

УДК 551.466

ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕЙШ ПОДО ЛЬДОМ В АКВАТОРИИ ПОРТА ОХОТСКОГО МОРЯ

Академик РАН Г. И. Долгих², Д. П. Ковалев^{1,*}, П. Д. Ковалев¹

Поступило 13.02.2019 г.

Проведены многолетние 2009–2017 гг. наблюдения за морским волнением с секундной дискретностью в портовом ковше с. Охотское (о. Сахалин) на глубине около двух метров подо льдом с использованием автономных регистраторов волнения. Спектральный анализ полученных данных показал наличие в спектрах нескольких значимых пиков на периодах от 2 до 15 с для моментов сильной зыби на море. Эти пики обусловлены волновыми процессами, которые генерируются вследствие нелинейной трансформации приходящей под лед зыби. Проведено численное моделирование реакции динамической системы – водной акватории, описываемой уравнением Дуффинга, в зависимости от входящих в уравнение параметров, определённых из экспериментальных наблюдений. Показано, в том числе и с использованием отображения Пуанкаре, что наибольшее влияние на переход системы к хаосу оказывает амплитуда внешнего воздействия.

Ключевые слова: сейши подо льдом, припайный лед, хаос.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864475-479>

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что на мелководье наблюдаются эффекты нелинейности при распространении и трансформации волн зыби. Нелинейности могут быть локально слабыми, но может иметь место значительный кросс-спектральный перенос энергии, если мелководная область шире по сравнению с расстоянием нелинейного взаимодействия [1]. Известно также, что нелинейные уравнения Кортевега-де Фриза для волн конечной амплитуды на мелководье над плоским дном показывают значительную передачу межспектральных энергий из-за почти резонансных квадратичных взаимодействий [2].

Проведено большое количество исследований свободных колебаний жидкости в ограниченном бассейне (сейш) как, например, отражённых в работах [3–5]. Также большое внимание уделяется исследованию основных мод собственных колебаний бухт [6] и рассматриваются связи изменения периода основной моды колебаний акватории с величиной внешней возбуждающей силы [7]. Тем не

менее исследования [8] показали, что периоды сейш подо льдом отличаются от периодов сейш открытой воды.

Результаты наших наблюдений, выполненные под припаем в Охотском море вблизи с. Охотское, о. Сахалин, показали, что прошедшая под лёд зыбь может в зависимости от рельефа и наличия стенок передавать энергию коротким сейшам с образованием модовой структуры. Были выявлены ситуации, когда в энергетических спектрах колебаний уровня в диапазоне периодов 2–15 с наблюдается несколько значимых пиков.

Ледяной покров может значительно повлиять на движения сейш, подавить их и препятствовать их генерации. В работе [9] приведены критические амплитуды морских волн различных периодов, которые показывают, что критической для волнения с периодами 5–10 с является амплитуда всего в 9 см, для зыби с периодом около 15 с — 28 см. Поэтому сейши большой амплитуды могут эффективно разрушить ледяной покров и способствовать созданию полыньи [4] и тем самым представлять опасность для работающего на льду персонала. Данное обстоятельство и объясняет интерес к изучению сейш подо льдом.

Изучение поведения морских динамических систем с хаосом, каковой и является рассматриваемая акватория, необходимо для практических целей

¹Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Южно-Сахалинск

²Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

и учёта тех последствий, к которым может привести возникновение сложной динамики, например, для решения задачи о динамике судна или нефтяной платформы при наличии волнения [10]. Только нелинейный анализ обеспечивает всестороннее понимание ситуации и выработку условий по избежанию катастрофы.

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) проводит изучение волнения в прибрежной зоне вблизи с. Охотское (юго-восточное побережье о. Сахалин) начиная с 2009 г. по настоящее время с использованием автономных регистраторов волнения (АРВ) с записью данных с секундной дискретностью. На рис. 1 представлен район проведения круглогодичных наблюдений за волнением.

За время наблюдений получены качественные временные серии колебаний уровня моря в летний и зимний периоды. По отсутствию в записях “шума” — значительного ветрового волнения и зыби, хорошо видны периоды времени, когда море покрывал лёд. В дальнейшем был проведен спектральный анализ полученных рядов, результаты которого использованы для сравнения с модельными расчетами.

Спектральный анализ позволил выявить периодические подъемы энергии колебаний уровня в диапазоне периодов от 2 до 15 с (рис. 2). Отметим, что энергетические пики по величине значительно превышают доверительный интервал, а также то обстоятельство, что пики не располагаются на кратных периодах и, значит, не могут быть просто гармониками основного периода. Похожая картина наблюдалась и в работе [1].

