

УДК 551.466.34

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ПРИДОННОГО ДАВЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО МОРСКИМИ ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ, В СМЕЩЕНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА

© 2024 г. Академик РАН Г. И. Долгих, С. С. Будрин*, С. Г. Долгих

Поступило 29.11.2023 г.

После доработки 11.01.2024 г.

Принято к публикации 15.01.2024 г.

По экспериментальным данным, полученным с помощью лазерного измерителя давления гидросферы и двух лазерных деформографов, была дана количественная оценка преобразования вариаций придонного давления, создаваемого инфрагравитационными волнами, в смещения верхнего слоя земной коры. Определена зависимость коэффициента трансформации придонного давления в упругие колебания земной коры от периодов инфрагравитационных волн.

Ключевые слова: инфрагравитационные волны, микросейсмы, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, лазерный деформограф

DOI: 10.31857/S2686739724050147

Естественный сейсмический шум, возникающий в верхнем слое земной коры, имеет достаточно широкий диапазон и находится в пределах от нескольких секунд до десятков минут. Данный диапазон можно условно разбить на несколько участков, соответствующих периодам характерных физических процессов. Основными явлениями, формирующими естественный сейсмический шум, особенно в прибрежных районах, являются микросейсмы первого и второго рода, вызванные прогрессивными и стоячими морскими гравитационными волнами [1], период которых находится в диапазоне от 2 до 20 с. При этом периоды микросейсм второго рода равны периодам прогрессивных морских волн, а периоды микросейсм первого рода равны периодам стоячих морских волн, которые в два раза меньше периодов прогрессивных волн [2]. Однако самым интересным в плане исследований и самым малоизученным является диапазон периодов больше 20 с, формируемый воздействием инфрагравитационных морских волн на верхний слой земной коры.

Из [3] известно, что инфрагравитационные волны возникают в результате отражения от берега

ветровых волн и зыби, а также в открытом океане в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн и зыби. Колебания же давления, вызванные инфрагравитационными волнами, были идентифицированы в качестве важного источника микросейсмического шума на дне океана [4]. Несмотря на большое количество работ в данном направлении, совсем небольшое количество из них посвящено количественным оценкам вклада инфрагравитационных морских волн в упругие колебания верхнего слоя земной коры. В основном работы посвящены физическим механизмам формирования микросейсмического шума и связи его с инфрагравитационными волнами. Так в [5] показано, что микросейсмический шум в диапазоне 80–100 с связан с инфрагравитационными морскими волнами, возникающими при прохождении шторма и сформированными волнами зыби с периодами 7–10 с. Из немногих работ, посвящённых количественным оценкам влияния инфрагравитационных волн на микросейсмический шум земной коры, можно отметить работу [6], где были получены оценки мощности микросейсмических колебаний, вызванных штормом, в максимальной фазе которого микросейсмический шум достигал уровня 1010–1011 Дж/с. В работе [7] было установлено, что $0.9 \cdot 10^{-7}$ энергии инфрагравитационных морских волн с периодом 38 с переходит в упругие колебания земной коры.

Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской
Академии наук, Владивосток, Россия
*E-mail: ss_budrin@mail.ru

