

Статистические характеристики фонового поля микросейсмических колебаний

Г. И. Долгих¹, С. Г. Долгих^{1, 2}, М. П. Иванов^{1, 2, ✉},
Е. Н. Пелиновский^{3, 4, 5}, Т. Г. Талипова³

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного
отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

² Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской
академии наук, Владивосток, Россия

³ Институт прикладной физики им. академика А. В. Гапонова-Грехова Российской академии
наук, Нижний Новгород, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики,
Нижний Новгород, Россия

⁵ Нижегородский технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
✉ Ivanov.mp@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025;
принята к публикации 11.07.2025.

Аннотация

Цель. Целью данной работы является изучение статистических характеристик фонового поля микросейсмических колебаний, зарегистрированных с помощью горизонтальных неравноплечих лазерных деформографов, а также оценка отклонений данных от нормального распределения.

Методы и результаты. Для исследования использовались данные двух лазерных деформографов (созданных на основе современных лазерно-интерференционных методов), установленных на морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» (Приморский край). Анализировались данные микродеформаций верхнего слоя земной коры, полученных с помощью лазерных деформографов с длиной измерительного плеча 52,5 м и ориентацией на север – юг и с длиной измерительного плеча 17,5 м и ориентацией на запад – восток. По данным лазерно-интерференционных приборов за 2019–2020 гг. проводился статистический анализ шумового поля микросейсмических колебаний. Рассматриваемый частотный диапазон (0,05–0,5 Гц) охватывает микросейсмические процессы, происходящих как в земле, так и в море (диапазон ветровых волн и волн зыби). Проведен комплексный анализ статистических свойств сигналов, включая оценку коэффициентов асимметрии и эксцесса, и выявлены отклонения от нормального распределения. Для описания плотности функции распределения использован ряд Грама – Шарлье, который соответствует реальным данным с наилучшим коэффициентом корреляции. Эксцесс в обоих компонентах преимущественно положительный, что указывает на вероятность выбросов большой амплитуды.

Выводы. Проведенный анализ позволил количественно оценить отклонения фонового сигнала от нормального распределения и выявить его статистические особенности. Результаты, полученные в ходе исследования, важны для анализа фоновых характеристик микросейсм, отклонения от которых позволяют изучать физические механизмы генерации и взаимодействия океанических, атмосферных и литосферных процессов.

Ключевые слова: микросейсмические колебания, лазерный деформограф, шумовые характеристики, статистические характеристики, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, преобразование Фурье, ряд Грама – Шарлье

Благодарности: данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта № 075-15-2024-642 «Исследование процессов и закономерностей возникновения, развития и трансформации катастрофических явлений в океанах и на континентах методами сейсмоакустического мониторинга».

Для цитирования: Статистические характеристики фонового поля микросейсмических колебаний / Г. И. Долгих [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 5. С. 611–630. EDN WCRRTV.

Original article

Statistical Characteristics of the Background Microseismic Field

G. I. Dolgikh¹, S. G. Dolgikh^{1, 2}, M. P. Ivanov^{1, 2, ✉},
E. N. Pelinovsky^{3, 4, 5}, T. G. Talipova³

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

³ A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

⁴ Higher School of Economics University, Nizhny Novgorod, Russia

⁵ Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
✉ Ivanov.mp@poi.dvo.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to investigate the statistical characteristics of background microseismic field recorded using horizontal unequal-arm laser strainmeters, as well as to assess the data deviations from a normal distribution.

Methods and Results. The research involved the data from two laser strainmeters developed on the basis of modern laser-interference techniques and installed at the marine experimental station of POI FEB of RAS “Shults Cape” (Primorsky Krai). The analysis was focused at the microdeformations of the Earth's crust upper layer measured by the laser strainmeters with measuring arm lengths 52.5 m (north – south orientation) and 17.5 m (west – east orientation). The microseismic noise field was statistically analyzed using the data from laser-interference devices for 2019–2020. The frequency range under consideration (0.05–0.5 Hz) includes microseisms of the events generated both by terrestrial and marine processes (the range of wind and swell waves). The statistical features of signals were comprehensively analyzed including the assessment of skewness and kurtosis coefficients, also the deviations from normal distribution were revealed. The Gram-Charlier series which shows the best correlation with the empirical data was applied to describe the density of probability function. Kurtosis was predominantly positive for both components that indicated a high likelihood of large-amplitude outliers.

Conclusions. The performed analysis made it possible to assess quantitatively the background signal deviations from normal distribution, and to reveal its statistical features. The obtained results are very important for analyzing the background characteristics of microseisms, since the deviations from them allow studying the physical mechanisms of generation and interaction of oceanic, atmospheric and lithospheric processes.

Keywords: microseismic oscillations, laser strainmeter, noise characteristics, statistical characteristics, skewness coefficient, kurtosis coefficient, Fourier transform, Gram-Charlier series

Acknowledgments: The study was carried out with partial financial support from grant No. 075-15-2024-642 “Study of the processes and patterns of occurrence, development and transformation of catastrophic phenomena in the oceans and at the continents using seismoacoustic monitoring methods”.

For citation: Dolgikh, G.I., Dolgikh, S.G., Ivanov, M.P., Pelinovsky, E.N. and Talipova, T.G., 2025. Statistical Characteristics of the Background Microseismic Field. *Physical Oceanography*, 32(5), pp. 624-642.

Введение

Изучение фонового поля Земли является необходимым для понимания взаимодействий в системе атмосфера – гидросфера – литосфера. Успешное изучение взаимодействий невозможно без проведения экспериментальных исследований в каждой из геосфер и последующего сопоставления полученных данных. В последнее время основными измерительными приборами являются сейсмометры, микробарографы, волнографы, волновые радары и т. п. Сейсмометры позволяют регистрировать смещение грунта [1], микробарографы – вариации атмосферного давления [2], а волнографы и волновые радары измеряют различные характеристики морского волнения [3, 4]. Сопоставление полученных экспериментальных данных позволяет выявить новые закономерности взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы в различных диапазонах частот.

В настоящей работе исследуются микросейсмические колебания, регистрируемые специальным измерительным комплексом, установленным на береговых скалах Японского моря на м. Шульца, где расположен один из полигонов Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН [5]. Для этого применяется высокоточная аппаратура, позволяющая регистрировать в широком диапазоне частот не только микросейсмы, вызванные сильными природными событиями – тайфунами [6], землетрясениями [7], атмосферными фронтами [8], – но и фоновые колебания, обусловленные, например, регулярным ветровым волнением [9].

Изучение фоновых колебаний позволяет фиксировать микросейсмическую активность с предельно низкими амплитудами и проводить детальный анализ динамических характеристик зарегистрированных микросейсмических сигналов.

Высокоточная аппаратура состоит из созданных на основе современных лазерно-интерференционных методов лазерных деформографов [10]. В настоящем исследовании использованы данные двух лазерных деформографов, описанных ниже. Они установлены вдали от населенных пунктов и транспортных потоков и регистрируют процессы, происходящие на стыке вода – суша с учетом атмосферных явлений. Исследованию статистических характеристик фонового сигнала, регистрируемого деформографами, посвящена настоящая работа.