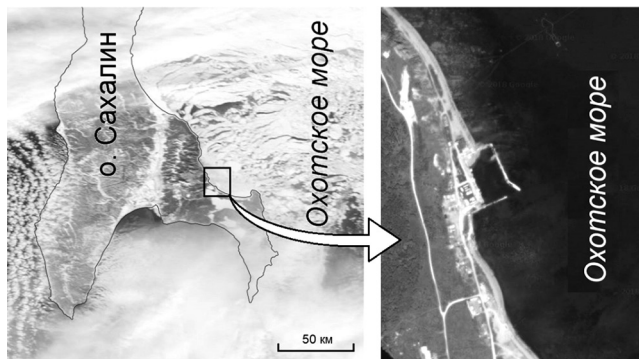


Рис. 1. Карта района проведения измерений колебаний уровня моря (на 6 февраля 2010 г. по данным сайта: earthdata.nasa.gov) и портовый ковш, в котором установлен измеритель волнения.

Анализ рядов наблюдений за разные годы показал, что такой спектр характерен только для моря, покрытого льдом. Наблюдаемые энергетические пики, соответствующие колебаниям уровня в диапазоне периодов от 2 до 15 с, проявляются только для ситуаций, когда на море зыбь большой амплитуды (рис. 2, спектры 3, 4, 6). В отсутствии льда, как, например, показано на рис. 2, спектры 1 и 2, для случаев, когда припай ещё не образовался, или при слабой зыби подо льдом (рис. 2, спектр 5) пики в спектрах отсутствуют.

АНАЛИЗ СЕЙШЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Нами было сделано предположение, что при приходе волн зыби с большой энергией к месту установки датчиков в ковше с. Охотское в нём в результате нелинейной трансформации происходит возбуждение сейш нескольких мод, более коротких, чем зыбь. Для определения их периодов был использован математический аппарат, приведённый в работе [8], в соответствии с которым периоды мод определяются выражением для сейш под припайным льдом:

$$T_n = \frac{2(L - 2\sqrt{\tilde{T}/g\rho_w})}{n\sqrt{gH_{red}(\omega_n)}}, \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — мода колебаний, L — длина бассейна, ρ_w плотность морской воды составляет приблизительно $1025 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, ω_n — круговая частота n -й

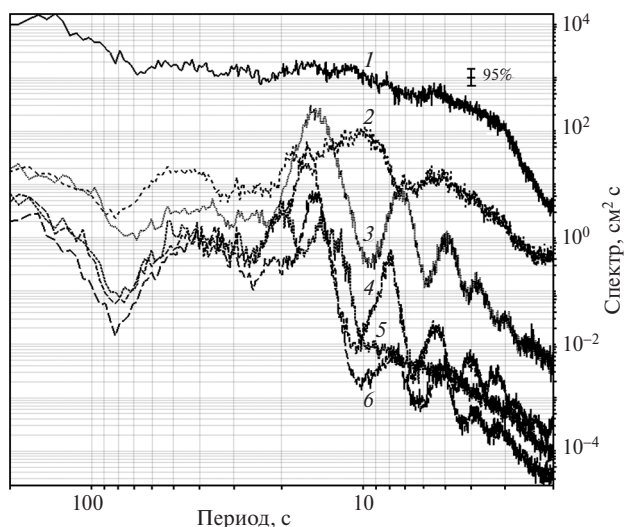


Рис. 2. Спектры колебаний уровня, вычисленные по суточным отрезкам для зимы 2009–2010 гг. 1–15 ноября, шторм; 2–22 ноября, тихая погода; 3–30 января; 4–10 февраля; 5–9 февраля; 6–12 февраля.

моды подо льдом, $\tilde{T} = \tilde{k}h$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от физических свойств льда, $\tilde{k} = 106 \text{ Н/м}^2$ — коэффициент сжатия (растяжения) льда. В выражении (1) также использована редуцированная глубина водоема:

$$H_{red} = H[1 - F(\alpha H)], \quad (2)$$

где H — глубина водоёма, $F(\alpha H)$ — функция, зависящая от глубины водоёма и параметра $\alpha = \sqrt{\omega / 2A}$, в свою очередь, зависящего от частоты волны. Здесь $A = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент вертикального турбулентного обмена.