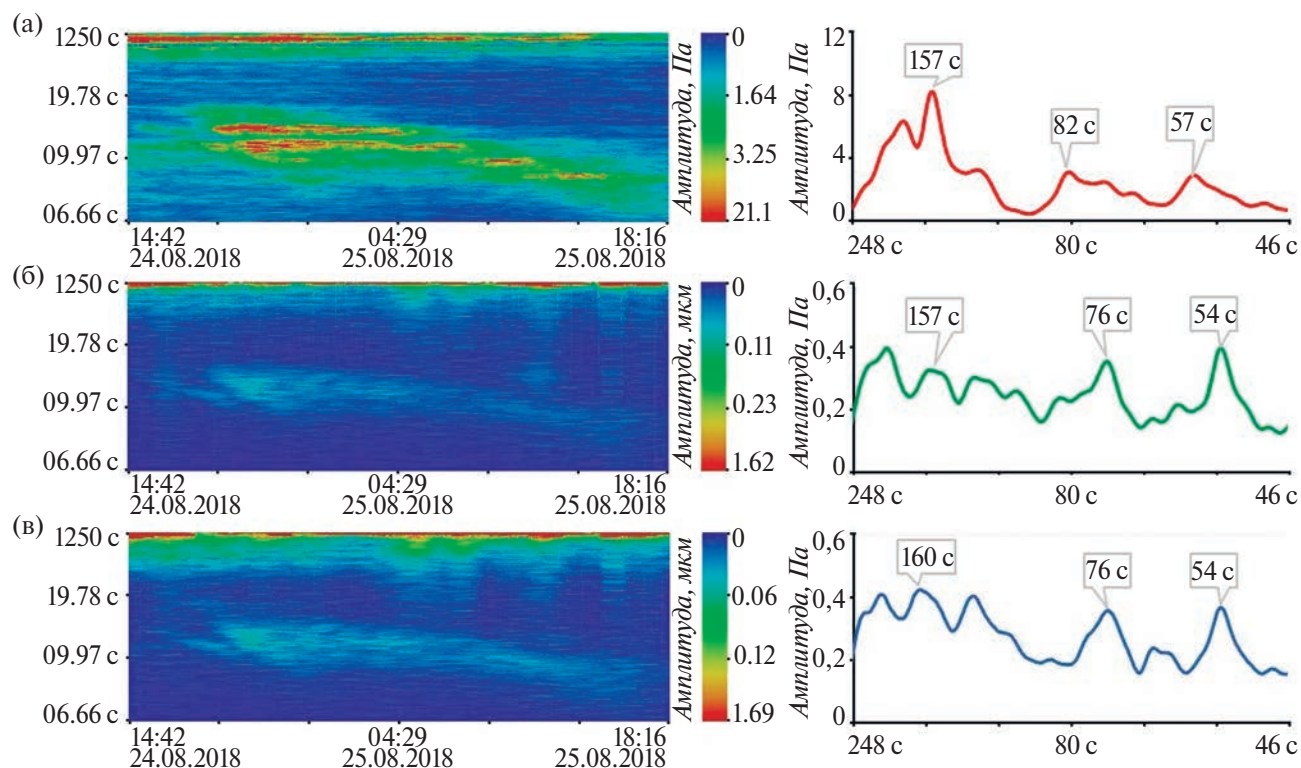


Рис. 1. Спектрограмма прихода основной группы волн зыби и спектр инфрагравитационных волн, зарегистрированных ЛИВДГ (а) и спектрограммы микросейсм второго и спектры микросейсм первого рода, вызванные волнами зыби и инфрагравитационными волнами, полученные с горизонтальных компонент лазерного деформографа “Север–Юг 1”, “Север–Юг 2” (б, в).

Данное сообщение посвящено количественной оценке влияния придонного давления, создаваемого инфрагравитационными морскими волнами, на верхний слой земной коры и зависимости коэффициента трансформации придонного давления в микросейсмический шум земли от периода инфрагравитационных волн.

В августе 2018 года над акваторией Японского моря проходил тайфун “Соулик”. 24 числа в точку проведения измерений (МЭС “м. Шульца”), находящуюся на п-ове Гамова, залива Петра великого Японского моря, пришли волны зыби, сгенерированные тайфуном. С приходом основной группы волн начали формироваться инфрагравитационные волны, которые регистрировались в воде, и вызывали микросейсмические колебания в верхнем слое земной коры в широком диапазоне периодов. Регистрация в воде как волн зыби, так и инфрагравитационных волн проводилась лазерным измерителем вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ) [8], установленного на глубине 30 метров на континентальном шельфе со стороны открытой части Японского моря. Данный прибор построен на

основе интерферометра Майкельсона равноплечего типа, способный регистрировать колебания давления как в инфразвуковом, так и в звуковом диапазонах с точностью 1.8 мкПа и обладающий огромным динамическим диапазоном, зависящим лишь от механических характеристик чувствительного элемента (стальной мембраны), что позволяет проводить измерения разномасштабных гидрофизических явлений в широком диапазоне амплитуд и периодов одновременно. Микросейсмические колебания верхнего слоя земной коры проводились с помощью системы двух деформографов: компонент “Север–Юг 1” и “Север–Юг 2”. Оба прибора построены на базе интерферометра Майкельсона неравноплечего типа и имеют длину измерительных плеч 52.5 и способны регистрировать смещения земной коры с точностью 0.3 нм в диапазоне частот от 0 (условно) до 1000 Гц [9].

