

УДК 550.343.6+531.715.1+539.3

Ю. Б. Иванов ✉
В. А. Насонкин
О. В. Боборыкина

Теоретический и инструментальный подход к мониторингу длинноволновых процессов в акваториях Черного моря, прилегающих к Крымскому полуострову

Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,
г. Симферополь

Аннотация. Приводятся результаты вычислительных экспериментов и инструментальных наблюдений по регистрации собственных колебаний Черного моря, относящимся к ранее неисследованным диапазонам периодов..

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, длинноволновые процессы, лазерные интерферометры.

Введение. Ухудшение экологической обстановки, обусловленное циркуляцией вод в прибрежных зонах Черного моря [1], привлекает в настоящее время все большее внимание, так как вероятность различного рода экологических катастроф из года в год возрастает.

Для построения в Крымском регионе эффективной системы мониторинга за экологически опасными явлениями такого рода, необходимо знать закономерности динамики длинноволновых процессов, протекающих в акваториях Черного моря, прилегающих к Крымскому полуострову.

Динамика длинноволновых процессов в Черном море определяется двумя типами волн: колебаниями свободной поверхности моря и внутренними волнами, важнейшими из которых являются колебания границы насыщенных сероводородом нижних слоев моря. Значительное увеличение амплитуды колебаний этого типа волн оказывает существенное влияние на экологическую обстановку в прибрежных зонах Крымского полуострова. Так, например, колебания свободной поверхности моря в результате резонансного усиления под воздействием сильного ветра могут привести к значительному поднятию уровня моря вблизи берега. Известно [1], что такой штормовой нагон имел место на Северо-Западном шельфе Черного моря с 17 по 21 февраля 1979 г.

При значительном увеличении амплитуд внутренних волн может произойти такое экологически опасное явление как выход сероводорода и других ядовитых газов, накопившихся в нижних слоях моря, на свободную поверхность и в атмосферу.

По-видимому, именно значительное увеличение амплитуды колебаний внутренних волн стало причиной сероводородной катастрофы, происшедшей у берегов Севастополя в ходе сильного землетрясения 11 сентября 1927 г., эпицентр которого находился в море юго-восточнее г. Ялты.

Для выявления закономерностей динамики длинноволновых процессов и их мониторинга авторами статьи разработаны как теоретические, так и инструментальные средства.

Теоретический подход, разработанный на кафедре прикладной математики ТНУ, состоит в построении достоверных математических моделей и проведении расчетов по динамике волновых процессов Черного моря.

Инструментальный подход к мониторингу длинноволновых процессов Черного моря, разработанный в Геофизической обсерватории ТНУ, состоит в использовании лазерных интерферометров и построении спектров временных рядов, регистрируемых этими приборами.

Целью работы было проведение вычислительных экспериментов и инструментальных наблюдений по определению длинноволновых собственных колебаний Черного моря.

Математическая модель. Рассмотрим систему дифференциальных уравнений теории мелкой воды для двухслойной вращающейся жидкости [2]

$$\begin{aligned}u_{1t} - f \cdot v_1 + g \cdot \eta_{1x} &= 0 \\v_{1t} + f \cdot u_1 + g \cdot \eta_{1y} &= 0 \\u_{2t} - f \cdot v_2 + g \cdot \eta_{1x} + g \cdot \delta\rho(\eta_2 - \eta_1)_x &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned} v_{2t} + f \cdot u_2 + g \cdot \eta_{1y} + g \cdot \delta\rho(\eta_2 - \eta_1)_y &= 0 \\ (H_1 u_1)_x + (H_1 v_1)_y + (\eta_1 - \eta_2)_t &= 0 \\ (H_2 u_2)_x + (H_2 v_2)_y + \eta_{2t} &= 0 \end{aligned}$$

где u_k, v_k – компоненты горизонтальной скорости для слоя с номером $k = 1, 2$; η_k – отклонение границы слоя от положения статического равновесия, $H_k = H_k(x, y)$ – толщина k -го слоя жидкости, ρ_k – плотность k -го слоя жидкости, $\delta\rho = 1 - \rho_1 / \rho_2$; f – коэффициент Кориолиса, g – ускорение свободного падения.