С использованием выражений (1), (2) выполнен расчёт периодов мод продольных сейш в портовом ковше с. Охотске для различной глубины, которая меняется с приливом, и толщины припайного льда. Результаты показали, что измеренные периоды колебаний наиболее близки к расчётным для глубины 2 м и толщины льда 2 м, которая обычно регистрируется в портовом ковше в зимний период. Рассчитанные моды поперечных сейш ковша показали, что их периоды существенно отличаются от измеренных, и поэтому в дальнейшем они не учитывались.

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

В нелинейных динамических системах, каковой и является рассматриваемая здесь водная акватория, могут возникнуть хаотические колебания. Рассмотрим ситуацию, когда динамика нелинейной системы может быть представлена дифференциальным уравнением Дуффинга, которое описывает систему 2-го порядка с нерегулярными колебаниями и внешним периодическим воздействием [11]:

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \omega_0^2 x + \alpha x^3 = F \cos \omega t, \quad (3)$$

где F и ω — амплитуда частота внешнего периодического воздействия — зыби (период T); ω_0 — собственная частота осциллятора — ковша (период T_0); k — коэффициент затухания, а α — коэффициент нелинейности.

С использованием (3) проведено численное моделирование рассматриваемой системы — взаимодействие акватории, покрытой льдом, с приходящими волнами. При моделировании выполнялось численное решение уравнения с использованием разработанной нами программы PUAN [12], которая позволяет значительно ускорить процесс вычисления фазового портрета и отображения Пуанкаре для большого числа точек. Для измеренных периодов волн зыби разных амплитуд, коэффициентов затухания и нелинейности, периодов сейш были рассчитаны фазовые портреты, форма колебаний и отображения Пуанкаре. Вариант для $F = 20$, $T = 15,3$ с; $T_0 = 15,3$ с; $k = 0,05$; $\alpha = 6,6$ приведён на рис. 3.

Исследование реакции динамической системы, описываемой уравнением Дуффинга, в зависимости от входящих в уравнение параметров, находящихся в пределах, определённых из экспериментальных наблюдений, показало, что наибольшее влияние на переход к хаосу оказывает амплитуда внешнего воздействия. Результаты моделирования показали, что с увеличением $F > 0,5$ для $T = 15,3$, $T_0 = 15,3$ (типичные периоды зыби и первой моды сейшевых колебаний) движение в системе переходит от периодического к хаотическому, на что указывают и отображения Пуанкаре.

При возбуждении сейш более коротких периодов по сравнению с периодом приходящей зыби в системе также наблюдаются хаотические колебания. При этом вид отображения Пуанкаре существенно зависит от периода и амплитуды внешней волны,

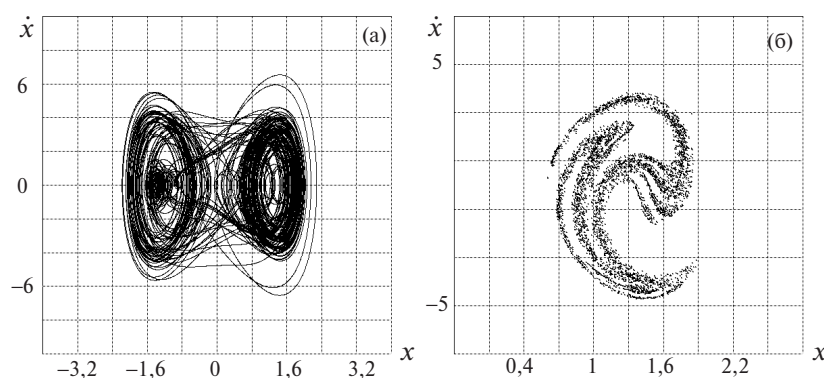


Рис. 3. Фазовый портрет (а) и отображение Пуанкаре (б) для рассматриваемой динамической системы. $F = 20$, $t = 15,3$; $T_0 = 15,3$; $K = 0,05$; $A = 6,6$.

а коэффициенты затухания и нелинейности влияют в меньшей степени.

Таким образом, волны зыби, проникая далеко под лёд, способствуют генерации в ковше с. Охотское хаотических колебаний на периодах собственных колебаний акватории ковша. При уменьшении амплитуды зыби хаотичность колебаний уменьшается и происходит переход к периодическим колебаниям.

ВЫВОДЫ

Установлено, что сильная зыбь проникает под лёд на большие расстояния и вследствие нелинейных эффектов является причиной возбуждения сейш подо льдом в ковше рыбозавода с. Охотское. При этом генерируется несколько мод сейш на некротных периодах.