На рис. 1 представлены спектрограммы синхронных записей волн зыби, сгенерированных тайфуном “Соулик”, и спектры инфрагравитационных волн, зарегистрированных всеми тремя приборами.

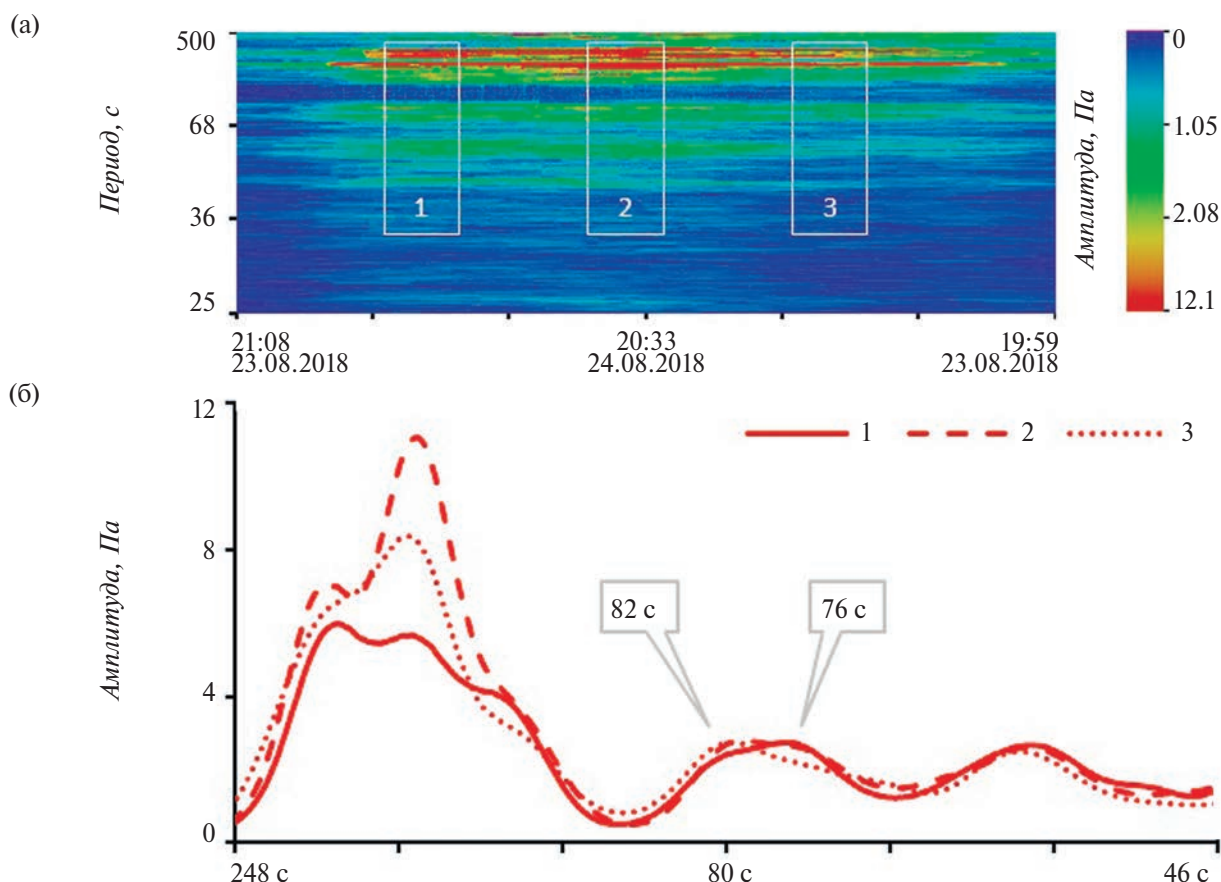


Рис. 2. Спектрограмма записи инфрагравитационных волн, полученная с ЛИВДГ (а) и спектры, построенные по выделенным на спектрограмме участкам данных (б)

