

Регистрация и оценка параметров сейшевых колебаний в бухте Алексева (остров Попова) по данным берегового лазерного деформографа

В. А. Чупин , Г. И. Долгих, В. К. Фищенко, П. С. Зимин,
С. К. Шабельникова, В. А. Швец, С. В. Яковенко

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН,
Владивосток, Россия
 chupin@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 05.03.2026, одобрена после рецензирования 07.04.2026,
принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель. Целью работы является оценка возможностей береговых лазерных деформографов для регистрации и количественной диагностики сейшевых колебаний малой прибрежной акватории на примере б. Алексева (о. Попова, залив Петра Великого).

Методы и результаты. Регистрация микросмещений земной коры выполнялась 20-метровым береговым лазерным деформографом, установленным на расстоянии около 20 м от береговой линии. Для независимого контроля колебаний уровня моря организована видеорегистрация маркерного объекта в акватории бухты с последующей метрической калибровкой изображения (масштабный коэффициент 0,69 см/пикс.). Для сопоставления сигналов выполнена одинаковая полосовая фильтрация временных рядов в диапазоне основной сейшевой моды. Установлена линейная зависимость между микросмещениями базы деформографа и амплитудой колебаний уровня моря. По ряду синхронных интервалов наблюдений определен коэффициент линейного преобразования $K = 0,66 \pm 0,03$ мкм/см при $|r| > 0,9$. Анализ временных рядов, динамических спектрограмм и амплитудных спектров выявил устойчивые периоды около 10,5 мин, 2,6–2,7 мин и 4,1–4,3 мин, соответствующие фундаментальной продольной сейше всей бухты, первой собственной моде и локализованной моде внутреннего подбассейна. Показано, что усиление ветрового воздействия приводит к росту амплитуды колебаний без изменения набора доминирующих периодов.

Выводы. Береговой лазерный деформограф обеспечивает надежную регистрацию сейшевых колебаний малой бухты и позволяет количественно оценивать их амплитуду по данным деформационных измерений. Полученные результаты подтверждают определяющую роль геометрии и батиметрии акватории в формировании спектра собственных мод и демонстрируют применимость дистанционных деформационных методов для мониторинга прибрежных гидродинамических процессов.

Ключевые слова: лазерный деформограф, сейшевые колебания, микросмещения земной коры, калибровка, гидродинамика прибрежной зоны

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке тем государственного задания ТОИ ДВО РАН № 124022100074-9 «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий» и № 126062422495-5 «Физика катастрофических процессов на Дальнем Востоке России в условиях климатических изменений: моделирование, мониторинг, защита. Этап 2».

Для цитирования: Регистрация и оценка параметров сейшевых колебаний в бухте Алексеева (остров Попова) по данным берегового лазерного деформографа / В. А. Чупин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 584–600. EDN WCJYFZ.

Original article

Record and Assessment of Seiche Oscillation Parameters in Alekseev Bay (Popov Island) based on the Coastal Laser Strainmeter Data

V. A. Chupin , G. I. Dolgikh, V. K. Fishchenko, P. S. Zimin, S. K. Shabelnikova, V. A. Shvets, S. V. Yakovenko

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
 *chupin@poi.dvo.ru*

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to assess the potential of coastal laser strainmeters for recording and quantitatively identifying seiche oscillations in small coastal water areas using the example of Alekseev Bay (Popov Island, Peter the Great Bay).

Methods and Results. Micro-displacements of the Earth crust were recorded by a 20-meter coastal laser strainmeter installed at a distance of approximately 20 meters from the coastline. To monitor independently sea level fluctuations, video recording of a marker object in the bay was conducted, it was followed by metric image calibration (scale factor is 0.69 cm/px). Comparison of the signals required identical bandpass filtering of the time series within the range of main seiche mode. A linear relationship between the micro-displacements of strainmeter base and the amplitude of sea level fluctuations was revealed. The linear transformation coefficient $K = 0.66 \pm 0.03 \text{ } \mu\text{m/cm}$ at $|r| > 0.9$ was determined based on a series of synchronous observation intervals. Analysis of time series, dynamic spectrograms, and amplitude spectra made it possible to detect stable periods of approximately 10.5 min, 2.6–2.7 min, and 4.1–4.3 min which correspond to the fundamental longitudinal seiche of the whole bay, the first eigenmode, and the localized mode of inner sub-basin, respectively. It was shown that intensification of wind forcing resulted in an increase in the oscillation amplitude with no changing the set of dominant periods.

Conclusions. A coastal laser strainmeter provides reliable recording of seiche oscillations in a small bay and makes it possible to quantify their amplitudes based on the deformation measurement data. The obtained results confirm the decisive role of the water area geometry and bathymetry in the formation of eigenmode spectrum, as well as demonstrate the applicability of remote deformation methods for monitoring coastal hydrodynamic processes.

Keywords: laser strainmeter, seiche oscillations, micro-displacements of the Earth crust, calibration, hydrodynamics of coastal zone

Acknowledgments: The study was carried out with financial support of the themes of state assignments of POI FEB of RAS No. 124022100074-9 “Study of the nature of linear and nonlinear interaction of geospheric fields in the transition zones of the World Ocean and their consequences” and No. 126062422495-5 “Physics of catastrophic processes in the Russian Far East under climatic changes: Modeling, monitoring, and protection. Stage 2”.