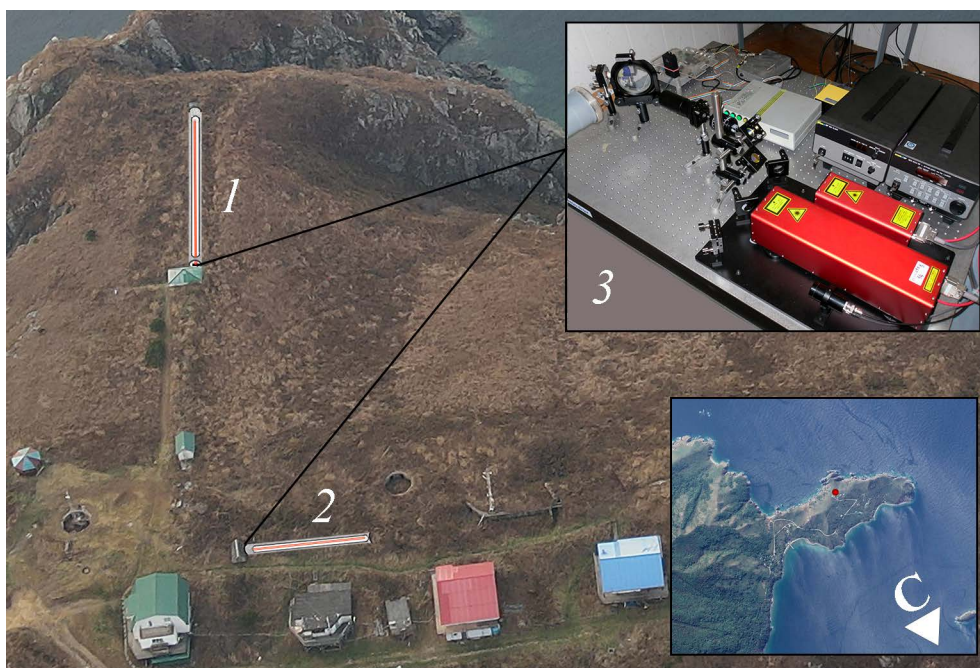
Нас интересовал диапазон частот 0,05–0,5 Гц (периоды 2–20 с), который соответствует микросейсам, возбуждаемым морскими волнами (ветровые волны и зыбь). Эти колебания практически всегда возникают на записях, поскольку морские волны регулярно разбиваются внизу у подножия скал и генерируют таким образом соответствующие микросейсмы. Указанный диапазон частот характеризуется высокой энергетической насыщенностью и чувствителен к изменениям в гидросфере [11, 12]. Кроме того, в этот диапазон попадают частоты, соответствующие колебаниям атмосферного давления (тайфуны, грозовые фронты) и антропогенным факторам (движение машин, кораблей или людей). Эти колебания нерегулярны и не слишком интенсивны, но тем не менее они также присутствуют в записях.

Выделение интересующих сигналов невозможно без определения шумовых характеристик микросейсм [13–15]. Последние исследования в данной области направлены на анализ частотных спектров и величины энергии, передающейся из океана в земную кору [16, 17]. При этом статистические характеристики фонового шума (вероятностные распределения и статистические моменты) до сих пор остаются неизученными. Эти характеристики крайне важны для оптимального выделения полезных сигналов, так как позволяют минимизировать искажения и улучшить точность анализа.

Целью данной работы является изучение статистических характеристик шумового поля микросейсм, зарегистрированных с помощью двух деформографов, и оценки отклонений данных от нормального распределения. Изучение шумового поля проводится на основе экспериментальных данных, полученных с высокой точностью в относительно спокойных погодных условиях. Впервые проведен анализ асимметрии и эксцесса для сигналов двух ортогонально ориентированных компонент.

Измерительная аппаратура

Натурные данные получены с помощью двух лазерных деформографов, установленных на морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» на юге Приморского края.



Р и с. 1. Место расположения лазерных деформографов. На рисунке изображены компоненты Север – Юг (1) и Запад – Восток (2), а также оптическая часть лазерного деформографа (3)

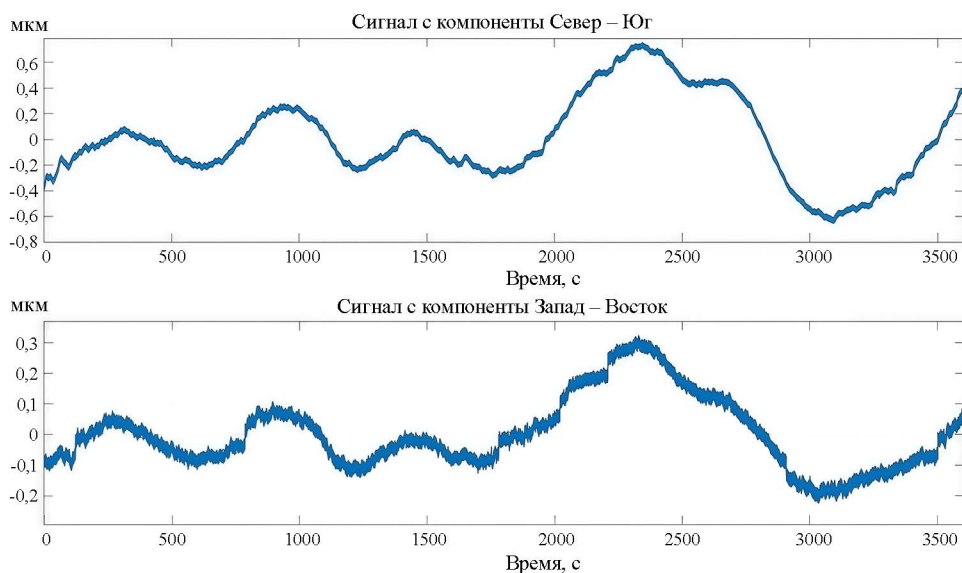
F i g. 1. Location of laser strainmeters. The north – south (1) and west – east (2) components, as well as the optical part of laser strainmeter (3) are shown

Они созданы на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона [18] с применением в качестве источника света частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера с долговременной стабильностью 10^{-10} – 10^{-11} , что позволяет регистрировать вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры в частотном диапазоне 0 Гц (условно) – 10 кГц с точностью 52,5 нм. Лазерные деформографы расположены на берегу Японского моря под углом 92° друг к другу (рис. 1) в подземных термоизолированных помещениях с ориентацией на север – юг и запад – восток с длинами измерительных плеч 52,5 и 17,5 м соответственно. В каждый момент времени оба интерферометра выдают две проекции сигнала. Сигналы с приборов после предварительной обработки формируются в часовые файлы с частотой дискретизации 1000 Гц.

Для выбора участков записей приборов с «максимально» фоновыми колебаниями использовались данные лазерного нанобарографа [19], метеостанции и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы [20]. Выбирались данные, когда на записях приборов амплитуды колебаний и волн в диапазоне частот 0,05–0,5 Гц были минимальными. Эти данные позволяют проводить комплексный анализ сейсмических фоновых полей в прибрежной зоне.

Анализ данных

Нами были выбраны для обработки 16 фрагментов фоновой записи в обеих проекциях в относительно спокойную погоду, без особенно сильных выбросов, длиной 1 ч. Записи сделаны в 2019 и 2020 гг. Характеристики фрагментов приведены ниже в табл. 1, где указаны дата и начало записи. Один из образцов часовой записи двумя интерферометрами показан на рис. 2. В принципе уже на глаз видна хорошая корреляция между ними. Некоторые различия между внешним видом сигналов обусловлены разными длинами плеч интерферометров.



Р и с. 2. Пример часовой записи сигнала, полученного с двух деформографов. По вертикали отложены вариации микродеформаций земной коры (мкм)

Fig. 2. Example of an hour-long record of the signal received from two strainmeters. The vertical axis shows variations in microdeformations of the Earth's crust (μm)

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Данные обработки для компоненты Север – Юг
Processing data for the north – south component

Номер файла / File number	Начало записи (1 ч), UTC / Start of record (1 hr), UTC	Дата начала записи / Date of record start	Средняя скорость ветра, м/с / Average wind speed, m/s	$\sigma(\text{СЮ})$, мкм / $\sigma(\text{NS})$, μm	$Sk(\text{СЮ})$ / $Sk(\text{NS})$	$Ku(\text{СЮ})$ / $Ku(\text{NS})$	Pe Гаусса (СЮ), % / Pe of Gauss (NS), %	Pe Грама – Шарлье (СЮ), % / Pe of Gram – Charlier (NS), %
1	16:34:11	07.06.2019	1,7	0,00006	0,074	2,10	97,3	98,1
2	16:14:12	25.06.2019	8,4	0,00021	-0,029	0,72	98,6	98,7
3	16:09:22	12.07.2019	1,1	0,00007	0,007	0,50	99,1	99,2
4	20:09:23	12.07.2019	1,7	0,00008	0,047	-0,22	99,1	99,3
5	23:09:24	12.07.2019	4,4	0,00013	-0,004	0,55	98,7	99,3
6	16:09:30	13.07.2019	5,1	0,00013	-0,068	2,65	97,2	96,3
7	16:09:39	14.07.2019	4,5	0,00008	-0,091	0,43	98,8	99,2
8	13:09:46	15.07.2019	3,2	0,00024	-0,051	1,14	97,9	99,1
9	16:10:04	17.07.2019	7,1	0,00013	0,097	0,39	98,7	99,3
10	16:37:29	20.07.2019	9,2	0,00044	0,118	2,30	87,5	97,5
11	16:56:39	24.07.2019	2,4	0,00007	-0,060	1,21	99,1	98,3
12	06:10:06	02.08.2019	5,5	0,00025	0,055	0,82	97,9	99,1
13	16:11:02	07.08.2019	8,5	0,00108	0,112	1,47	97,2	98,9
14	16:11:39	11.08.2019	4,6	0,00015	0,025	0,66	98,9	99,5
15	16:17:16	08.06.2020	1,5	0,00011	0,100	0,02	99,3	99,4
16	19:49:27	19.09.2020	4,5	0,00010	-0,124	1,74	95,0	99,2