При исследовании свободных колебаний жидкости в замкнутых ограниченных бассейнах система (1) должна быть дополнена граничными условиями $H_k(\vec{V}^{(k)}, \vec{n}) = 0, k = 1, 2$.

Поставим задачу отыскания периодических ограниченных решений краевой задачи, то есть решений вида

$$(u, v, \eta)(x, y, t) = (u, v, \eta)(x, y) \cdot e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где $(u, v, \eta)(x, y)$ – комплекснозначные функции. Выбрав вещественную либо мнимую часть решения $(u, v, \eta)(x, y, t)$ приходим к искомому вещественному решению системы (1).

Для того, чтобы получить корректную и состоятельную формулировку задачи определения свободных колебаний двухслойной жидкости в ограниченном бассейне с достаточно произвольной формой дна и границ, поступим следующим образом. Исключим из системы уравнений (1) скорости и полученную систему запишем для вещественной и мнимой частей искомых функций $\eta_k, k = 1, 2$. Симметрические дифференциальные операторы, содержащиеся в новой системе, расширим до самосопряженных операторов, действующих в энергетическом пространстве функций, компактно вложенном в гильбертово пространство $L_2(G)$. В результате приходим к задаче определения спектра самосопряженного операторного пучка:

$$(\lambda^3 E - \lambda(B + \alpha^2 E) + \alpha M) \cdot \eta = 0. \quad (3)$$

Для численного решения задачи, используя известный метод конечных элементов, проектируем операторный пучок на конечномерное подпространство кусочно-линейных функций и приходим к задаче определения спектра полиноми-

ального пучка с симметричными матричными коэффициентами. Собственные значения и соответствующие собственные векторы матричного пучка находились с помощью алгоритмов, построенных на основе известных блочно-степенных итерационных методов.

Результаты вычислительных экспериментов. Были вычислены некоторые собственные значения и собственные векторы матричного пучка при значениях параметров, соответствующих моделируемому физическому процессу, то есть свободным колебаниям Черного моря [3]. Математическая модель учитывала следующие параметры: геометрию границ и форму дна, угловую скорость вращения Земли, географическую широту Черного моря, толщины и плотности слоев вод Черного моря в двухслойном приближении. Толщина верхнего слоя постоянной плотности ρ_1 была взята равной $H_1 = 200$ м, относительная разность плотностей нижнего и верхнего слоя $\delta\rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ полагалась постоянной величиной, равной $2 \cdot 10^{-3}$, плотность нижнего слоя ρ_2 также считалась постоянной.

В результате анализа спектра операторного пучка была выявлена следующая структура длинноволновых собственных колебаний Черного моря.

Существуют собственные колебания первого типа (поверхностные волны), при которых амплитуда колебаний свободной поверхности много больше амплитуды колебаний внутренней границы раздела жидкостей.

Существуют собственные колебания второго типа (внутренние волны), при которых амплитуда колебаний границы раздела жидкостей много больше амплитуды колебаний свободной поверхности.

Волна любого из двух типов, период которой меньше инерционного ($T_I = 1053$ мин), расщепляется под действием вращения Земли на волну, движущуюся вдоль берега в положительном направлении (против часовой стрелки) и волну, движущуюся в отрицательном направлении. Период волны T^- , движущейся в отрицательном направлении, всегда меньше периода T^+ волны, движущейся в положительном направлении.

Волны любого типа, период которых больше инерционного, не расщепляются и движутся всегда в положительном направлении.

В рамках двухслойного приближения были вычислены периоды всех типов волн.

Поверхностные волны с периодом меньшим инерционного:

$T_{\text{мин}}^+$	607.6	438.2	353.0	292.7	277.3	237.1	219.1
$T_{\text{мин}}$	520.2	406.1	346.2	277.8	273.0	236.1	211.3

Поверхностные волны с периодом большим инерционного:

$T_{\text{мин}}$ 1053.1 1062.3 1085.0 1111.2 1136.8 1163.5 1176.0 1208.4

Внутренние волны с периодом меньшим инерционного:

$T_{\text{мин}}^+$	1047.1	1039.9	1018.4
$T_{\text{мин}}$	1038.8	1027.4	1011.4

Внутренние волны с периодом большим инерционного:

$T_{\text{час}}$	64.1	72.9	87.5	104.0	132.2	135.2
------------------	------	------	------	-------	-------	-------

Результаты расчетов по моделированию собственных колебаний нижнего, более плотного и насыщенного сероводородом, слоя Черного моря в графическом виде представлены на рис. 1. Здесь выделены области Черного моря, где амплитуда колебаний границы между верхним, менее плотным слоем, и нижним, более плотным, достигает своих наибольших величин, в относительных значениях к максимальной величине амплитуды волны - 0.8 и более. Менее ярко выделены области, где амплитуды волн находятся в пределах 0.7 - 0.8 относительно своего максимального значения.

Расчеты показывают, что максимумы амплитуд внутренних волн всегда находятся на изолинии глубины $H_1 = 200\text{ м}$ и локализованы у побережья Болгарии, Южного берега Крыма и в районе западнее г. Севастополя.

Кроме того, амплитуды внутренних волн могут достигать значительных значений (0.7 - 0.8) в некоторых внутренних областях Черного моря, отмеченных на рисунке более слабым тоном.

Следует отметить, что указанные на рисунке районы - это области, внешнее воздействие на которые может привести к быстрому и значительному росту амплитуд колебаний внутренних волн с соответствующими периодами. По-видимому, такой рост амплитуд колебаний внутренних волн произошел во время сильного Крым-

ского землетрясения 11 сентября 1927 г., эпицентр которого находился вблизи Южного берега Крыма. В ходе этого землетрясения вблизи берега в море наблюдались явления, указывающие на выход сероводорода и других горючих газов на поверхность моря и их возгорание [4].

Описание полученных экспериментальных результатов. С 1987 года в качестве основных инструментальных средств исследования колебательных процессов в окружающей среде в Геофизической обсерватории ТНУ используются двулучевые лазерные интерферометры майкельсоновского типа с разнесенными пучками [5, 7]. Измеряемой величиной в применяемых в настоящее время равноплечных интерферометрах является изменение разности длин плеч. Разделив эту величину на «стационарную» длину плеча интерферометра, получим характеристику, которую можно интерпретировать как разность относительных деформаций вдоль плеч интерферометра. Применительно к геофизическим исследованиям основное преимущество равноплечной схемы по сравнению с неравноплечной заключается в уменьшении на два порядка погрешности, вызываемой метеорологическими условиями и нестабильностью частоты излучения лазера.

В течение многолетних измерений деформаций литосферы, проводившихся с помощью интерферометров установленных в штольне в районе г. Севастополя, многократно регистрировались колебания, индуцированные, как обосновано в работах [6, 7], длинными поверхностными волнами Черного моря с периодами меньшими инерционного. В то же время, особенности получаемых спектральных оценок в диапазоне периодов от 16 до 22 часов интерпретировались как следствия исключительно атмосферных явлений, происходящих в окрестности пункта наблюдения, и по этой причине не классифицировались, как имеющие возможное отношение к геофизическим процессам, развивающимся в районе земной коры, прилегающем к Черному морю. Изложенные выше результаты численных экспериментов и представленные в графическом виде результаты обработки данных в диапазоне периодов от 16 до 22 часов, позволяют принять в качестве допущения, что ранее выдвинутая гипотеза [7] о причинно-следственной связи между процессами, происходящими в очаге воз-

можного землетрясения, и динамическими характеристиками спектральных оценок, может быть распространена на весьма

широкий диапазон наблюдаемых периодов литосферных колебаний с нижней границей в 16 часов.