For citation: Chupin, V.A., Dolgikh, G.I., Fishchenko, V.K., Zimin, P.S., Shabelnikova, S.K., Shvets, V.A. and Yakovenko, S.V., 2026. Record and Assessment of Seiche Oscillation Parameters in Alekseev Bay (Popov Island) based on the Coastal Laser Strainmeter Data. *Physical Oceanography*, 33(4), pp. 610-625.

Введение

Сейшевые колебания представляют собой стоячие длиннопериодные колебания уровня воды в замкнутых и полужамкнутых водоемах, собственные периоды которых определяются геометрией и глубинами бассейна и могут составлять от нескольких десятков секунд до часов. Классические обобщения по сейшам, тягунам и другим низкочастотным колебаниям водоемов подчеркивают фундаментальную роль резонанса и спектральной структуры собственных мод конкретной акватории, а также большое разнообразие атмосферных механизмов их возбуждения (ветер, фронтальные прохождения, скачки давления), включая явления типа метеоцунами [1].

Современные исследования сейшевых колебаний закрытых заливов и бухт развиваются по нескольким направлениям. Во-первых, активно совершенствуется спектральная диагностика устойчивых и квазистационарных сейшевых режимов, когда резонансный отклик проявляется не как единичное событие, а как «непрерывный» компонент динамики процесса, модулируемый внешней накачкой [2]. Во-вторых, существенное внимание уделяется роли атмосферных возмущений разной природы (ветровое воздействие и/или барические импульсы) и их относительному вкладу в запуск и усиление сейшевых режимов при прохождении штормов и циклонов [3, 4]. В-третьих, на примере разных акваторий демонстрируется, что доминирующая мода и энергетика сейшевого отклика зависят не только от «внутренней» резонансной структуры бухты, но и от характера внешнего возбуждения и условий на входе в бухту, а также от взаимодействия смежных акваторий [5–7]. Также в последнее время проводятся исследования, в которых сейши рассматриваются в контексте связанных колебательных процессов в системе атмосфера – океан и широкого спектра низкочастотных гидродинамических колебаний в прибрежной зоне [8].

Для залива Петра Великого актуальность исследований сейшевых колебаний определяется сложностью береговой полосы, выраженной сезонной изменчивости атмосферной циркуляции и высокой повторяемостью циклонов. В этой связи представляют интерес результаты, полученные ранее для б. Витязь, расположенной в юго-западной части залива в районе морской экспериментальной станции (МЭС) «мыс Шульца». Показано, что в б. Витязь устойчиво проявляются сейшевые колебания с периодами порядка 16–18 мин, интерпретированные как ее собственные колебания, причем прохождение циклонов над акваторией Японского моря и усиление ветрового воздействия сопровождалось увеличением амплитуды колебаний в соответствующем диапазоне [9].

Бухта Алексеева, расположенная на о. Попова в Амурском заливе, является удобным природным полигоном для изучения резонансных колебаний малых прибрежных акваторий, поскольку также находится рядом с МЭС ТОИ ДВО РАН «остров Попова». Ранее в бухте уже выполнялись натурные эксперименты, прибрежные и донные измерения уровня и колебаний моря, а также проводилось численное моделирование. Имеются публикации, где результаты расчетов для б. Алексеева сопоставлялись с данными натурных измерений, что подтверждает наличие выраженной модовой структуры и резонансных частот в интересующем диапазоне [10, 11]. Кроме того, на базе МЭС «о. Попова» развивались технологии дистанционной регистрации волнения и колебаний

уровня моря с использованием берегового видеонаблюдения, где прямо отмечается возможность регистрации, в том числе сейшевых колебаний [12].

Вместе с тем вопрос о том, в какой степени дистанционные деформационные измерения на берегу могут служить надежным и информативным инструментом для диагностики сейшевых колебаний конкретной малой бухты (включая вариации доминирующей частоты и амплитуды при прохождении циклонов и смене направления ветра), остается недостаточно раскрытым. Регистрация сейшевых колебаний б. Витязь возможна только в периоды их максимального возбуждения, что связано со значительным удалением деформографа от береговой линии бухты (приблизительно на 373 м). В мировой литературе известны примеры регистрации сейшевых процессов по сейсмическим данным [13].

В настоящей работе представлены результаты регистрации сейшевых колебаний в б. Алексеева (о. Попова) береговым лазерным деформографом, введенным в эксплуатацию в 2025 г. [14]. Основная цель исследования – оценка возможностей береговых деформационных измерений для регистрации и диагностики параметров сейшевых колебаний малой бухты, включая устойчивые периоды и их амплитудную модуляцию при атмосферных воздействиях.

Методы измерений и калибровка данных

Береговой лазерный деформограф. Регистрация микросмещений земной коры в районе б. Алексеева (о. Попова) проводится с использованием берегового лазерного деформографа, введенного в стационарную эксплуатацию в 2025 г. Создание данной установки стало результатом поэтапного развития измерительного комплекса: в 2024 г. на МЭС «Остров Попова» выполнена пробная установка мобильного варианта лазерного деформографа и получены первые экспериментальные записи. Эти данные подтвердили возможность высокоточной регистрации микродеформаций земной коры в широком диапазоне частот и послужили основой для создания стационарной системы непрерывного мониторинга [14].

