals, Sherstyankin, Alekseev 2002).

Итак, низкочастотное шумовое поле озера Байкал в разные сезоны похоже на поле шумов глубокого океана, хотя и обладает некоторой спецификой. По-видимому, Байкал – единственное озеро с таким низкочастотным шумом.

Литература

Айнутдинов В.М. и др. Высокочастотные акустические шумы озера Байкал // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 5. С. 581–591.

Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Москва: Мир, 1981. Т. 1. 280 с.

Клячин Б.И. Сильные горизонтальные неоднородности шумовых полей в океане // Ученые записки физического факультета Московского Университета. № 5: октябрь. 2017. С. 1–3.

Клячин Б.И. Эффект усиления собственного шума океана над разломом дна // Доклады XII школы семинара Акад. им. Л.М. Бреховских М.: Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова, 2009. С. 268–271.

Курьянов Б.Ф., Клячин Б.И. К теории глубинной зависимости низкочастотных шумов океана // Доклады АН СССР. 1981. Т. 259. № 6. С. 1483–1488.

Курьянов Б.Ф., Клячин Б.И. Применение теории переноса излучения к задачам распространения шумов океана // Проблемы акустики океана: Сборник / под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреева. М.: Наука, 1984. С. 16–30.

Макаров М.М., Ченский А.Г. Изучение дальнего распространения звука на озере Байкал: оборудование, экспериментальные данные // Доклады XII школы семинара им. Акад. Бреховских Л.М. / Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 119–122.

Овчинникова Н.С. Северный Байкал // ГП 475 Военно-картографическая ф-ка. Республика Бурятия: 2008. [Карты].

Озеро Байкал / под ред. Толмачевой // Иркутск: ВостСиб АГП, 2012. [Карты].

Озеро Байкал / под ред. Ю.М. Юрина // Иркутск: ВостСиб АГП, 2009. [Карты].

Фурдуев А.В. Шумы океана // В кн.: Акустика океана / ред. Л.М. Бреховских. Москва: Наука, 1974. С. 617–688.

Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н. Основные черты поля скорости звука и подводный звуковой канал в открытом Байкале // Доклады РАН. 1992. Т. 324. № 1. С. 187–190.

Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н., Потемкин В.Л. Особенности поля скорости звука глубокого пресного водоема на примере озера Байкал // Сборник трудов школы-семинара Акад. им. Л.М. Бреховских Акустика океана / Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва: ГЕОС, 1998. С. 348–351.

De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S. & the INTAS project 99–1669 team. A new bathymetric map of lake Baikal. 2002. *http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm.*

LOW FREQUENCY FIELD NOISE OF LAKE BAIKAL

B. I. Klyachin

Moscow State Psychological and Pedagogical University Moscow,
127051, st. Sretenka, 29
tel. 8 (909) 640-66-09, e-mail: klboris@rambler.ru

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

The unique characteristics of Baikal Lake are widely known. This paper is devoted to one more unique feature of the lake: the low-frequency noise field that is very similar to the low-frequency noise field of the deep ocean. The calculation of deep lake noise is conducted for the summer. A thorough comparison of the main characteristics of low-frequencies in the deep ocean and in the Baikal Lake is also presented.

Keywords: Baikal Lake, low frequency noise field, depth dependence of the acoustic noise

References

Ajnutdinov V.M., et al. Visokochastotnye akusticheskie shumy ozera Bajkal: High-frequency acoustic noise of lake Baikal. *Acoustic journal*, 2006, Vol. 5, No. 5, pp. 581–591.

De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S., & the INTAS project 99–1669 team. A new bathymetric map of lake Baikal, 2002, *http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm*.

Furduev A.V. Shumy okeana: In the book Akustika okeana: Ocean acoustics, Add. by L.M. Brekhovskih, Moskow: Nauka, 1974, pp. 617–688.

Isimaru A. Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno-neodnorodnyh sredah: Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media, Moscow: Mir, 1981, Vol. 1, pp. 280.

Klyachin B.I. Jeffekt usilenija sobstvennogo shuma okeana nad razlomom dna: The effect of enhancing the ocean's own noise above the bottom break. Doklady XII shkoly seminara (Reports of the XII seminar school) im. Akademika L.M. Brehovskih, Moskva: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, 2009, pp. 268–271.

Klyachin B.I. Sil'nye gorizontal'nye neodnorodnosti shumovyh polej v okeane. (Strong horizontal inhomogeneities of noise fields in the ocean*). Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo Universiteta: Scientific notes of the Physics Department of Moscow University*, No. 5, October 2017, pp. 1–3.

Kur'janov B.F. and Kljachin B.I. Primenenie teorii perenosa izluchenija k zadacham rasprostranenija shumov okeana: Application of the theory of radiation transfer to the problems of propagation of ocean noise. Sbornik Problemy akustiki okeana (Collection Problems of ocean acoustics), Edd. by L.M. Brehovskih and I.B. Andreeva, Moscow: Nauka, 1984, pp.16–30.

Kur'janov B.F. and Klyachin B.I. K teorii glubinnoj zavisimosti nizkochastotnyh shumov okeana: To the theory of the deep dependence of low-frequency noise of the ocean. *Doklady AN SSSR, Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1981, Vol. 259, No. 6, pp. 1483–1488.

Makarov M.M. and Chenskiy A.G. Izuchenie dal'nego rasprostranenija zvuka na ozere Bajkal: oborudovanie, jeksperimental'nye dannye: Study of long-range sound propagation on Lake Baikal: equipment, experimental data. Doklady XII shkoly seminara (Reports of the

XII seminar school) im. Akademika L.M. Brehovskih, Moskva: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, 2009, pp. 119–122.

Ozero Bajkal. Karty: Lake Baikal. Maps: red. Y.M. Yurin. Irkutsk: VostSib AGP, 2009.

Ozero Bajkal. Karty: Lake Baikal. Maps: red. Tolmacheva. Irkutsk: VostSib AGP, 2012.

Ovchinnikova N.S. Severnyj Bajkal. Karty: Northern Baikal. Maps. GP 475 Voenno-kartograficheskaya f-ka, Republic of Buryatia, 2008.

Sherstyankin P.P. and Kuimova L.N. Osnovnie cherti polya skorosti zvuka i podvodnii zvukovoi kanal v otkritom Baikale: The main features of the sound speed field and underwater sound channel in the open lake Baikal. *Dokladi RAN*, 1992, Vol. 324, No. 1, pp. 187–190.

Sherstyankin P.P., Kuimova L.N., and Potemkin V.L. Osobennosti polya skorosti zvuka glubokogo presnogo vodoema na primere ozera Baikal: Features of the sound velocity field of a deep freshwater reservoir on the example of lake Baikal. Sbornik trudov shkoli-seminara Akad. L.M. Brehovskih, Akustika okeana, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova, Moskva: GEOS, 1998, pp. 348–351.