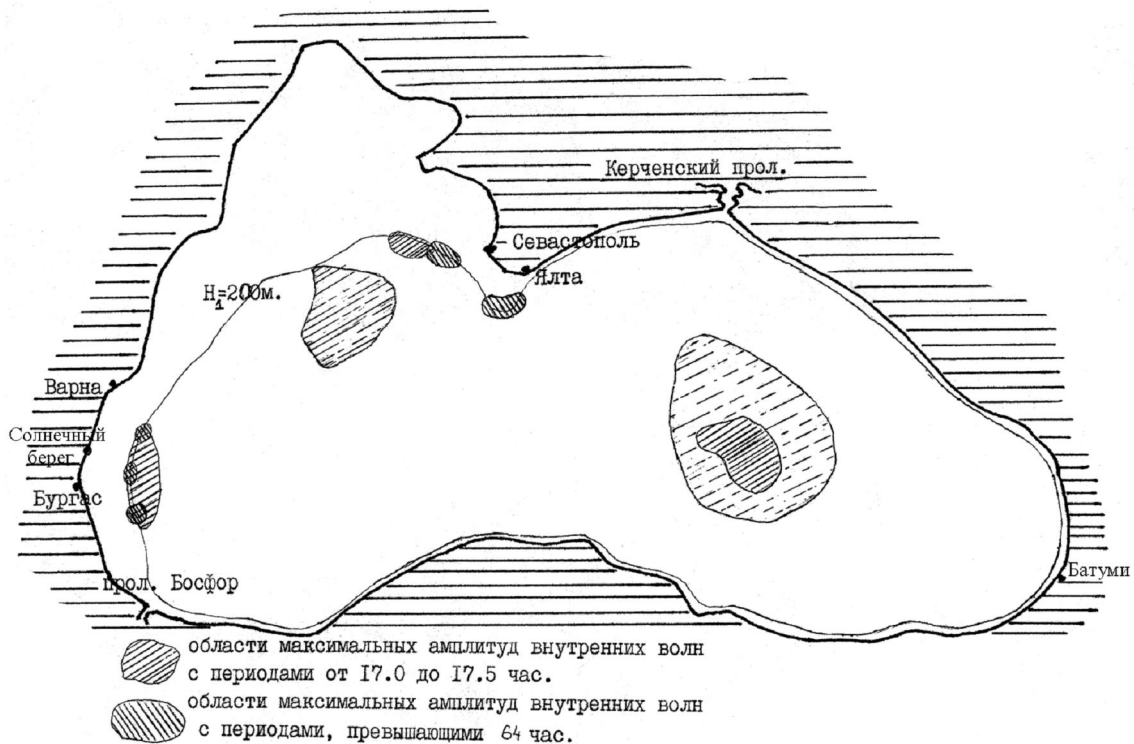


Рис. 1. Результаты расчетов по моделированию внутренних волн Черного моря.

Изложим подробнее обработанные результаты инструментальных наблюдений. На рисунках 2 – 9, приводятся отфильтрованные цифровым фильтром четыре реализации и полученные из них оценки спектральной плотности мощности. Графики реализаций по вертикальной оси отмасштабированы на разность относительных деформаций между плечами интерферометра. Масштабной единицей по горизонтальной оси являются сутки. Поскольку в качестве одной из основных целей исследований ставилось изучение «тонкой» структуры оценок спектральной плотности мощности в достаточно узком диапазоне периодов, то для их получения использовался модифицированный ковариационный метод [8]. На представленных спектральных графиках рядом с локальными максимумами указаны в минутах соответствующие «периоды».

Авторы полагают, что результаты вычислительных экспериментов, приведенные в первой части данной публикации, в достаточной мере объясняют особенности полученных спектральных оценок. Очевидно также, что для выявления возмож-

ных закономерностей в спектральных структурах как в предъявленном диапазоне периодов, так и для более широких интервалов, необходимы весьма продолжительные инструментальные наблюдения.

Практическая ценность полученных результатов и перспективность дальнейших исследований.

Анализ расчетов, проведенных в рамках созданной математической модели, позволил выявить акватории Черного моря, в которых сероводородные катастрофы наиболее вероятны (результат, который практически невозможно и очень дорого получить путем натуральных наблюдений).

Анализ спектров временных рядов, регистрируемых приборами, указывает на такие особенности спектральных оценок длинноволновых процессов Черного моря, которые могут служить предвестниками сероводородных катастроф, землетрясений и других экологически опасных явлений.