На основе результатов предварительных испытаний [14] в 2025 г. завершена подготовка специализированного подземного помещения, в котором поддерживаются стабильные температурные условия и защита измерительного оборудования от внешних воздействий. Как результат, работа прибора была запущена в режиме непрерывной эксплуатации. На рис. 1 приведена схема расположения берегового лазерного деформографа. Он размещен в подземном помещении на естественной возвышенности побережья б. Алексеева при удалении около 20 м от береговой линии. Это расположение оказалось эффективным для решения задач настоящей работы. В отличие от более удаленных от берега деформографов, как на м. Шульца, такое расположение прибора обеспечило непосредственную чувствительность к деформационным процессам, генерируемым изменениями гидродинамической обстановки в бухте. Небольшое удаление от береговой полосы позволяет регистрировать упругий отклик земной коры на перераспределение водной массы при сейшевых колебаниях, включая вариации уровня моря и связанные с ними изменения деформационной нагрузки.



Р и с. 1. Расположение берегового лазерного деформографа на о. Попова. Геометрические размеры и батиметрия б. Алексева. *1* – зона видеорегистрации уровня моря

F i g. 1. Location of coastal laser strainmeter on Popov Island. Geometric dimensions and bathymetry of Alekseev Bay. *1* – sea level video recording zone

Лазерный деформограф построен по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с герметизированным измерительным плечом длиной 20 м, что обеспечивает стабильность и защиту лазерного пучка от внешних воздействий. Высокая измерительная точность (до пикометров) позволяет регистрировать микросмещения земной коры, вызванные гидродинамическими процессами в прибрежной зоне.

Регистрация микросмещений деформографом ведется с частотой дискретизации 1000 Гц, что обеспечивает возможность анализа процессов в широком диапазоне частот. При исследовании колебаний большого периода, включая сейшевые процессы, выполняется предварительная обработка, направленная на оптимизацию первичных данных и выделение интересующего диапазона частот. При обработке данных сначала выполняется низкочастотная фильтрация с использованием окна Хэмминга длиной 1500 отсчетов и частотой среза 1 Гц, что позволяет подавить высокочастотные составляющие сигнала. Затем для исключения влияния сверхнизкочастотных компонент дополнительно используется высокочастотный фильтр с длиной окна 15000 отсчетов и частотой среза 0,001 Гц. В результате последующей дискретизации формируются временные ряды данных, оптимизированные по объему и спектральному составу, обработка которых снижает требования к вычислительным ресурсам.

Видеорегистрация колебаний уровня моря. Одной из задач исследования являлось сопоставление деформационных сигналов с независимыми измере-

ниями колебаний уровня моря. С этой целью осенью 2025 г. были организованы совместные наблюдения морских процессов с использованием лазерного деформографа и надводной камеры, наблюдающей за колебаниями маркерных объектов на поверхности моря.

Надводная камера фиксировала положение специальных маркеров, размещенных в акватории бухты. Наиболее эффективным маркерным объектом оказался плот спасательный надувной (ПСН), размещенный на кормовой части баржи, находящейся в воде и подверженной вертикальным колебаниям под воздействием волн. Белый контейнер пловца обладает высокой контрастностью и хорошо различим как в дневное, так и в ночное время. На рис. 2 представлен пример видеорегистрации стационарной камерой маркерных объектов, а также схема размещения маркеров и надводной камеры, использованных при наблюдениях в кутовой части б. Алексеева.



Р и с. 2. Кадр непрерывной видеорегистрации маркерных объектов в б. Алексева с элементами метрической калибровки изображения: 1 – диаметр спасательного пловца (ПСН); 2 – край конструкции рубки; 3 – левая вертикальная стойка

F i g. 2. Frame of continuous video recording of marker objects in Alekseev Bay with the elements of metric image calibration: 1 – diameter of inflatable life raft (ILR); 2 – edge of cabin structure; 3 – left vertical post

Для перевода вертикальных перемещений маркерного объекта из пиксельной шкалы в метрические единицы была выполнена калибровка изображения. В качестве эталонных использовались элементы конструкции и оснащения баржи с заранее измеренными геометрическими параметрами объектов, указанных на рис. 2. Сопоставление их фактических размеров с соответствующими размерами на видеокдрах позволило определить масштабные коэффициенты (см/пикс.) для каждого элемента и оценить разброс полученных значений.

В табл. 1 приведены реальные размеры выбранных элементов, их размеры на видеокдрах (в пикселях), рассчитанные масштабные коэффициенты, а также соответствие элементов нумерации на рис. 2.

Т а б л и ц а 1
Table 1

**Определение масштабного коэффициента видеорегистрации
по геометрическим размерам элементов конструкции**
**Determination of the scale factor of video recording based
on the geometric dimensions of structural elements**

Номер элемента / Number of element	Реальный размер, см / Actual size, cm	Размер на видеокadre, пикс. / Size in video frame, px	Масштабный коэффициент, см/пикс. / Scale factor, cm/px
1	70	100	0,7
2	183	263	0,696
3	204	297	0,687

Разброс оценок не превышает 2 %, что свидетельствует о слабом влиянии перспективных искажений в выбранной области кадра. В качестве рабочего значения масштабного коэффициента принято среднее значение:

$$K = 0,69 \text{ см/пикс.}$$

Таким образом, временной ряд вертикальных перемещений маркерного объекта, регистрируемый программой *QAVIS* [15] в пикселях, был приведен к физическим единицам (сантиметрам), что позволит выполнить количественное сопоставление с независимыми инструментальными измерениями.

Калибровка лазерного деформографа по данным видеонаблюдения. Для перехода от измерений смещений к эквивалентной амплитуде колебаний уровня моря по данным видеорегистрации выполнено сравнение данных лазерного деформографа с синхронными данными видеозаписей маркерного объекта. В качестве видеопараметра использовались вертикальные перемещения маркера, выраженные в сантиметрах (см. выше), в качестве деформационного параметра – микросмещения базы измерительного плеча лазерного деформографа (мкм).