На спектрограмме ЛИВДГ, приведённой на рис. 1 а, отчётливо виден приход основной группы волн зыби с периодами от 14 до 9 с, сгенерированной проходом тайфуна над акваторией Японского моря. На спектрограмме же компонент деформографов одновременно с приходом волн зыби появляются микросейсмы второго рода, вызванные прогрессивными гравитационными морскими волнами и находящиеся в том же диапазоне периодов. Так же с приходом волн зыби на спектрах записей всех приборов (рис. 1) появляются максимумы, обусловленные возникновением инфрагравитационных волн и располагающиеся в нескольких диапазонах периодов: 160–157, 82–76 и 57–54 с.

Из спектрограммы волн зыби (рис. 1 а) заметно, что основная группа волн имеет дискретный характер и состоит из трёх составляющих, которые можно разбить на 3 диапазона основных периодов, а именно на 14, 11 и 9 с. Если сопоставить периоды инфрагравитационных волн и волн зыби, то получится что периоды

инфрагравитационных волн больше в 11, 7 и 6 раз периодов гравитационных волн их сформировавших, что схоже с ранее полученными результатами исследований в этой области.

При просмотре спектров записей приборов (рис. 1 б, в), может возникнуть несколько вопросов, основным из которых является причина несовпадений периодов инфрагравитационных волн на различных приборах. Причиной такого несовпадения является то, что существует вариация периодов самих инфрагравитационных волн со временем, как и волн зыби, и то, что спектр рассчитывался для участка длиной в 5 часов, тогда как весь исследуемый нами участок имел длину около суток. В основном, различия периодов на всём исследуемом участке не превышали 5 с. Самая большая разница в периодах видна на средней гармонике (82 и 76 с), однако при исследовании всего участка можно смело заявить, что данные гармоники в спектре придонного давления и смещений земной коры связаны, так как появляются и исчезают одновременно,