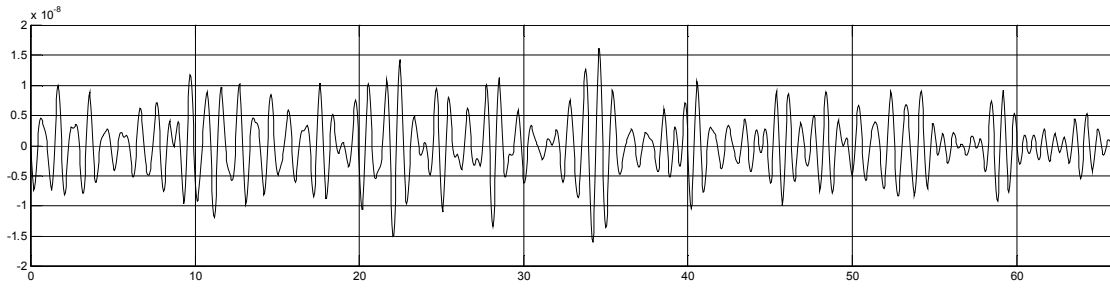


Рис. 2. Реализация, полученная интерферометром-деформографом с 11 ч 59 м (16.01.02) до 05 ч 34 м (24.03.02). Диапазон периодов: 14 ч – 22 ч.

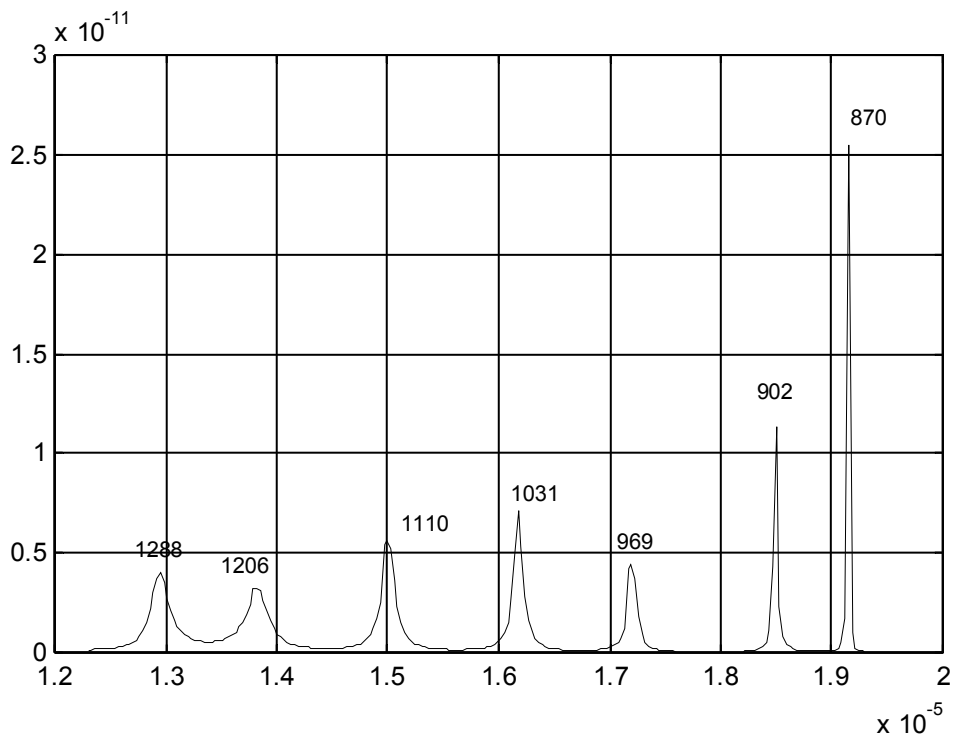


Рис. 3. Оценка спектральной плотности мощности реализации, представленной на Рис. 2. Модифицированный ковариационный метод.