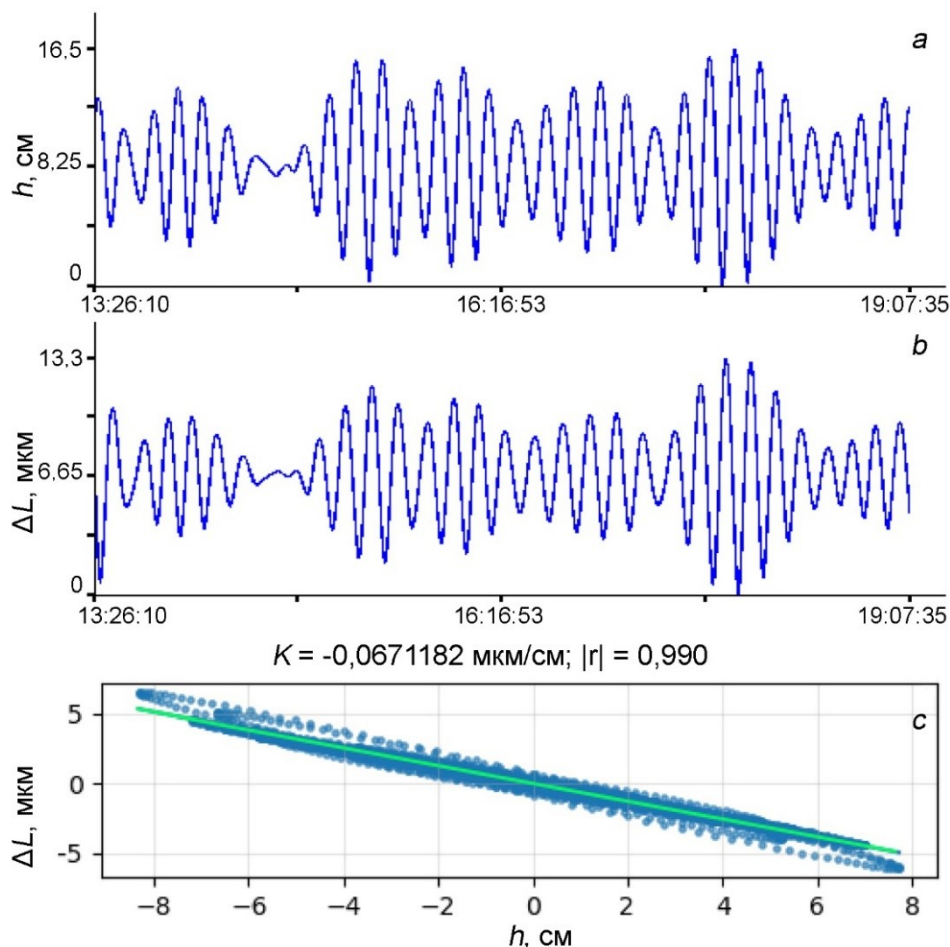
Исходные временные ряды видеорегистрации и деформографа содержат низкочастотные вариации (метеорологические и квазистатические составляющие) и высокочастотные флуктуации, не относящиеся к сейшевым колебаниям основной моды. Для выделения сигнала основной сейшевой компоненты выполнена оптимизация сигнала, после чего оба сигнала были приведены к сопоставимому частотному диапазону. Полосовая фильтрация в диапазоне частот 0,0013–0,0020 Гц позволила подавить медленные тренды и высокочастотные компоненты, обеспечив сопоставление сигналов по доминирующей составляющей сигнала с периодом 10,5 мин.

Затем сигналы сравнивались на синхронных временных интервалах. Для каждого интервала оценивалась степень согласованности колебаний (коэффи-

коэффициент корреляции), после чего определялся коэффициент линейного преобразования между видеосигналом $h(t)$ (см) и сигналом деформографа $\Delta L(t)$ (мкм) в следующей пропорции:

$$\Delta L(t) = Kh(t),$$

где K – коэффициент преобразования (мкм/см), характеризующий деформационный отклик берега на сейшевые колебания уровня моря. Пример сопоставления сигналов для интервала с повышенной амплитудой сейшевых колебаний приведен на рис. 3.



Р и с. 3. Сопоставление видеорегистрации и деформационного сигнала в период повышенной амплитуды сейшевых колебаний 16 ноября 2025 г.: *a* – колебания уровня моря по данным видеонаблюдения; *b* – микросмещения, зарегистрированные лазерным деформографом; *c* – диаграмма рассеяния мгновенных значений смещений и уровня моря, а также линейная аппроксимация (зеленая линия) $\Delta L = Kh$

Fig. 3. Comparison of video record and deformation signal during the period of increased amplitude of seiche oscillations on November 16, 2025: *a* – sea level fluctuations based on video observation data; *b* – micro-displacements recorded by a laser strainmeter; *c* – scatterplot of instantaneous values of displacements and sea level, and linear approximation (green line) $\Delta L = Kh$

где указанное значение разброса соответствует вариациям оценок по отдельным интервалам. Полученный коэффициент позволяет переводить данные микросмещений, зарегистрированные лазерным деформографом на о. Попова, в эквивалентные оценки амплитуды сейшевых колебаний уровня моря по соотношению $h(t) = \Delta L(t)/K$, что в дальнейшем можно использовать при анализе изменений сейшевой активности б. Алексеева.

Общая динамика и спектральная структура сейшевых колебаний б. Алексеева

Прежде чем перейти к детальному анализу спектральных характеристик сейшевых колебаний, рассмотрим общую динамику деформационных сигналов, регистрируемых береговым лазерным деформографом в районе б. Алексеева.