Т а б л и ц а 2
Table 2

Данные обработки для компоненты Запад – Восток
Processing data for the west – east component

Номер файла / File number	Начало записи (1 ч), UTC / Start of record (1 hr), UTC	Дата начала записи / Date of record start	Средняя скорость ветра, м/с / Average wind speed, m/s	$\sigma(3B)$, мкм / $\sigma(WE)$, μm	$Sk(3B) /$ $Sk(WE)$	$Ku(3B) /$ $Ku(WE)$	Pe Гаусса (3B), % / Pe of Gauss (WE), %	Pe Грама – Шарлье (3B), % / Pe of Gram – Charlier (WE), %
1	16:34:11	07.06.2019	1,7	0,00023	0,165	2,77	98,0	95,2
2	16:14:12	25.06.2019	8,4	0,00061	0,159	0,61	98,6	98,7
3	16:09:22	12.07.2019	1,1	0,00018	0,023	1,76	98,3	98,0
4	20:09:23	12.07.2019	1,7	0,00016	0,059	1,23	99,0	98,6
5	23:09:24	12.07.2019	4,4	0,00074	0,200	0,96	97,3	99,4
6	16:09:30	13.07.2019	5,1	0,00065	-0,250	4,76	82,5	92,7
7	16:09:39	14.07.2019	4,5	0,00035	0,051	0,33	99,0	99,1
8	13:09:46	15.07.2019	3,2	0,00126	-0,022	1,42	97,6	98,9
9	16:10:04	17.07.2019	7,1	0,00041	0,111	1,34	98,8	99,
10	16:37:29	20.07.2019	9,2	0,00317	-0,097	0,84	93,9	97,1
11	16:56:39	24.07.2019	2,4	0,00037	-0,017	2,79	97,3	96,1
12	06:10:06	02.08.2019	5,5	0,00124	-0,018	1,08	97,3	99,0
13	16:11:02	07.08.2019	8,5	0,00512	0,071	1,17	98,5	99,1
14	16:11:39	11.08.2019	4,6	0,00151	-0,318	1,56	96,7	98,9
15	16:17:16	08.06.2020	1,5	0,00022	-0,285	0,91	97,9	98,7
16	19:49:27	19.09.2020	4,5	0,00077	0,008	1,30	97,7	99,0

Эти данные подвергались предварительной обработке с использованием пакета *MatLab*. На рис. 3 представлен модуль спектра сигнала, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье и характеризующий распределение спектральных амплитуд:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi \frac{kn}{N}}, \quad (1)$$

где $N = 7200000$.

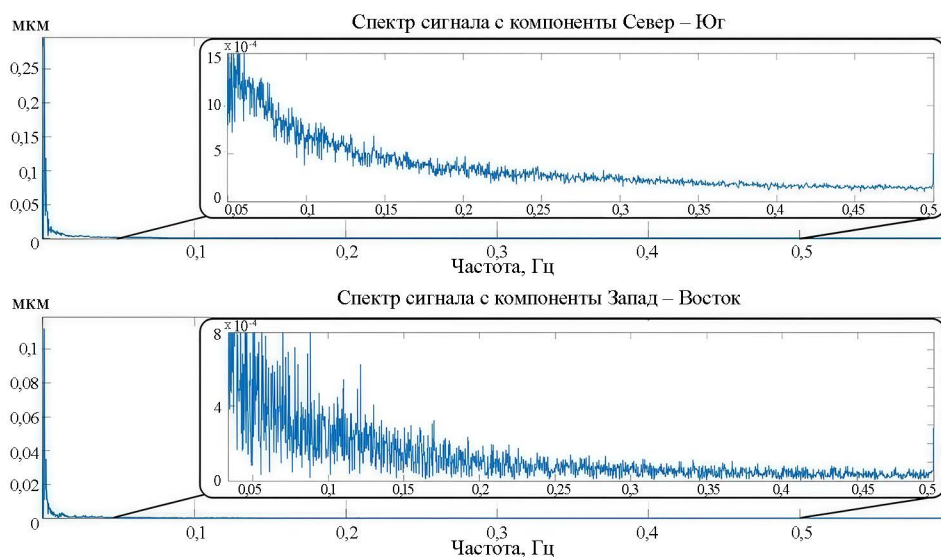
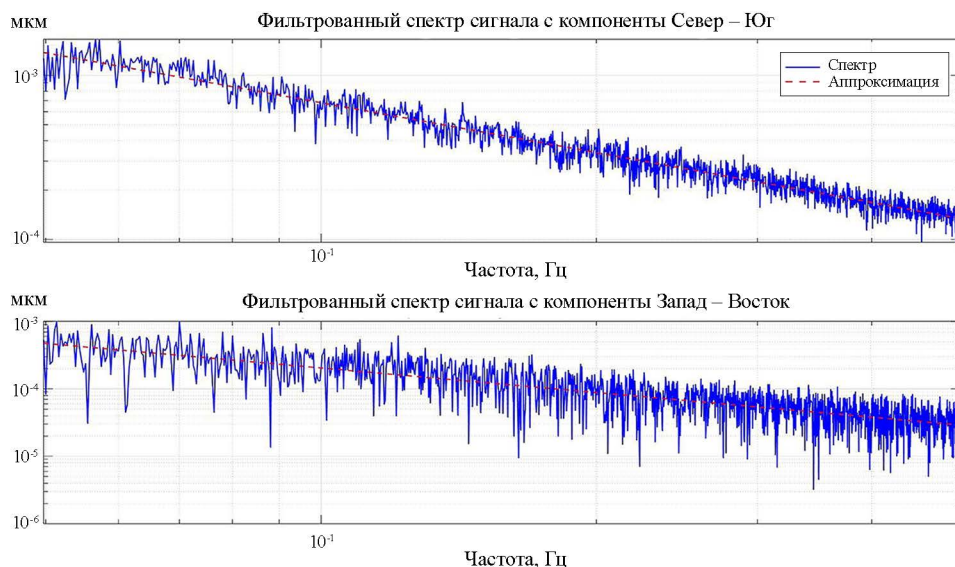


Рис. 3. Спектр сигнала, полученного с двух деформографов (во вкладках показан спектр в увеличенном масштабе в диапазоне 0,05–0,5 Гц). По вертикали отложены вариации микродеформаций земной коры (мкм)

Fig. 3. Spectrum of the signal received from two strainmeters (tabs show the enlarged spectrum in the range 0.05–0.5 Hz). The vertical axis shows variations in microdeformations of the Earth's crust (μm)

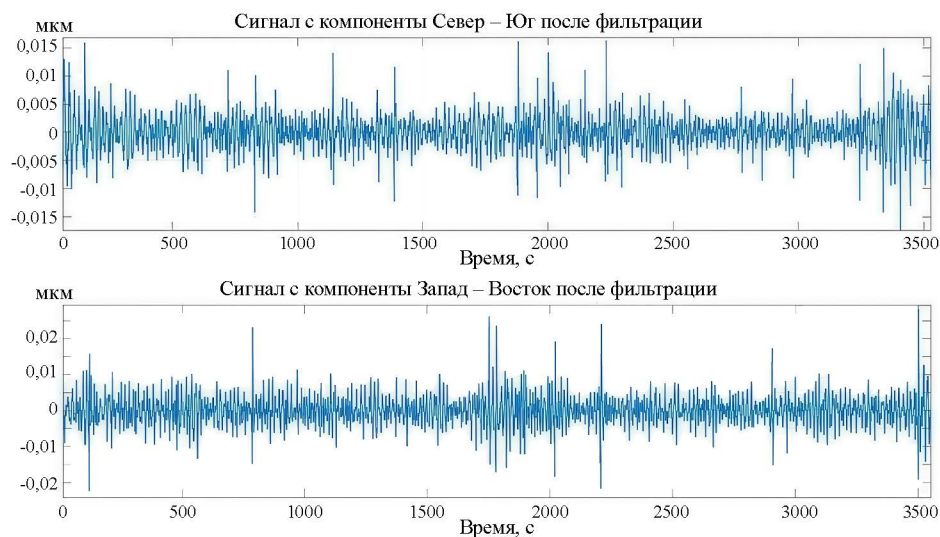
Полученные спектры сигналов использованы для анализа частотного состава шумового поля. Преобразование Фурье позволило разложить сигнал по составляющим частотам и определить в них доминирующие диапазоны. Для исключения высокочастотных шумов и выделения микросейсм, которые в значительной степени обусловлены волновыми воздействиями на берег и морское дно, применен полосовой фильтр. Полоса пропускания фильтра ограничивалась диапазоном 0,05–0,5 Гц, что соответствует периоду 2–20 с, характерному для ветровых волн, зыби, микросейсм. Это позволило сузить спектр анализируемых частот до целевого диапазона, исключая ненужные шумовые высокочастотные составляющие и выделяя полезный сигнал, соответствующий характерным периодам микросейсм. Также для визуализации частотной составляющей был построен спектр сигнала после фильтрации полосовым фильтром в логарифмическом масштабе по обеим координатам (рис. 4) и проведен анализ наклона частотного спектра ω^{-p} . Аппроксимация показала, что для компоненты Север – Юг показатель степени p составил 1, а для компоненты Запад – Восток $p = 1,2$. В энергетическом спектре показатель увеличивается вдвое и $p =$