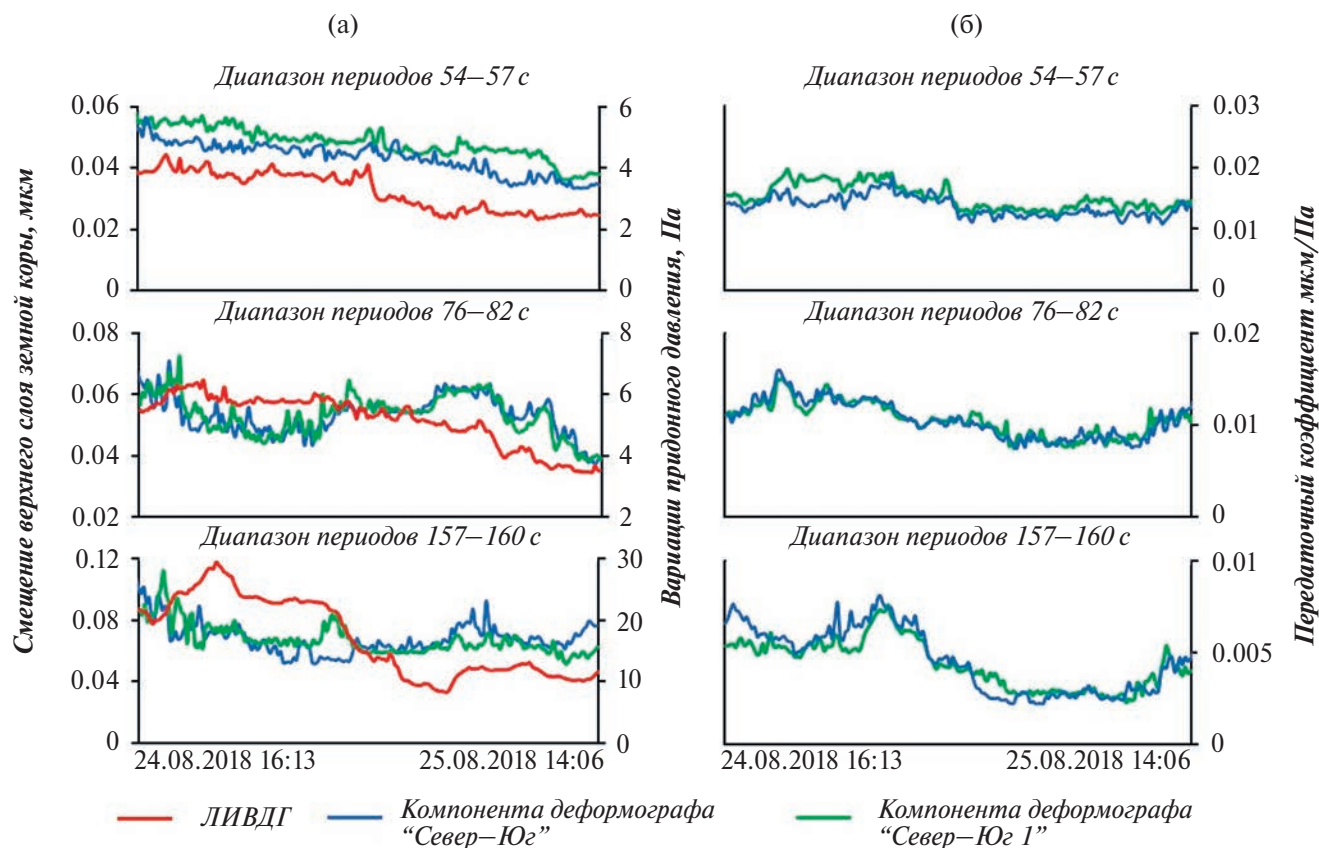


Рис. 3. (а) вариации амплитуд придонного давления и смещений верхнего слоя земной коры и (б) графики вариаций передаточного коэффициента (отношение величины смещений к величине придонного давления) для трёх диапазонов периодов, соответствующих периодам зарегистрированных инфрагравитационных волн.

и имеют амплитудную зависимость друг от друга. Если же рассматривать изменение спектра инфрагравитационных волн во времени, можно увидеть небольшую девиацию периода рассматриваемой гармоник. На рис. 2 представлены спектрограмма с отмеченными временными интервалами в 5 часов, по которым построены спектры, на которых видна данная девиация периода.

Так же на спектрах, представленных на рис. 1 б, присутствуют и другие общие спектральные максимумы, например, 207 и 100 с. Данные максимумы в этом исследовании не принимались в расчёт, так как являлись не стационарными, появлялись и исчезали в течении всего исследуемого временного участка.

Для количественной оценки трансформации придонного давления, создаваемого инфрагравитационными волнами, в упругие колебания земной коры, по всему исследуемому участку были выделены спектральные максимумы амплитуд в нескольких диапазонах периодов, соответствующих зарегистрированным максимумам

с шагом 10 минут. Таким образом мы можем наглядно представить характер влияния придонного давления и его воздействие на микросмещения в земной коре, а для количественной оценки данного процесса мы можем посчитать отношение смещений к величине придонного давления. Таким образом мы получим передаточный коэффициент или коэффициент трансформации и его изменение во времени. Графики изменений спектральных максимумов амплитуды для всех приборов и вариации передаточного коэффициента представлены на рис. 3.

При рассмотрении рис. 3 а можно заметить, что в диапазоне периодов 54–57 с изменения придонного давления и смещения имеют практически линейный характер и прямо пропорциональны, тогда как в более высокочастотных диапазонах присутствует нелинейность. Такую же нелинейность, в тех же диапазонах, можно наблюдать в графиках передаточного коэффициента (рис. 2 б), определяемого как отношение значений смещений верхнего слоя земной коры к вариациям придонного давления. Надо