На рис. 4 показан фрагмент непрерывной записи деформационных колебаний длительностью 25 сут (с 31 октября по 24 ноября 2025 г.), отражающий характерные особенности вариаций сигнала на масштабах от часов до нескольких недель. На таком протяженном временном интервале доминирующими компонентами записи являются суточные и полусуточные приливные колебания, а также более медленные вариации, обусловленные изменениями атмосферного давления и синоптическими процессами, продолжительность которых достигает нескольких суток.



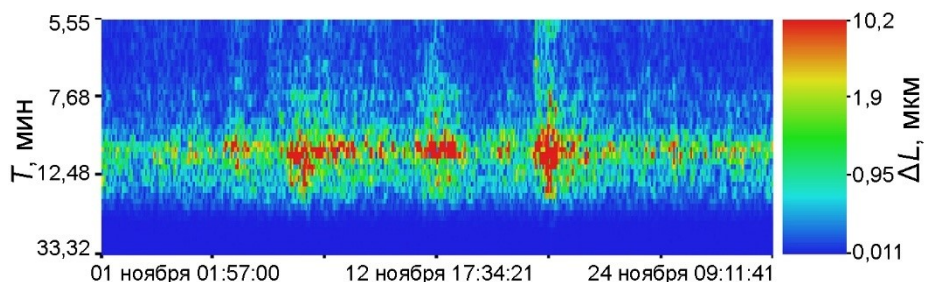
Р и с 4. Участок записи данных берегового лазерного деформографа за период 31 октября – 24 ноября 2025 г.

F i g. 4. Section of the coastal laser strainmeter data record for October 31 – November 24, 2025

На фоне этих медленно меняющихся составляющих отчетливо выделяются интервалы, в которых линия записи визуально «утолщается». Такие участки соответствуют времени существенного увеличения амплитуды колебаний, обусловленных сейсами б. Алексеева. Несмотря на то, что вклад сейш в общий деформационный сигнал на длинных временных масштабах относительно мал, их амплитудные всплески хорошо различимы даже без предварительной фильтрации и указывают на эпизодический характер возбуждения собственных мод акватории.

Для более детального анализа временной эволюции сейшевых колебаний на рис. 5 приведена динамическая спектрограмма участка записи, построенная в диапазоне периодов, соответствующих собственным колебаниям б. Алексеева. Использование динамического спектрального представления позволяет проследить не только наличие отдельных сейшевых мод, но и изменение их

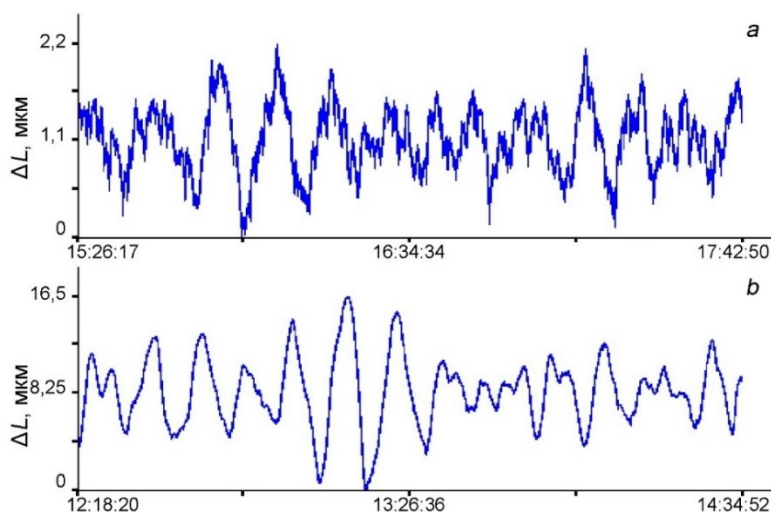
амплитуды во времени. На спектрограмме отчетливо выделяются устойчивые энергетические полосы, соответствующие основным периодам сейшевых колебаний бухты. При этом хорошо заметна модуляция интенсивности этих полос, отражающая чередование периодов слабого и сильного возбуждения сейш.



Р и с. 5. Динамическая спектрограмма участка записи данных лазерного деформографа за период 1 – 24 ноября 2025 г.

F i g. 5. Dynamic spectrogram of a section of the laser strainmeter data record for November 1–24, 2025

Для иллюстрации изменчивости амплитуды сейшевых колебаний на рис. 6 приведены два фрагмента записи деформационного сигнала, соответствующие различным динамическим условиям в б. Алексеева. Верхняя часть показывает пример относительно спокойного состояния акватории, при котором амплитуда сейшевых колебаний минимальна, тогда как на нижней части рисунка представлен участок записи, полученной после усиления ветрового воздействия, сопровождающегося заметным ростом амплитуды сейш.



Р и с. 6. Примеры регистрации сейшевых колебаний в б. Алексеева, зафиксированных береговым лазерным деформографом в 2025 г. Показаны участки записи при слабом возбуждении сейшевых колебаний 2 ноября (а) и при усиленном ветровом воздействии 16 ноября (b)

F i g. 6. Examples of recording seiche oscillations by a coastal laser strainmeter in Alekseev Bay in 2025. Sections of the records showing weak exciting of seiche oscillations on November 2 (a) and at increased wind forcing on November 16 (b) are shown

Несмотря на существенное различие амплитуд колебаний, характерные периоды сигнала на двух участках записи визуально совпадают, что указывает на сохранение собственных частот акватории при изменении условий возбуждения.