$\approx 2-2,4$ лежит в диапазоне степеней гидродинамической турбулентности ($5/3$) и ветровых волн на мелководье (3).



Р и с. 4. Спектр сигнала после фильтрации полосовым фильтром в логарифмическом масштабе в диапазоне частот 0,05–0,5 Гц. По вертикали отложены вариации микродеформаций земной коры (мкм)

F i g. 4. Signal spectrum after filtration with a bandpass filter on a logarithmic scale in the frequency range 0.05–0.5 Hz. The vertical axis shows variations in microdeformations of the Earth's crust (μm)



Р и с. 5. Сигнал после фильтрации полосовым фильтром для двух компонент деформографов. По вертикали отложены вариации микродеформаций земной коры (мкм)

F i g. 5. Signal after filtration with a bandpass filter for two components of strainmeters. The vertical axis shows variations in microdeformations of the Earth's crust (μm)

Далее восстановлены сигналы с двух деформографов после фильтрации (рис. 5) с использованием обратного преобразования Фурье:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{i2\pi \frac{kn}{N}}. \quad (2)$$

Фильтрованные сигналы обладают стабильной структурой с хорошо выделяемым шумовым фоном. Эти данные обработаны с использованием статистических методов. В первую очередь для каждого фрагмента в двух проекциях рассчитаны средние значения и среднеквадратические отклонения. Так как оба деформографа имеют разную длину, а величина сигнала пропорциональна длине (расстоянию, проходимому светом), мы провели нормировку сигнала к эффективной длине в один метр [21]. Первые статистические моменты определялись по следующим стандартным формулам математической статистики:

среднее значение

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3)$$

среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4)$$

Вычислены также третий и четвертый моменты:
коэффициент асимметрии

$$Sk = \frac{1}{N \cdot \sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3, \quad (5)$$

коэффициент эксцесса

$$Ku = \frac{1}{N \cdot \sigma^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 - 3. \quad (6)$$

Рассчитанные по приведенным выше данным плотности функции распределения сравнивались с гауссовым распределением:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right)}. \quad (7)$$

На рис. 6–11 показаны рассчитанные гистограммы, сопоставленные с гауссовым распределением. Чтобы оценить отклонения от гауссовой кривой, мы также нанесли на графики для сравнения ряд Грама – Шарлье [22], который обычно используется при относительно малых отклонениях от нормального процесса:

$$f_{GC}(z) = f(z) \left(1 + \frac{Sk}{6}(z^3 - 3z) + \frac{Ku}{24}(z^4 - 6z^2 + 3) \right), \quad (8)$$

где $z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$.

Для оценки точности этих аппроксимаций мы использовали проценты объясненной дисперсии (SSE) [23], в частности сумму квадратов отклонений:

$$SSE = \sum_{i=1}^N \left(y_{\text{гистограмма}}(x_i) - y_{\text{модель}}(x_i) \right)^2. \quad (9)$$

Здесь $y_{\text{гистограмма}}(x_i)$ – значения плотности вероятности, полученные из экспериментальных данных. Эти значения представляют собой плотность вероятности, вычисленную по нормированным данным и разложенную по интервалам; $y_{\text{модель}}(x_i)$ – значения, предсказанные теоретической формулой (распределением Гаусса или рядом Грама – Шарлье) для каждого значения. Сумма квадратов отклонений частот гистограммы имеет вид

$$Total\ Variance = \sum_{i=1}^N \left(y_{\text{гистограмма}}(x_i) - \bar{y} \right)^2. \quad (10)$$

По формулам (9) и (10) можно вычислить процент объясненной дисперсии Pe :

$$Pe = \left(1 - \frac{SSE}{Total\ Variance} \right) \cdot 100. \quad (11)$$

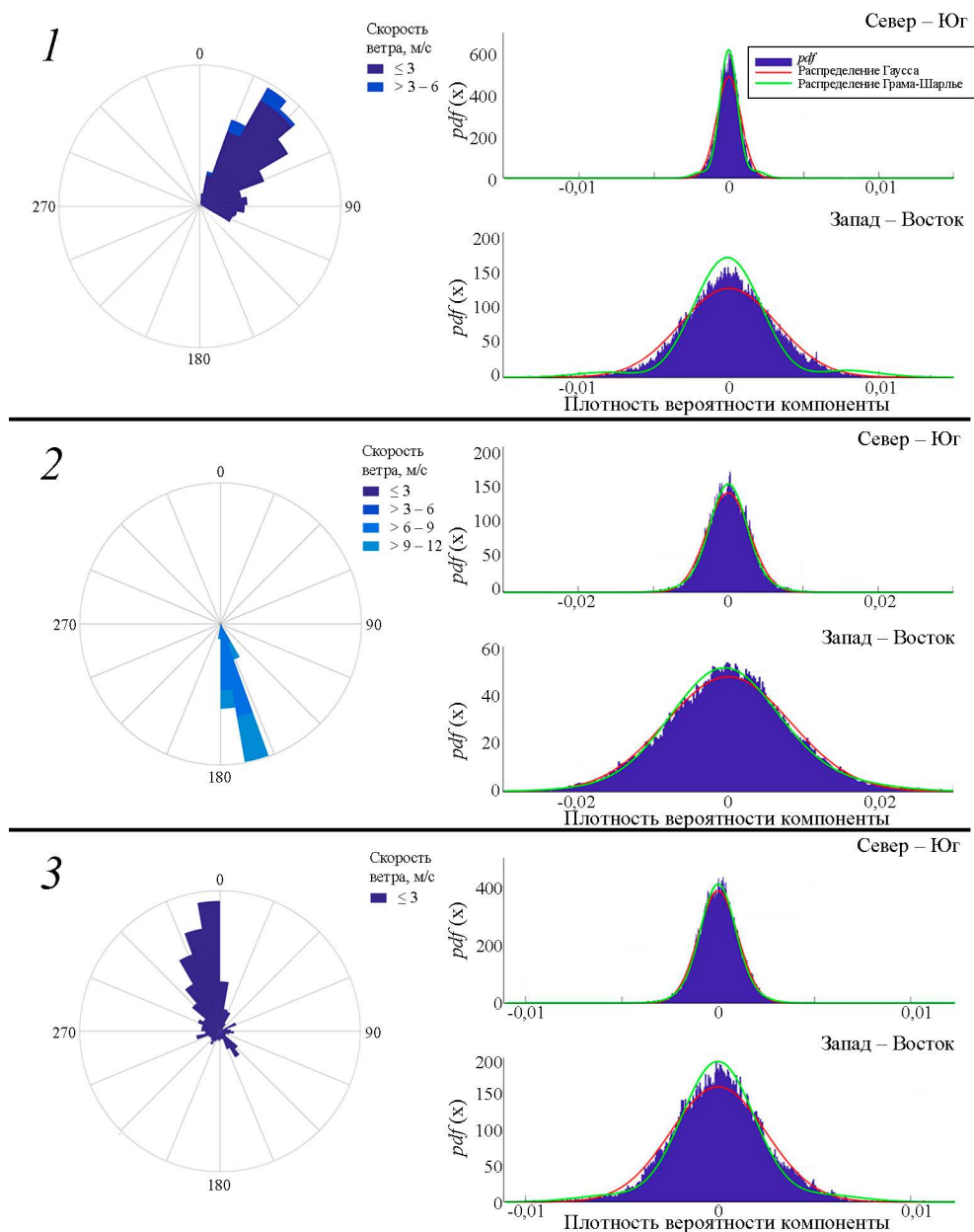
Также учитывались значения средней скорости ветра, полученные в период записи двух деформографов. Все эти данные приведены в табл. 1 для компоненты Север – Юг и в табл. 2 – для компоненты Запад – Восток.