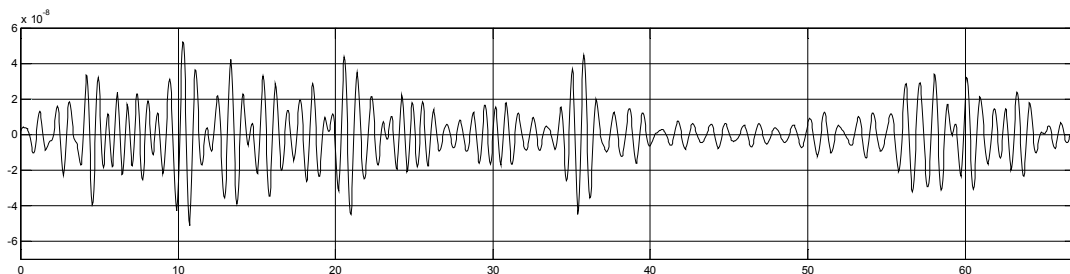


Рис. 4. Реализация, полученная интерферометром-деформографом с 16 ч 56 м (31.03.02) до 10 ч 32 м (06.06.02). Диапазон периодов: 14 ч – 22 ч.

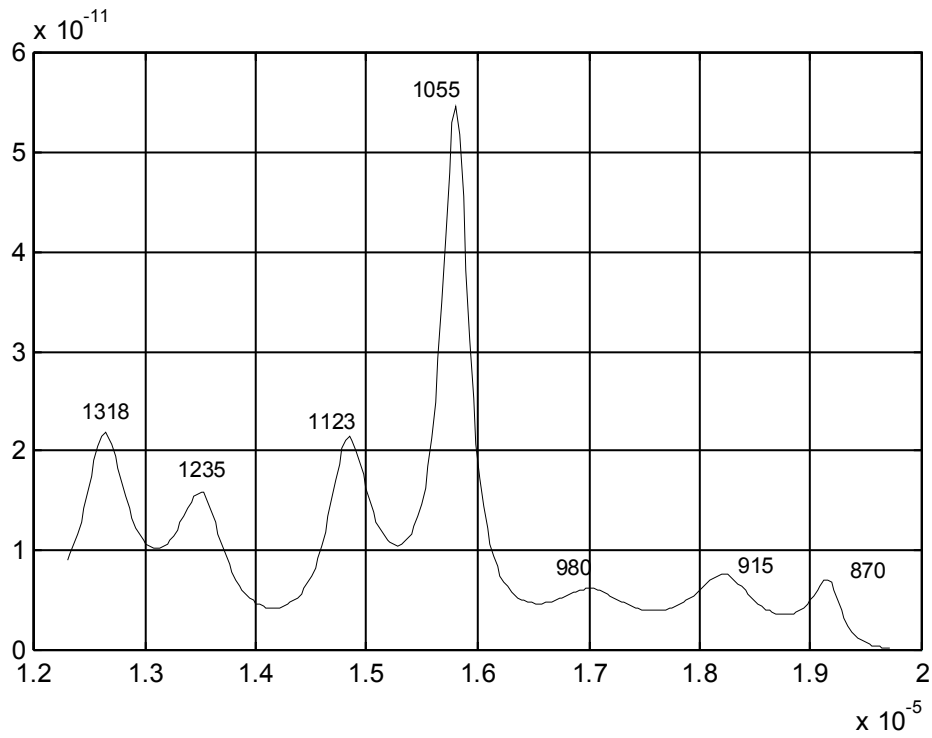


Рис. 5. Оценка спектральной плотности мощности реализации, представленной на Рис. 4. Модифицированный ковариационный метод.

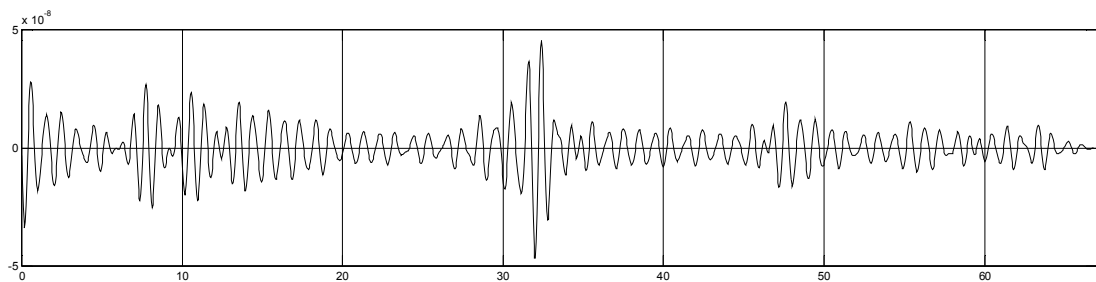


Рис. 6. Реализация, полученная интерферометром-деформографом с 06 ч 58 м (10.06.02) до 00 ч 33 м (16.08.02). Диапазон периодов: 14 ч – 22 ч.