Для количественного сопоставления спектральных характеристик сигнала в условиях слабого и сильного возбуждения сейшевых колебаний на рис. 7 приведены амплитудные спектры деформационного сигнала, рассчитанные по суточным временным рядам, включающим соответствующие интервалы, представленные на рис. 6. На спектрах показаны доминирующие периоды, соответствующие собственным модам б. Алексеева.

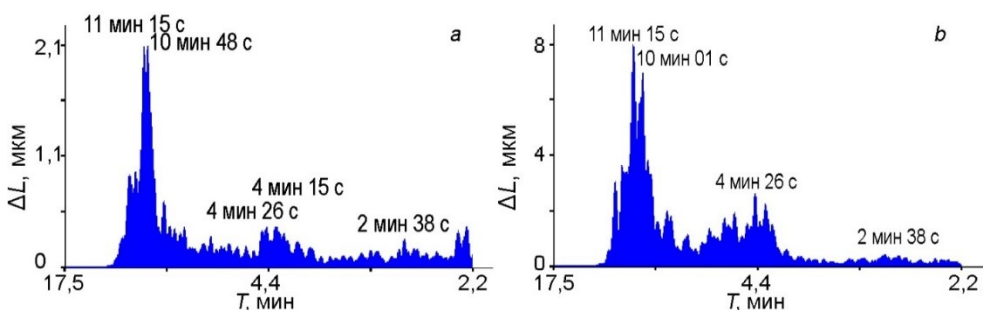


Рис. 7. Амплитудные спектры деформационного сигнала, рассчитанные по суточным записям: *a* – в период слабого возбуждения сейш; *b* – при их усиленном возбуждении под действием ветра
Fig. 7. Amplitude spectra of the deformation signal calculated from daily records: *a* – during the period of weak exciting of seiches; *b* – during the wind-induced intensified exciting of seiches

Сравнение спектров показывает, что усиление внешнего воздействия приводит преимущественно к росту амплитуды сейшевых колебаний, тогда как набор доминирующих периодов и их значения остаются практически неизменными. Это подтверждает интерпретацию наблюдаемых колебаний как собственных мод акватории, частоты которых определяются геометрией и батиметрией бухты, а не характером возбуждающего воздействия.

Связь сейшевых колебаний б. Алексеева с геометрией и батиметрией

Классическая теория сейш была обобщена в исследованиях для реальных бухт и гаваней сложной формы [1]. В приближении длинных волн, когда длина волны существенно превышает глубину, фазовая скорость гравитационных волн определяется выражением

$$c = \sqrt{gH}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; H – эффективная глубина, зависящая от пространственного распределения энергии конкретной колебательной моды.

Фундаментальная продольная сейша полузамкнутой бухты. Для полузамкнутых бухт с открытым входом фундаментальная сейшевая мода часто описывается как четвертьволновой резонатор, в котором в районе входа формируется узел колебаний уровня, смещенный за пределы акватории. В этом

случае используется четвертьволновое выражение для фундаментальной моды (формула Мериана) [1]:

$$T_0 = \frac{4L_{\text{эфф}}}{\sqrt{gH_{\text{эфф}}}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{эфф}}$ – эффективная длина бухты, превышающая ее геометрическую длину за счет так называемой поправки входа (бухты); $H_{\text{эфф}}$ – эффективная глубина для данной моды [1]. Согласно данным исторических наблюдений [11] и лазерного деформографа, в б. Алексеева устойчиво регистрируется период $T_0 \approx 10,5$ мин (630 с), который характеризуется максимальной амплитудой в спектре и, следовательно, интерпретируется как фундаментальная сейша.

Геометрический продольный масштаб бухты, определенный по береговой линии и створам, составляет $L \approx 1,3\text{--}1,5$ км. С учетом открытого входа можно ожидать, что $L_{\text{эфф}}$ превышает геометрическую длину бухты. Подставляя эти значения в выражение для периода, получаем оценку эффективной глубины:

$$H_{\text{эфф}} = \frac{1}{g} \left(\frac{4L_{\text{эфф}}}{T_0} \right)^2. \quad (3)$$

Эта оценка ($\approx 8\text{--}10$ м) хорошо согласуется с батиметрией бухты, максимальные глубины которой до 15–16 м сосредоточены в центральной части акватории, тогда как прибрежные зоны и южная часть бухты характеризуются меньшими глубинами. Таким образом, период 10,5 мин обоснованно интерпретируется как фундаментальная продольная сейша всей б. Алексеева аналогично результатам, ранее полученным для бухт сходного масштаба [11].

Первая собственная мода бухты. В спектре сигнала лазерного деформографа устойчиво присутствует период $T \approx 2$ мин 38 с (158 с), который не является гармоникой фундаментальной продольной моды. В одномерном приближении такие колебания могли быть интерпретированы как поперечная сейша, однако для бухт сложной формы и неоднородной батиметрии подобная классификация является избыточным упрощением.

Согласно теории собственных колебаний прибрежных бассейнов, развитой в работах А. Б. Рабиновича, реальные бухты следует рассматривать как двумерные резонаторы, в которых периоды сейшевых колебаний определяются совместным влиянием продольных и поперечных масштабов, а также пространственным распределением глубин [1]. В этом случае собственные частоты ω_j являются решениями краевой задачи для уравнений мелкой воды и не сводятся к простым одномерным выражениям типа формулы Мериана.