На рис. 6–11 представлены гистограммы распределения сигнала, измеренного деформографами, ориентированными в направлениях компонент Север – Юг и Запад – Восток (см. фрагменты в табл. 1 и 2). На рисунках также изображены розы ветров в период записи деформографов. Гистограммы показаны синими столбцами, красная кривая представляет нормальное (гауссово) распределение, зеленая кривая – распределение Грама – Шарлье. Очевидно, распределение Грама – Шарлье описывает реальные распределения лучше, чем гауссова кривая.

Таким образом, проведенный анализ показал, что фоновый сигнал в частотном диапазоне 0,05–0,5 Гц обладает характеристиками, близкими к нормальному процессу. Отклонения от нормальности могут быть количественно оценены с использованием поправочных слагаемых в ряде Грама – Шарлье.

Анализ 16 записей показал, что для компоненты Север – Юг в 9 случаях наблюдается положительная асимметрия ($Sk > 0$) и в 7 случаях – отрицательная ($Sk < 0$), а для компоненты Запад – Восток в 8 случаях наблюдается положительная асимметрия и также в 8 случаях – отрицательная. Экссесс Ku в обеих компонентах преимущественно положительный, только одно значение эксцесса для компоненты Север – Юг является отрицательным. Как известно, положительные значения эксцесса указывают на повышенную вероятность возникновения выбросов большой амплитуды, которые теперь связывают

с волнами-убийцами [24]. Для их анализа, однако, требуются существенно бóльшие длины записей.



Р и с. 6. Плотность вероятности нормированных значений сигнала с двух деформографов, ориентированных в направлениях компонент Север – Юг и Запад – Восток: 1 – 07.06.2019 в период времени 16:34:11–17:34:11; 2 – 25.06.2019 в период времени 16:14:12–17:14:12; 3 – 12.07.2019 в период времени 16:09:22–17:09:22

F i g. 6. Probability density of the normalized signal values from two strainmeters oriented in the north – south and west – east directions. 1 – 06.07.2019 during the time period from 16:34:11 to 17:34:11, 2 – 06.25.2019 – from 16:14:12 to 17:14:12, and 3 – 07.12.2019 – from 16:09:22 to 17:09:22

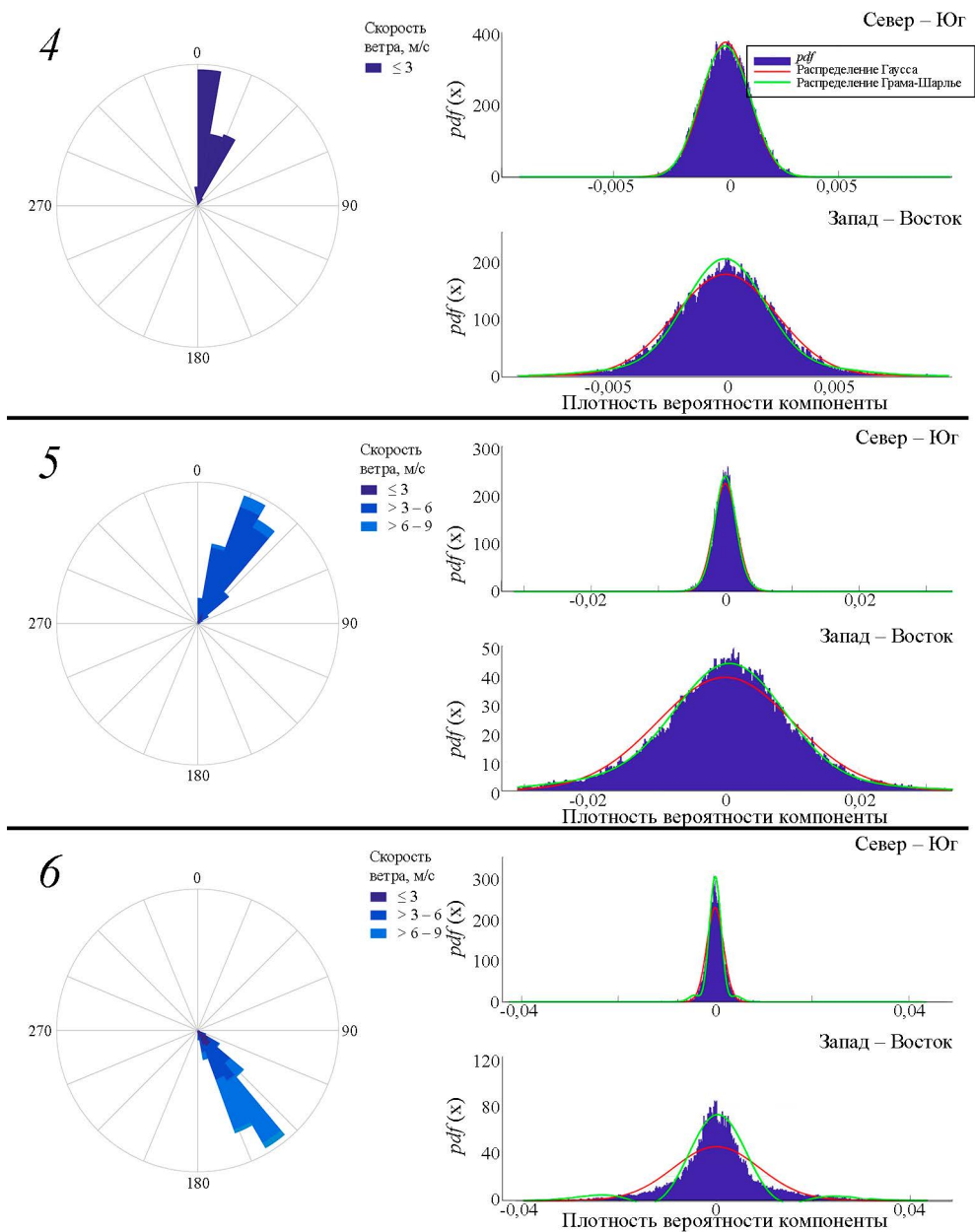


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для других дат: 4 – 12.07.2019 в период времени 20:09:23–21:09:23; 5 – 12.07.2019 в период времени 23:09:24–00:09:24; 6 – 13.07.2019 в период времени 16:09:30–17:09:30

Fig. 7. The same as in Fig. 6, for other dates: 4 – 12.07.2019 during the time period from 20:09:23 to 21:09:23, 5 – 12.07.2019 – from 23:09:24 to 00:09:24, and 6 – 13.07.2019 – from 16:09:30 to 17:09:30