Выполненный с учётом изменения периодов волнения подо льдом по сравнению с открытой водой и выводов модели для собственных колебаний жидкости в акватории ковша анализ показал, что сейши здесь имеют период первой моды значительно короче — 15,3 с, чем получен с использованием модельного расчёта — 60,9 с для первой моды. В то же время наблюдается хорошее соответствие периодов между четвёртой модой рассчитанных сейш и первой модой сейш из экспериментов. При этом наблюдаемые моды высших порядков соответствуют только каждой четвёртой из рассчитанных. Объяснение такому эффекту пока не получено.

Пик в энергетическом спектре на периоде 15,3 с соответствует периоду приходящей зыби и вполне вероятно, что зыбь возбуждает сейшу с тем же периодом, поскольку модельный расчет имеет моду колебаний с близким периодом.

Модельный расчёт показал, что генерация продольных сейшевых мод хорошо описывается выражением, полученным В.Н. Зыряновым. При этом низшая мода сейш соответствует периоду зыби. Результаты расчёта для периодов поперечных колебаний в ковше оказались далеки от наблюдаемых.

Проведено численное моделирование реакции водной массы акватории ковша — динамической системы, описываемой уравнением Дуффинга, в зависимости от входящих в уравнение параметров, находящихся в пределах, определённых из экспериментальных наблюдений, а именно периодов

внешней силы и собственных периодов колебаний акватории. Показано, в том числе и с использованием отображения Пуанкаре, что наибольшее влияние на переход системы к хаотическим колебаниям оказывает увеличение амплитуды внешнего воздействия более 0,5.

Источник финансирования. Работа выполнена в соответствии с государственной программой ИМ-ГиГ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guza R.T., Thornton E.B. // J. of Geophysical Res. 1980. V. 85. № C3. P. 1524–1530. DOI:10.1029/JC085iC03p01524
2. Mei C.C., Ünlüata U. // Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport. N.Y. Academic. 1972. P. 181–202.
3. Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. // Мор. гидрофиз. журн. 2016. № 2. С. 16–26.
4. Rabinovich A.B. // Handbook of Coastal and Ocean Engineering. World scientific publishing company. Singapur. 2009. P. 193–236. DOI:10.1142/9789812819307_0009
5. Sorensen R.M., Thompson E.F. // Coastal Engineering Manual. Part II. Wash. (D.C.); N.Y.: U.S. Army Corps. Engineers, 2002. Ch. 7. P. 1–92.
6. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. // 2016. № 8. С. 57–63.
7. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. // ДАН. 2011. Т. 441. № 1. С. 98–102.
8. Зырянов В. Н. // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 259–271.
9. Squire V.A., Dugan J.P., Wadhams P., Rottier P.J., Liu A.K. // Annual Rev. Fluid Mech. 1995. V. 27, P. 115–168. DOI: 10.1146/annurev.fl.27.010195.000555
10. Thompson J.M.T., Stewart H.B. Nonlinear dynamics and chaos. N.Y.: Wiley, 1986. 376 p.
11. Kovacic I., Brennan M.J. eds. The Duffing Equation: Nonlinear Oscillators and their Behaviour, Wiley, 2011, 392 p. ISBN 978–0–470–71549–9
12. Ковалев П.Д., Иволгин В.И. // Свидетельство регистрации программы для ЭВМ, Роспатент. № 2018665955 от 11.12.2018

EXCITATION OF SEICHES IN ICE AT PORT WATER AREA OF THE SEA OF OKHOTSK

Academician of the RAS G. I. Dolgikh², D. P. Kovalev¹, P. D. Kovalev¹

¹*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation*

²*Il'ichiov Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation*

Received February 13, 2019

Long term observations of sea waves with one second discreteness in the port harbor of Sea of Okhotsk (Sakhalin island) at a depth of about two meters under the ice were carried out using autonomous wave recorders in 2009-2017. Spectral analysis of the data showed the presence of several significant peaks on the periods from 2 to 15 seconds in the spectra for the moments of strong swell at sea. These peaks are caused by wave processes that are generated due to the nonlinear transformation of the swell coming in ice. The numerical simulation of the reaction of the dynamic system – the water area described by the Duffing equation, depending on the parameters included in the equation and determined from experimental observations, is carried out. It is shown, including using the Poincare mapping that the amplitude of external forcing has the greatest influence on the transition of the system to chaos.

Keywords: seiches in ice, fast ice, chaos.