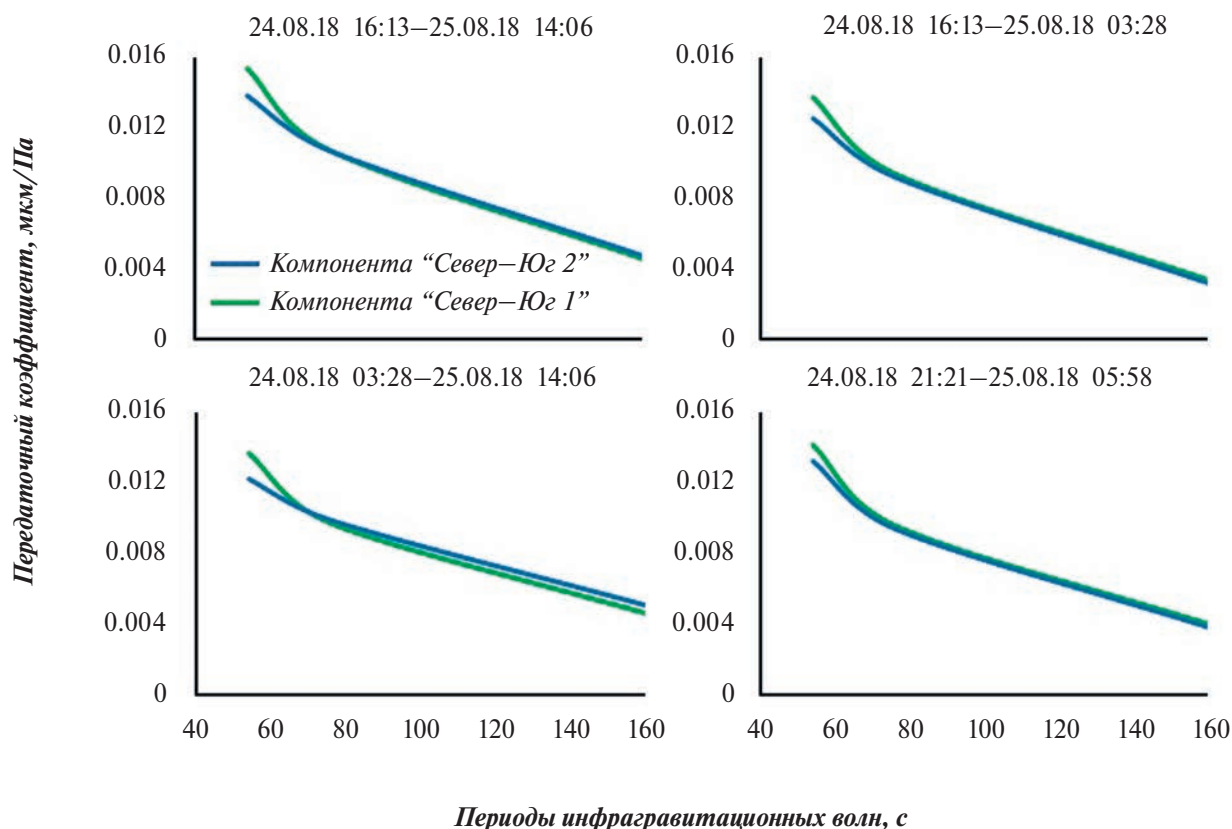


Рис. 4. Зависимость передаточного коэффициента от периода инфрагравитационных волн за разные временные интервалы.

отметить, что значения передаточного коэффициента для компонент деформографа “Север–Юг 1” и “Север–Юг 2” практически совпадают, что подтверждает правильность проведения обработки и расчётов, так как приборы имеют одинаковую длину измерительного плеча и чувствительность, и должны одинаково реагировать на изменение придонного давления. Нелинейность, рассмотренную выше, можно объяснить дисперсией волн зыби при её распространении от точки генерации до точки приёма, если мы рассматриваем образование инфрагравитационных волн как модуляцию волн зыби. Изначально в точку приёма приходит основная группа волн. Большей амплитудой обладают волны, имеющие больший период, они и создают инфрагравитационные волны с периодами 157–160 с, так же имеющие большую амплитуду, чем остальные инфрагравитационные волны. Со временем, в точку приёма начинают приходиться волны с меньшим периодом и меньшей амплитуды, что вызывает изменение амплитуд в спектре высокопериодного диапазона в сторону уменьшения. Данное предположение подтверждается при

рассмотрении спектрограммы записи лазерного измерителя давления гидросферы (рис. 1 а).