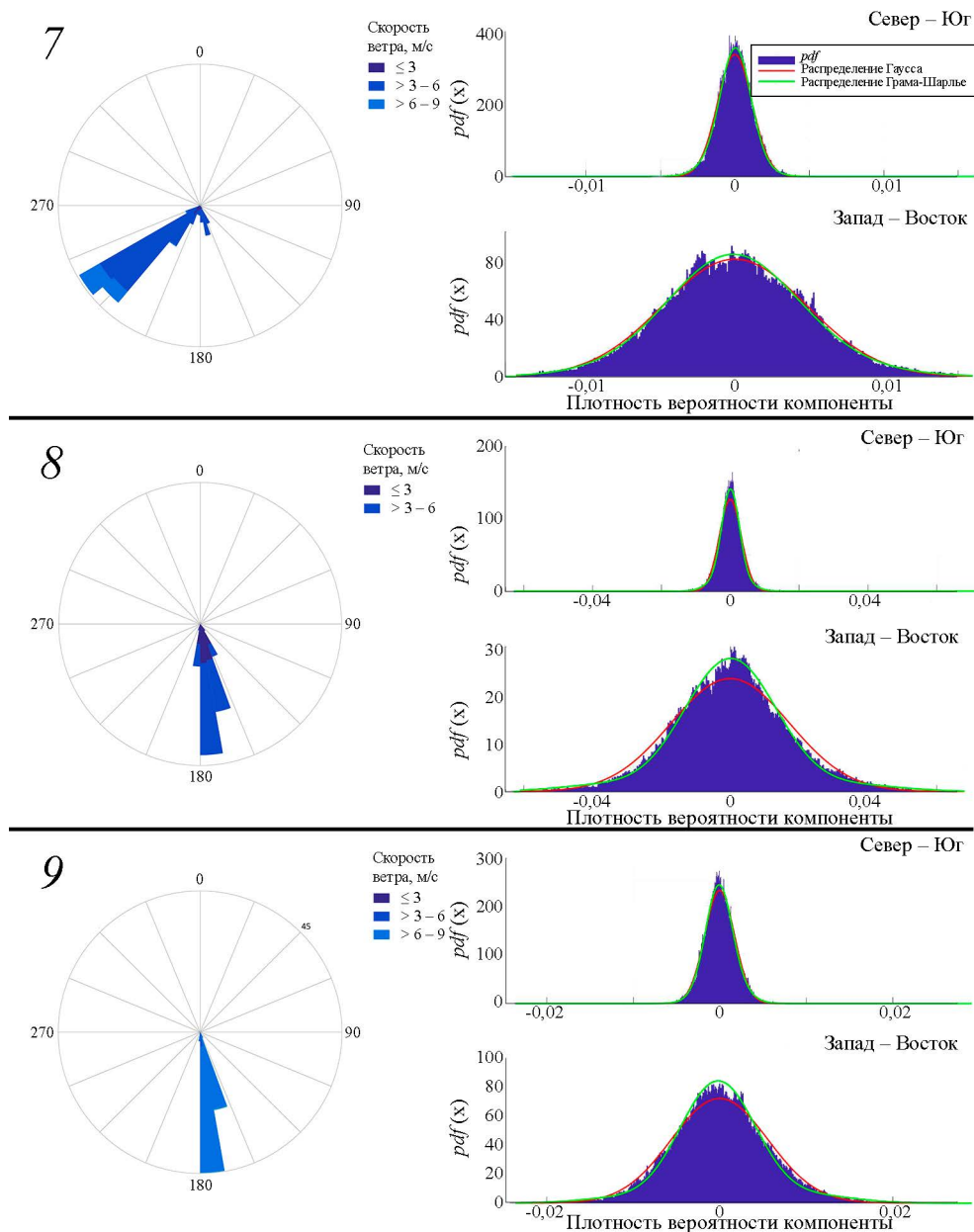


Рис. 8. То же, что на рис. 6, для других дат: 7 – 14.07.2019 в период времени 16:09:39–17:09:39; 8 – 15.07.2019 в период времени 13:09:46–14:09:46; 9 – 17.07.2019 в период времени 16:10:04–17:10:04

Fig. 8. The same as in Fig. 6, for other dates: 7 – 07.14.2019 during the time period from 16:09:39 to 17:09:39, 8 – 07.15.2019 – from 13:09:46 to 14:09:46, and 9 – 07.17.2019 – from 16:10:04 to 17:10:04

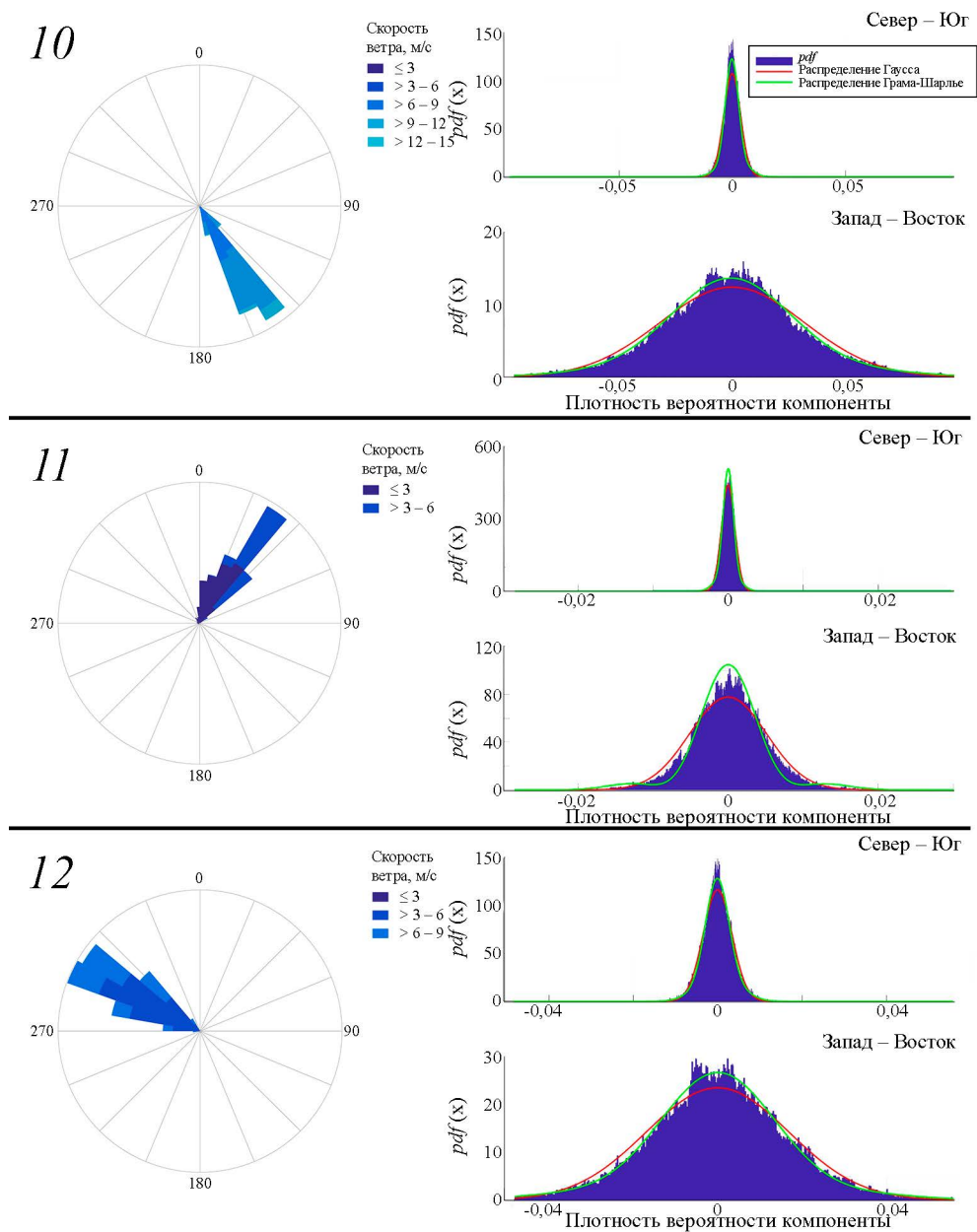
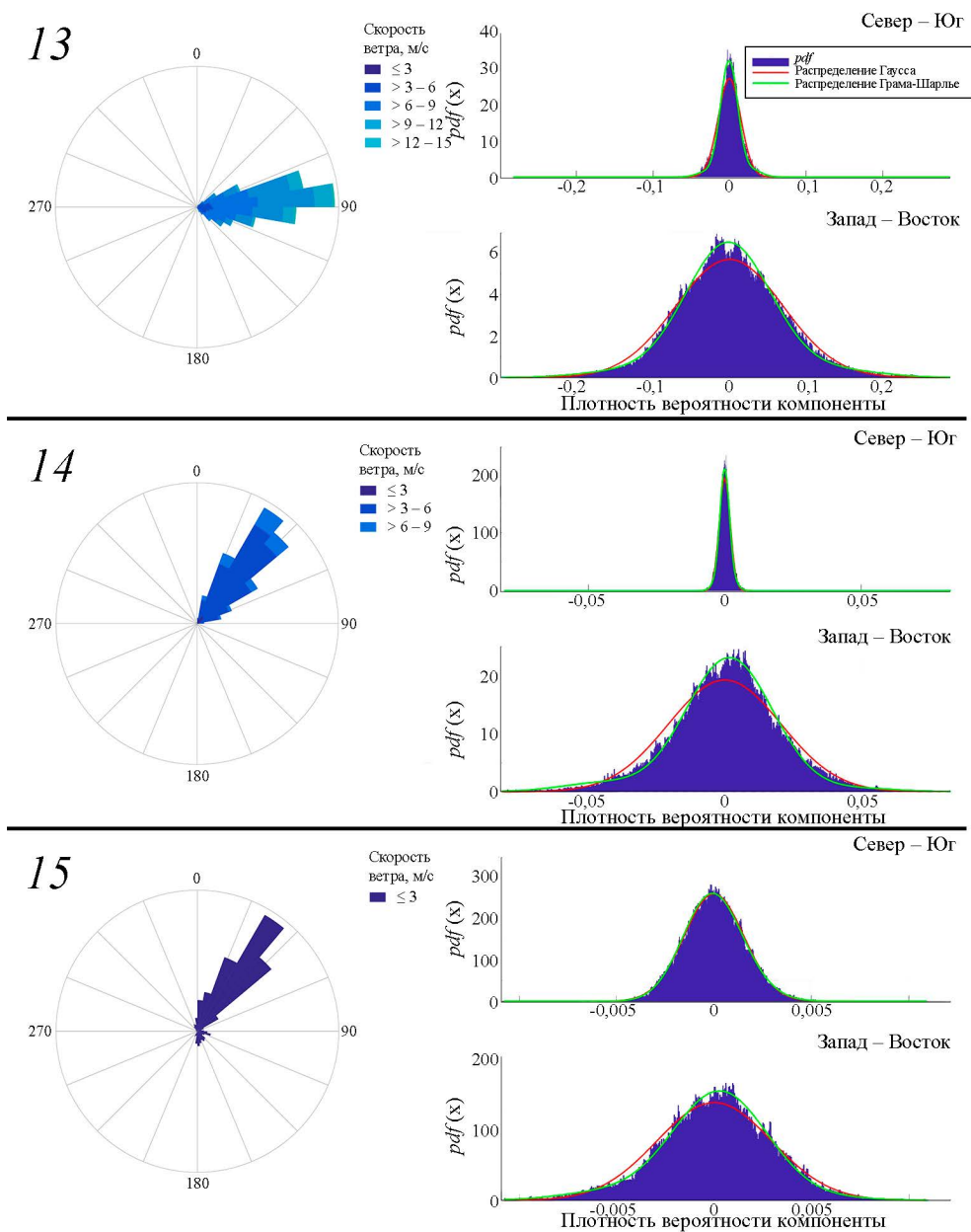