В первом приближении в оценочном виде для длинных волн собственные частоты можно представить как

$$\omega_j^2 \sim gH_{\text{эфф}}(k_{x,j}^2 + k_{y,j}^2), \quad (4)$$

где $H_{\text{эфф}}$ – эффективная глубина, зависящая от пространственной локализации энергии данной моды; $k_{x,j}$ и $k_{y,j}$ – эффективные волновые числа, определяемые геометрией акватории и граничными условиями.

Для бухт с переменной шириной и резкими изменениями глубин в районе входа, к которым относится б. Алексеева, собственные моды часто имеют диа-

гональную ориентацию узловых линий, а распределение амплитуд не подчиняется простой продольной или поперечной симметрии. Согласно работе [1], в таких бассейнах первая и последующие собственные формы представляют собой смешанные моды, формируемые взаимодействием продольных и поперечных стоячих волн.

Именно такая структура первой собственной моды с оценкой около 2,7 мин была выявлена в б. Алексеева в результате натурных измерений и численного моделирования [11]. По результатам моделирования установлено, что данная мода имеет одну узловую линию, ориентированную по диагонали акватории (востоко-северо-восток – западо-юго-запад), и две пучности, при этом основная пучность локализована во внутренней (кутовой) части бухты, ближе к южному приглубому берегу.

Таким образом, период $T_1 \approx 2 \text{ мин } 38 \text{ с}$ следует трактовать как первую собственную моду б. Алексеева, которая имеет двумерную пространственную структуру и не может быть описана как чисто продольная или поперечная сейша в рамках одномерной теории. Существенная концентрация амплитуды данной моды во внутренней части бухты объясняет ее эффективную регистрацию береговым лазерным деформографом, установленным вблизи области пучности, а также сильную амплитудную модуляцию при усилении ветрового воздействия.

Локализованная собственная мода внутреннего подбассейна. В спектре сигнала лазерного деформографа, помимо фундаментальной сейши с периодом около 10,5 мин и первой собственной моды с периодом около 2,6–2,7 мин, устойчиво наблюдается период порядка $T \approx 4,1 - 4,3 \text{ мин}$. Данный период не является гармоникой основной моды и указывает на наличие дополнительного резонансного масштаба в пределах акватории б. Алексеева.

Анализ береговой линии показывает, что южная (внутренняя) часть бухты представляет собой подбассейн (ограниченный выступающими мысами), характерная продольная протяженность которого составляет порядка 1,0 км. При типичных глубинах данной области ($H_{\text{эфф}} \sim 9-11 \text{ м}$) характерный период собственных колебаний составляет порядка 4 мин, что хорошо согласуется с наблюдаемым спектральным максимумом.

Следует также подчеркнуть, что в соответствии с общей теорией сейшевых колебаний в бассейнах сложной формы собственные моды определяются как решения двумерной краевой задачи для уравнений мелкой воды, а их частоты масштабируются по следующему закону:

$$\omega_j^2 = gH_{\text{эфф}}\lambda_j, \quad (5)$$

где λ_j – собственные значения, зависящие от геометрии и граничных условий [1]. В этом смысле период около 4,2 мин следует интерпретировать не как строгую одномерную продольную сейшу, а как локализованную собственную моду внутреннего подбассейна, пространственная структура которой определяется конфигурацией южной части бухты.

Локализация амплитуды данной моды во внутренней части акватории объясняет ее устойчивую регистрацию береговым лазерным деформографом и подчеркивает роль внутренней геометрической неоднородности бухты в формировании спектра сейшевых колебаний.

Заключение

В работе представлены результаты регистрации и анализа сейшевых колебаний в б. Алексеева (о. Попова). Исследования основаны на данных берегового лазерного деформографа, установленного близко к берегу. Показано, что измерения микросмещений земной коры рядом с водоемом позволяют надежно регистрировать собственные колебания прибрежной акватории в разных динамических условиях, включая периоды слабого и сильного атмосферного воздействия.

Сравнение данных видеорегистрации уровня моря с деформационными измерениями показало, что сейшевые колебания бухты заметно влияют на формирование длиннопериодного сигнала лазерного деформографа, что подтверждает гидродинамическую природу этих процессов.

Проведена калибровка деформационных измерений с помощью независимых данных видеорегистрации колебаний уровня моря. Установлено, что в полосе основной сейшевой моды деформационный сигнал линейно пропорционален амплитуде колебаний уровня. Получен коэффициент преобразования $K = 0,66 \pm 0,03$ мкм/см, который в дальнейшем может использоваться для оценки амплитуды сейшевых колебаний уровня моря на основе данных деформографа. Высокие значения коэффициента корреляции ($|r| > 0,9$) подтверждают физическую обоснованность соотношения.

Анализ временных рядов и их спектрограмм показал, что усиление ветрового воздействия в бухте приводит к увеличению амплитуды сейшевых колебаний, при этом набор и значения доминирующих периодов практически не меняются. Это подтверждает, что наблюдаемые колебания являются собственными модами акватории, частоты которых зависят от геометрии и батиметрии бухты, а не от характера внешнего воздействия.

В спектре сигнала деформографа четко выделяются три основных периода. Период около 10,5 мин соответствует фундаментальной продольной сейше всей б. Алексеева – нулевой моде полузамкнутого бассейна с открытым входом. Оценки эффективной глубины, полученные на основе формулы Мерриана, хорошо согласуются с реальной батиметрией и ранее опубликованными данными.