На рис. 4 представлены графики зависимости средних значений передаточного коэффициента от периода инфрагравитационных волн.

Представленные на рис. 4 графики зависимости передаточного коэффициента, описывающего преобразование вариаций придонного давления в смещения верхнего слоя земной коры, от периодов инфрагравитационных волн, отчётливо видно, что в диапазоне от 160 до 70 с передаточный коэффициент имеет линейный монотонно убывающий характер в сторону увеличения периода. Однако, для периодов 50–70 с заметна небольшая нелинейность, о которой сложно судить в связи нехваткой значений коэффициента для меньших периодов. На рис. 3 специально были представлены графики не только для исследуемого участка полностью, но и графики временных интервалов, находящихся в начале, в конце и в середине основного участка. Это было сделано для того, чтобы наглядно показать, что изменение амплитуд

и периодов во времени не могут повлиять на сам характер передаточного коэффициента.

В качестве заключения можно сделать вывод, что исходя из полученных зависимостей передаточного коэффициента, представленных на рис. 3, вариации придонного давления, создаваемые инфрагравитационными волнами с периодом 160 с, не смотря на их большую амплитуду, вызывают в 2–3 раза меньшие смещения в верхнем слое земной коры, чем более интенсивные вариации придонного давления, вызванные инфрагравитационными волнами меньших периодов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работ выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00678 “Микродеформации земной коры, вызванные морскими инфрагравитационными волнами по данным лазерно-интерференционных приборов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монахов Ф.И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. М.: Наука, 1977. 95 с.
2. Longuet-Higgins M.S. A Theory of the Origin of Microseisms // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1950. V. 243A. № 857. P. 1–35. DOI: 10.1098/rsta.1950.0012.
3. Munk W.H. Surf beats // Transactions American Geophysical Union. 1949. V. 30. № 6. P. 849–854. DOI: 10.1029/TR030i006p00849.
4. Webb S.C. Broadband seismology and noise under the ocean // Reviews of Geophysics. 1992. V. 36. № 1. P. 105–142. DOI: 10.1029/97RG02287.
5. Ковалев Д.П., Долгих Г.И., Шевченко Г.В. Возбуждение низкочастотных микросейсм инфрагравитационными волнами на юго-восточном побережье о. Сахалин // ДАН. 2015. Т. 461. № 4. С. 451–454. DOI: 10.7868/S0869565215100199.
6. Табулевич В.Н., Попитов В.А., Пономарев Е.А., Сорокин А.Г., Дреннова Н.Н. Регистрация мощных циклонов с помощью наблюдений на сейсмических станциях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 4. С. 571–576.
7. Долгих Г.И., Овчаренко В.В. “Шум” земли в диапазоне инфрагравитационных морских волн // ДАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 250–253.
8. Dolgikh G, Budrin S, Dolgikh S., Plotnikov A. Super-sensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations // Sensors. 2020. V. 20. №. 23. P. 6998. DOI: 10.3390/s20236998
9. Долгих Г.И., Бутырин П.Г., Долгих С.Г., Дягилев Р.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация инфразвуковых деформационных возмущений пространственно разнесенными лазерными деформографами // ДАН. 2011. Т. 441. № 3. С. 376–379.

TRANSFORMATIONS OF THE BOTTOM PRESSURE VARIATIONS, GENERATED BY MARINE INFRAGRAVITY WAVES INTO DISPLACEMENTS OF THE UPPER LAYER OF THE EARTH'S CRUST. QUANTITATIVE ASSESSMENT

Academician of the RAS **G. I. Dolgikh, S. S. Budrin[#], S. G. Dolgikh**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation*

[#]E-mail: ss_budrin@mail.ru

A quantitative assessment of the transformation of the bottom pressure variations, generated by infragravity waves into displacements of the upper layer of the Earth's crust has been made on the basis of experimental data, obtained with a laser meter of hydrosphere pressure variations and two laser strainmeters. The dependence of the coefficient of transformation of bottom pressure into elastic vibrations of the Earth's crust on the periods of infragravity waves was determined.

Keywords: infragravity waves, microseisms, laser meter of hydrosphere pressure variations, laser strainmeter