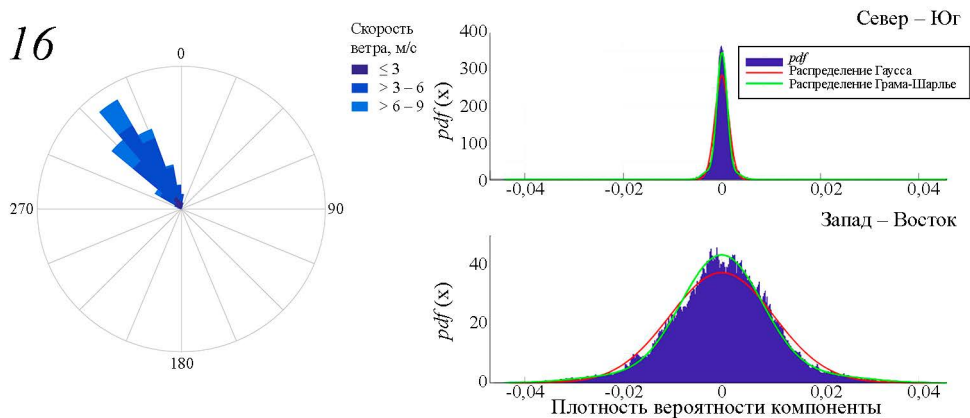
Рис. 9. То же, что на рис. 6, для других дат: 10 – 20.07.2019 в период времени 16:37:29–17:37:29; 11 – 24.07.2019 с в период времени 16:56:39–17:56:39; 12 – 02.08.2019 в период времени 06:10:06–07:10:06

Fig. 9. The same as in Fig. 6, for other dates: 10 – 07.20.2019 during the time period from 16:37:29 to 17:37:29, 11 – 07.24.2019 – from 16:56:39 to 17:56:39, and 12 – 08.02.2019 from 06:10:06 to 07:10:06



Р и с. 10. То же, что на рис. 6, для других дат: 13 – 07.08.2019 в период времени 16:11:02–17:11:02; 14 – 11.08.2019 в период времени 16:11:39–17:11:39; 15 – 08.06.2020 в период времени 16:17:16–17:17:16

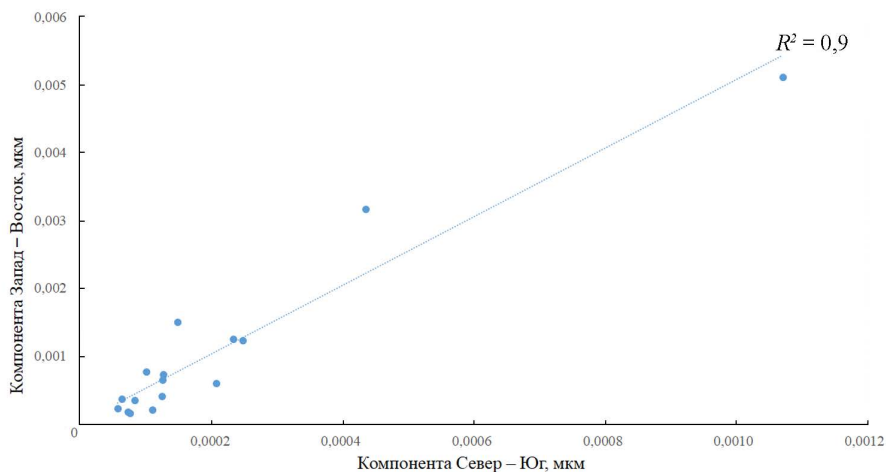
F i g. 10. The same as in Fig. 6, for other dates: 13 – 07.08.2019 during the time period from 16:11:02 to 17:11:02, 14 – 11.08.2019 – from 16:11:39 to 17:11:39, and 15 – 08.06.2020 – from 16:17:16 to 17:17:16



Р и с. 11. То же, что на рис. 6, для другой даты: 16 – 19.09.2020 в период времени 19:49:27–20:49:27

Fig. 11. The same as in Fig. 6, for another date: 16 – 09.19.2020 during the time period from 19:49:27 to 20:49:27

С использованием полученных данных был проведен анализ связей между компонентами. На рис. 12 показан график корреляции среднеквадратического отклонения для двух компонент интерферометров Север – Юг и Запад – Восток, на котором представлен линейный тренд, а также вычислен коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , равный 0,9. Данная связь, вероятно, объясняется проявлением общих физических процессов, таких как ветровые нагрузки, динамика морских волн, атмосферные возмущения и приливные явления, которые одновременно влияют на обе компоненты.

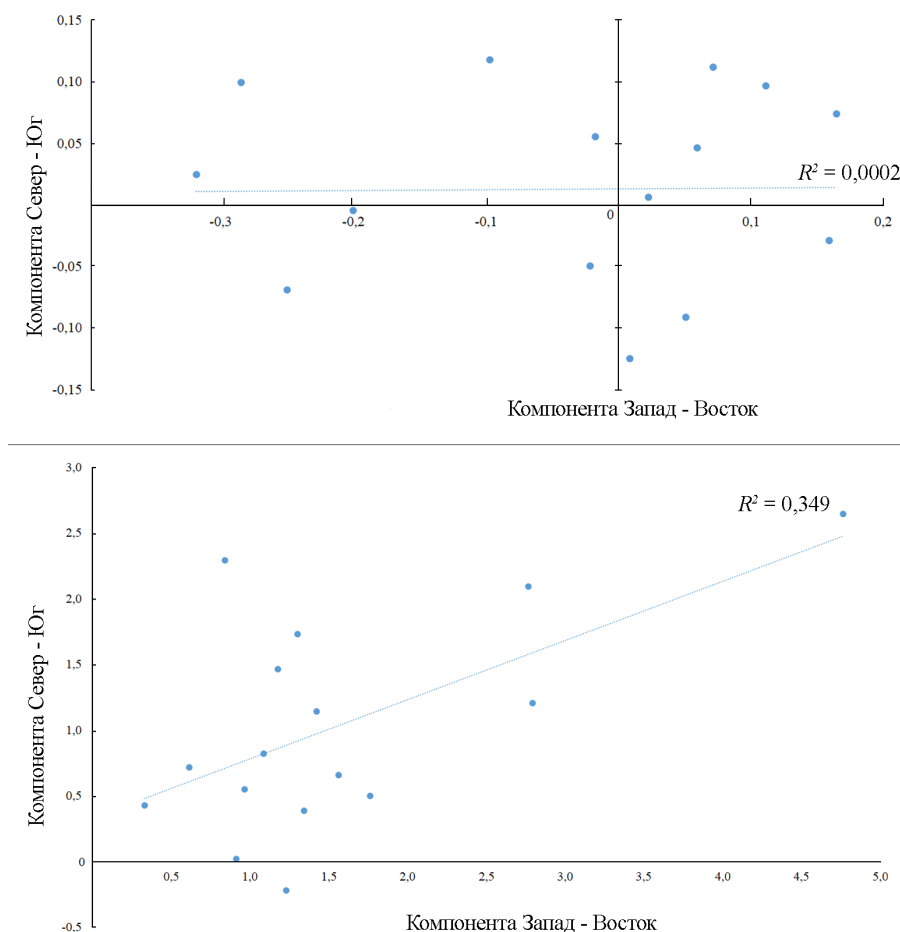


Р и с. 12. Корреляция среднеквадратического отклонения компоненты Запад – Восток от компоненты Север – Юг