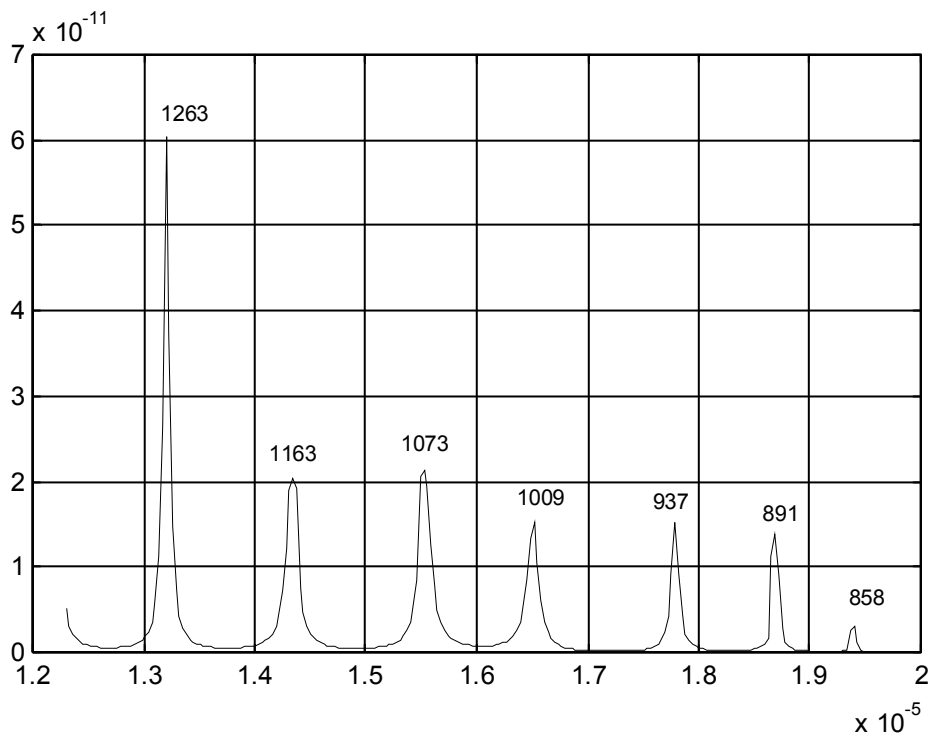


Рис. 7. Оценка спектральной плотности мощности реализации, представленной на Рис. 6. Модифицированный ковариационный метод.

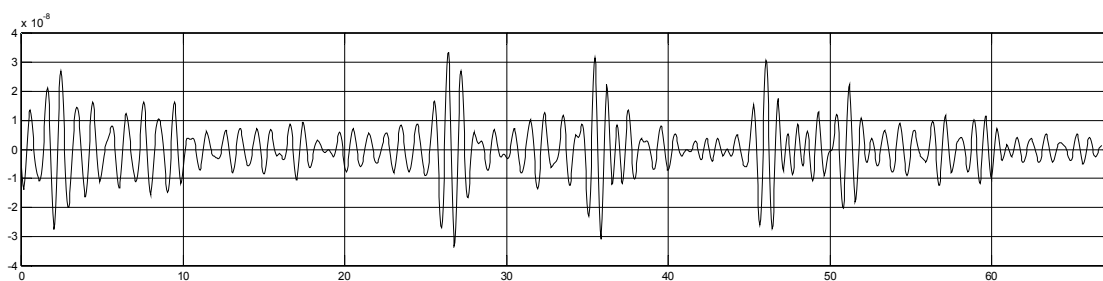


Рис. 8. Реализация, полученная интерферометром-деформографом с 02 ч 00 м (15.08.02) до 19 ч 36 м (20.10.02). Диапазон периодов: 14 ч – 22 ч.