Период около 2,6–2,7 мин относится к первой собственной моде бухты. В отличие от основной моды у нее сложная двумерная пространственная структура и ее нельзя описать как просто продольную или поперечную сейшу. Согласно теории сейшевых колебаний для бассейнов сложной формы, эта мода соответствует решению двумерной краевой задачи для уравнений мелкой воды. Основная пучность находится во внутренней части бухты, что, видимо, позволяет фиксировать эти колебания лазерным деформографом и наблюдать амплитудную модуляцию при усилении ветра.

Кроме того, в спектре присутствует еще одна мода с периодом около 4,1–4,3 мин, связанная с колебаниями внутреннего подбассейна. Этот период определяется геометрией и батиметрией южной части бухты и не является гармоникой фундаментальной продольной сейши. Наличие такой моды подчеркивает важную роль внутренней геометрической неоднородности бухты в формировании ее резонансного отклика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations. Chapter 9 // Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y. C. Kim. Singapore : World Scientific Publishing, 2009. 44 p. EDN WWGXHT. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
2. Continuous seiche in bays and harbors / J. Park [et al.] // Ocean Science. 2016. Vol. 12. P. 355–368. EDN YCWBWK. <https://doi.org/10.5194/os-12-355-2016>
3. *Vilibić I., Domijan N., Čupić S.* Wind versus air pressure seiche triggering in the Middle Adriatic coastal waters // Journal of Marine Systems. 2005. Vol. 57, iss. 1–2. P. 189–200. EDN KZHHXZ. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.04.007>
4. *Wijeratne E. M. S., Woodworth P. L., Pugh D. T.* Meteorological and internal wave forcing of seiches along the Sri Lanka coast // Journal Geophysical Research: Oceans. 2010. Vol. 115, iss. C3. P. C03014. EDN BDOMXM. <https://doi.org/10.1029/2009JC005673>
5. *Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В.* Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 261–276. EDN QEFCWJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276>
6. *Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В.* Резонансные колебания в системе смежных бухт // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 423–436. EDN NJQMMV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-423-436>
7. *Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В.* Исследование сейшевых колебаний в бухте со свободным входом // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 4. С. 16–25. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-4-16-25>
8. Sea Level Oscillations Spectra of a Shallow Coastal Bay: Cost-Effective Measurements and Numerical Modelling in Kruglaya Bay / Yu. V. Manilyuk [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 69. P. 103326. EDN EINBJJ. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103326>
9. Инфразвуковые колебания Японского моря / Г. И. Долгих [и др.] // Доклады Академии наук. 2011. Т. 441, № 1. С. 98–102. EDN OJHIDD.
10. *Смирнов С. В.* О расчете сейшевых колебаний средней части залива Петра Великого // Сибирский журнал вычислительной математики. 2014. Т. 17, № 2. С. 203–216. EDN SKIVXT.
11. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование / Г. В. Шевченко [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. 2010. Т. 1. С. 52–62. EDN NWFDMJ.
12. Разработка и апробация в бухте Алексеева (о. Попова) технологий регистрации волнения и колебаний уровня моря с использованием видеоволномеров / П. С. Зимин [и др.] // Физика геосфер. Вып. 1. 2019. С. 52–64. EDN TUGMWG. <https://doi.org/10.35976/POI.2019.25.50.005>
13. Observations of the seiche that shook the world / T. Monahan [et al.] // Nature Communications. 2025. Vol. 16, iss. 1. P. 4777. EDN FCRAUY. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59851-7>
14. Twenty-Meter Laser Strainmeter "Popova Isl." / M. Bolsunovskii [et al.] // Sensors. 2024. Vol. 24, iss. 17. 5788. EDN JTNKJX. <https://doi.org/10.3390/s2417578>
15. Программа QAVIS: применение для исследования характеристик морского волнения с использованием интернет-видеотрансляций с надводных и подводных камер / В. К. Фищенко [и др.] // Физика геосфер : Материалы докладов, Владивосток, 11–15 сентября 2023 года. Владивосток : Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН. 2023. С. 127–132. <https://doi.org/10.34906/9785604968383.127>

Об авторах:

Чупин Владимир Александрович, заведующий лабораторией физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5103-8138**, **ResearcherID: G-8803-2016**, **Scopus Author ID: 7004931608**, **SPIN-код: 3093-7705**, chupin@poi.dvo.ru

Долгих Григорий Иванович, главный научный сотрудник, лаборатория физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, академик РАН, **ORCID ID: 000-0002-2806-3834**, **ResearcherID: A-7685-2014**, **Scopus Author ID: 7003888822**, **SPIN-код: 5241-3375**, dolgikh@poi.dvo.ru

Фищенко Виталий Константинович, заведующий сектором анализа океанологической информации, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5744-8207**, **ResearcherID: ABF-7810-2021**, **Scopus Author ID: 6506814798**, **SPIN-код: 4349-8370**, fischenko@poi.dvo.ru

Зимин Петр Степанович, старший научный сотрудник лаборатории геофизических полей, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат геолого-минералогических наук, **Scopus Author ID: 6602169956**, **SPIN-код: 9932-6299**, zimin@poi.dvo.ru

Шабельникова София Кирилловна, старший инженер лаборатории физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **Scopus Author ID: 60636396200**, **SPIN-код: 5003-6797**, shabelnikova.sk@poi.dvo.ru

Швец Вячеслав Александрович, старший научный сотрудник лаборатории физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4752-6865**, **Scopus Author ID: 14058856800**, **SPIN-код: 3267-9037**, vshv@poi.dvo.ru

Яковенко Сергей Владимирович, ведущий научный сотрудник лаборатории физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (690043, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3784-9449**, **Scopus Author ID: 7005827431**, **SPIN-код: 8671-8234**, ser_mail@poi.dvo.ru