Fig. 12. Correlation graph of standard deviation of the west – east component from the north – south one

Также был построен график корреляции коэффициента асимметрии и эксцесса (рис. 13) для двух компонент деформографов и вычислен коэффициент

детерминации: для асимметрии он составляет 0,0002, для эксцесса 0,35. Судя по фрагментам рис. 13, связь между этими компонентами практически отсутствует, так что, скорее всего, они более чувствительны к особенностям внешних воздействий.



Р и с. 13. Корреляция асимметрии (вверху) и эксцесса (внизу) для компонент Север – Юг и Запад – Восток

F i g. 13. Correlation graph of skewness (top) and kurtosis (bottom) for the west – east and north – south components

Заклучение

Впервые проведен подробный статистический анализ фонового поля, зарегистрированного лазерными деформографами на м. Шульца в Японском море в период 2019–2020 гг. Статистическая обработка сигнала проводилась после частотной фильтрации полосовым фильтром 0,05–0,5 Гц и последующего восстановления сигнала, при этом убирался тренд и высокочастотные компоненты. Для фрагментов записей (всего 16) строились соответствующие

гистограммы сигнала. Получено, что в общем распределение близко к нормальному, но все же лучше описывается распределением Грама – Шарлье. Анализ 16 записей показал, что для компоненты Север – Юг в 9 случаях наблюдается положительная асимметрия и в 7 случаях — отрицательная, а для компоненты Запад – Восток в 8 случаях наблюдается положительная асимметрия и также в 8 – отрицательная. Экссесс в обеих компонентах преимущественно положительный. Только одно значение эксцесса для компоненты Север – Юг является отрицательным.

Проведенное исследование дает характеристики фонового шума, необходимые для последующего процесса выделения на этом фоне полезных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геофизический полигон «Мыс Шульца» / Г. И. Долгих [и др.] // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5. С. 165–169.
2. Виноградов А. Н., Виноградов Ю. А., Маловичко А. А. Применение сейсмоинфразвукового метода мониторинга природной среды для контроля геодинамического режима в зонах активного освоения недр Карского шельфа и Ямала // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. Т. 4, № 19. С. 22–31.
3. Ковалев Д. П., Ковалев П. Д. Волны цунами у юго-восточного побережья о. Сахалин, вызванные извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай 15 января 2022 года по наблюдениям донными волнографами // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2024. Т. 79, № 3. 2430901.
4. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III / N. Tilinina [et al.] // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14, iss. 8. P. 3615–3633. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3615-2022>
5. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «атмосфера – гидросфера – литосфера» / Г. И. Долгих [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 3. С. 120–122.
6. Remote Seismoacoustic Monitoring of Tropical Cyclones in the Sea of Japan / G. Dolgikh [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 6. 1707. <https://doi.org/10.3390/rs15061707>
7. Dolgikh G., Dolgikh S. Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, iss. 10. 1144. <https://doi.org/10.3390/jmse9101144>
8. Долгих Г. И., Долгих С. Г. Учет воздействия атмосферного давления на деформацию земной коры // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 2. С. 168–172. EDN KNPVPJ. <https://doi.org/10.31857/S2686739721100091>
9. Долгих Г. И., Будрин С. С., Долгих С. Г. Преобразования вариаций придонного давления, создаваемого морскими инфрагравитационными волнами, в смещения верхнего слоя земной коры. Количественная оценка // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 516, № 1. С. 433–439. <https://doi.org/10.31857/S2686739724050147>
10. Долгих Г. И. Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами. Владивосток : Дальнаука, 2000. 160 с. EDN VPMBB.
11. Observation of deep water microseisms in the North Atlantic Ocean using tide modulations / E. Beucler [et al.] // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42, iss. 2. P. 316–322. <https://doi.org/10.1002/2014GL062347>
12. Le Pape F., Craig D., Bean C. J. How deep ocean-land coupling controls the generation of secondary microseism Love waves // Nature Communications. 2021. Vol. 12. 2332. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22591-5>
13. Tanimoto T., Anderson A. Seismic noise between 0.003 Hz and 1.0 Hz and its classification // Progress in Earth and Planetary Science. 2023. Vol. 10. 56. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00587-7>

14. Ocean wave sources of seismic noise / F. Ardhuin [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. Vol. 116, iss. C9. C09004. <https://doi.org/10.1029/2011JC006952>
15. *Moni A., Craig D., Bean C. J.* Separation and location of microseism sources // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, iss. 12. P. 3118–3122. <https://doi.org/10.1002/grl.50566>
16. *Anthony R. E., Aster R. C., McGrath D.* Links between atmosphere, ocean, and cryosphere from two decades of microseism observations on the Antarctic Peninsula // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2017. Vol. 122, iss. 1. P. 153–166. <https://doi.org/10.1002/2016JF004098>
17. Multi-instrument observations of microseisms generated by typhoon Kalmaegi (2014) over the Northwestern Pacific / J. Lin [et al.] // Earth and Planetary Science Letters. 2022. Vol. 594. 117746. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117746>
18. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентации в геофизических исследованиях переходных зон / Г. И. Долгих [и др.] // Физика Земли. 2002. № 8. С. 69–73. EDN PKAOJB.
19. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия / Г. И. Долгих [и др.] // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90. EDN OXKCPP.
20. Долгих С. Г., Бурин С. С., Плотников А. А. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации температурного воздействия // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 663–666. <https://doi.org/10.7868/S0030157417040153>
21. Долгих Г. И., Привалов В. Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток : ООО «Рея», 2016. 352 с. EDN YGMWEB.
22. Сайфуллин Р. Т., Бочкарев А. В. Вычисление коэффициентов асимметрии и эксцесса хро-матографических пиков с применением функций Чебышева – Эрмита и рядов Грама –Шарлье // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2020. Т. 28, № 4. С. 89–105.
23. *Montgomery D. C., Runger C. G.* Applied Statistics and Probability for Engineers. United States of America : John Wiley & Sons Inc., 2010. 784 p.
24. Слюняев А. В., Пелиновский Д. Е., Пелиновский Е. Н. Морские волны-убийцы: наблюдения, физика и математика // Успехи физических наук. 2023. Т. 193, № 2. С. 155–181. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039038>

Об авторах:

Долгих Григорий Иванович, доктор физико-математических наук, академик РАН, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), профессор, **ORCID ID: 0000-0002-2806-3834**, **Scopus Author ID: 7003888822**, **SPIN-код: 5241-3375**, dolgikh@poi.dvo.ru

Долгих Станислав Григорьевич, зав. лабораторией нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9828-5929**, **Scopus Author ID: 6604069353**, **SPIN-код: 1836-2541**, sdolgikh@poi.dvo.ru

Иванов Михаил Павлович, старший инженер, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **ORCID ID: 0000-0003-3178-2634**, **Scopus Author ID: 58535534600**, **SPIN-код: 6604-9369**, ivanov.mp@poi.dvo.ru

Пелиновский Ефим Наумович, главный научный сотрудник, ФГБОУВО Федеральный научный центр «Институт прикладной физики РАН» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-5092-0302**, **ResearcherID: I-3670-2013**, **Scopus Author ID: 7004951110**, **SPIN-код: 8949-9088**, pelinovsky@gmail.com

Талипова Татьяна Георгиевна, ведущий научный сотрудник, ФГБОУВО Федеральный научный центр «Институт прикладной физики РАН» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1967-4174**, **ResearcherID: A-1580-2014**, **Scopus Author ID: 7004244713**, **SPIN-код: 4837-6302**, tgatalipova@mail.ru