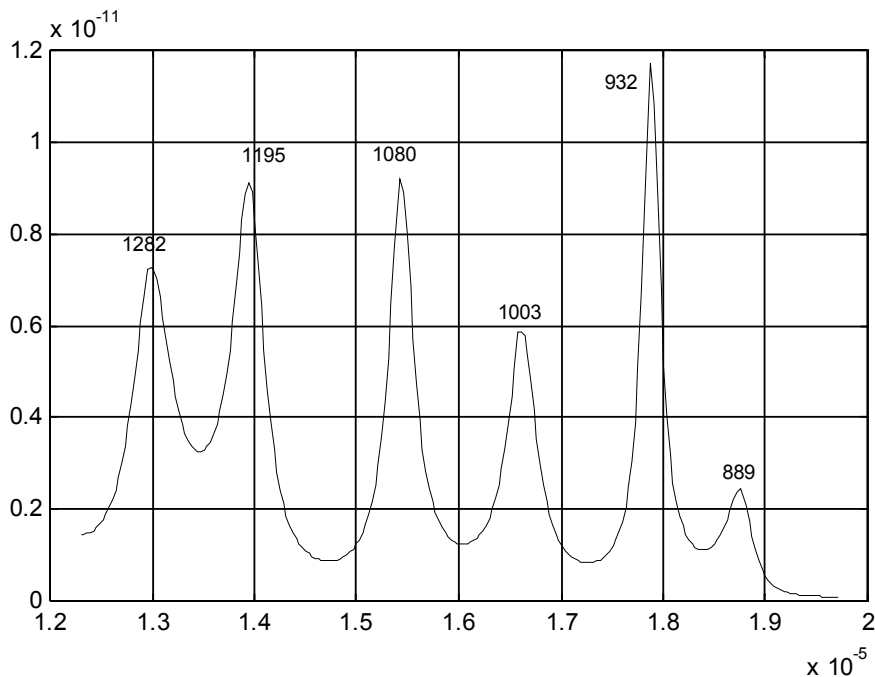


Рис. 9. Оценка спектральной плотности мощности реализации, представленной на Рис. 8. Модифицированный ковариационный метод.

Литература

1. Вольцингер Н.Е., Демиров Е.К., Каган Б.А. Резонансное усиление длинноволновых возмущений на северо-западном шельфе Черного моря. ДАН СССР, 1991. Том 320, №2. – С. 456-460.
2. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. – М.: Мир, 1981. – 480 с.
3. Иванов Ю. Б. Двухслойная модель сейшевых колебаний Черного моря. //Доп. НАН України. – 2000. – №8. – С.119-123.
4. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона (инструментальный период наблюдений 1927-1986 гг.). – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
5. Нестеров В.В., Головин С.Л., Насонкин В.А. Измерение длиннопериодных колебаний Земли лазерными интерферометрами-деформографами. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1990. – №4. – С. 72-78.
6. Иванов Ю.Б., Насонкин В.А., Нестеров В.В., Чехов В.Н. Исследования литосферных деформаций, предшествующих землетрясениям, средствами большебазовой лазерной интерферометрии. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1995. – №7. – С. 51-62.
7. Нестеров В.В. Большебазовые лазерные интерферометры в геофизических исследованиях. – Симферополь: «Таврия», 1996. – 285 с.
8. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

Анотація. Ю.Б. Иванов, В.А. В.О. Насонкін, О.В. Боборыкіна Теоретичний і інструментальний підхід до моніторингу довгохвильових процесів у акваторіях Чорного моря, прилеглих до Кримського півострову Приведено результати обчислювальних експериментів та інструментальних спостережень з реєстрації власних коливань Чорного моря. Ці дані відносяться до діапазонів періодів, які раніше не досліджувались.

Ключові слова: сейсмічний моніторинг, довгохвильові процеси, лазерні інтерферометри.

Abstract. Yu.B. Ivanov, V.O. Nasonkin, O.V. Bobrykina Theoretical and instrumental approach for monitoring of long-wave processes in water area of the Black Sea adjoining to the Crimean peninsula The results of computational experiments and instrumental observation of registration of intrinsically oscillation of the Black Sea are given. This data refers to period's diapasons/ranges/spectral bands, which have never been investigated.

Key words: seismic monitoring, long-wave processes, laser interferometers.

Поступила в редакцию 25.04.2004.