

УДК 539.3
DOI: 10.7868/S25000640200101

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРИЗНАК НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ GNSS-НАБЛЮДЕНИЙ

© 2020 г. Академик В.А. Бабешко¹,
чл.-корр. РАН В.В. Калинин², В.Л. Шестопалов²

Аннотация. Представлены результаты обработки измерений тектонических движений на четырех постоянно действующих спутниковых геодезических станциях GNSS (Global Navigation Satellite System), расположенных в районе Черноморского побережья России в пределах Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны (Сочи, Адлер, пос. Лесное и пос. Эсто-Садок). Среднее расстояние между станциями составляет 20 км. Приемники всех станций выполняли измерения в период повышенной сейсмической активности в районе Большого Сочи с января 2017 по февраль 2018 г. В процессе суточных фазовых измерений с периодом 30 с для каждой GNSS-станции были получены временные ряды компонент вектора местоположения с точностью 3–6 мм в горизонтальной плоскости и 6–12 мм по вертикали в международной координатной системе ITRF2014. Данные измерений обработаны с помощью пакета программ GAMIT.

Предложен подход к оценке напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе выделения синхронизации результатов измерений компонентов горизонтального положения станций GNSS с указанием частотных полос и временных интервалов, когда наблюдается коллективное поведение станций. В указанном подходе использована оценка эволюции максимального собственного числа спектральной матрицы $\lambda_1(f, \tau)$, выступающая в качестве интегрального критерия напряженности земной коры в исследуемом районе. Частотно-временная зависимость $\lambda_1(f, \tau)$ сопоставлена с сейсмическим режимом, и выделены предвестниковые сигналы синхронизации. Алгоритм обработки и программы построены на основе численно устойчивой процедуры Ломба – Скаргла.

Ключевые слова: деформации земной поверхности, GNSS-наблюдения, предвестники землетрясений.

INTEGRATED INDICATOR OF STRESSED-STRAIN STATE OF THE EARTH'S CRUST FROM GNSS OBSERVATIONS

Academician RAS V.A. Babeshko¹,
Corresponding Member RAS V.V. Kalinchuk², V.L. Shestopalov²

Abstract. The results of tectonic motion measurements at 4 permanent satellite geodynamic stations GNSS (Global Navigation Satellite System) Sochi, Adler, Lesnoye and Esto-Sadok, located in the area of the Black Sea coast of Russia within the Tuapse-Sochi seismoactive zone, are presented. The average distance between stations was 20 km. All the stations receivers performed measurements during the period of increased seismic activity in the Greater Sochi area from January 2017 to February 2018. During daily phase measurements with a period of 30 s for each GNSS station, time series of location vector components were obtained with accuracy of 3–6 mm in the horizontal plane and 6–12 mm vertically in the international coordinate system ITRF2014. GNSS data were processed by the GAMIT software.

¹ Кубанский государственный университет (Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation), Российская Федерация, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: babeshko41@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: kalin@ssc-ras.ru, shestopalov@ssc-ras.ru

An approach is proposed to estimate the stressed-strain state of the Earth's crust on the basis of extraction of synchronisation of measurement results of horizontal position components of GNSS stations with indication of frequency bands and time intervals when collective behavior of the stations is observed. The approach uses an estimate of the evolution of the maximum spectral matrix eigenvalue $\lambda_1(f, \tau)$, as an integral criterion of Earth's crust tension in the investigated area. The frequency-time dependence $\lambda_1(f, \tau)$ is compared to the seismic mode and precursors synchronization signals are extracted. The processing algorithm and the programs are based on a numerically stable Lomb-Scargle procedure.

Keywords: crust deformation, GNSS observation, earthquake precursors.

ВВЕДЕНИЕ

Территория Большого Сочи от Адлера до Туапсе, ограниченная системой Черноморских разломов с юго-запада и Главным Кавказским хребтом с северо-востока, относится к южной продольной зоне новейших альпийских деформаций, тектоническая структура которой сформирована в условиях суб-меридионального сжатия под влиянием северо-восточного дрейфа Аравийской плиты [1]. Магнитуды максимально возможных землетрясений в этом районе составляют, по оценке Института физики Земли РАН [2], от 3–4 у побережья до 6 в районе Красной Поляны. С востока этот регион граничит с сейсмически активными районами Абхазии с возможной максимальной магнитудой 6,6 [2]. Эта территория входит в 8-балльную зону на карте (ОСР-97А) с риском превышения 10 % в течение 50 лет [3].

В последние годы широкое распространение получили геодинамические сети GNSS-станций, выполняющие измерения движений земной коры с целью прогноза землетрясений [4]. В настоящей работе дается описание алгоритма обработки данных многомерных GNSS-измерений на основе оценки спектральной матрицы в скользящем временном окне с дальнейшим анализом главных компонент в частотно-временной области. Измерения выполнялись сетью из четырех постоянно действующих геодинамических станций GNSS в Сочи, Адлере, пос. Лесное и пос. Эсто-Садок в период с января 2017 по февраль 2018 г. За время наблюдений в этом районе было зафиксировано четыре землетрясения магнитудами от 3,3 до 4,5. Среднее расстояние между станциями составляет 20 км. Приемники всех станций выполняли измерения с периодом 30 с, накопленная информация обработана с помощью пакета программ GAMIT [5]. В процессе обработки устранялись различные помехи и шумы (ионосферная рефракция, атмосферные помехи, земные приливы и пр.).

Для каждой GNSS-станции были получены временные ряды компонент вектора местоположения с точностью 3–6 мм в горизонтальной плоскости и 6–12 мм по вертикали.

МЕТОД ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Современное представление о геофизической среде, имеющей блоковую иерархическую структуру, дает возможность поиска новых предвестников сильных землетрясений. Подготовку землетрясения можно рассматривать как процесс накопления сейсмоупругой деформации в отдельных участках земной коры, оконтуривающих определенные области земной поверхности и перемещающихся как целое. Такие области можно назвать блоками консолидации, где характер движения составляющих блоков приобретает согласованный коллективный характер [6]. Закономерность увеличения коллективного поведения или синхронизации геофизических полей в области подготовки землетрясения вытекает из наиболее общих закономерностей поведения систем, приближающихся к бифуркации [7]. Академики Б.Б. Голицин, Г.А. Гамбурцев и другие ученые отмечали возможность «слипания» границ в системе взаимодействующих литосферных плит, при котором устанавливается согласованность во всем объеме системы с последующими подвижками, приводящими к землетрясениям [8; 9]. В.А. Бабешко с соавторами с позиции механики деформируемого твердого тела доказал на основе математического аппарата топологической алгебры возможность сейсмического события на фоне резкого возрастания концентрации напряжений в определенной зоне в системе литосферных плит в виде пластин Кирхгофа, движущихся навстречу до сближения на упругом полупространстве с дальнейшим сочленением их границ по разлому [10].

Консолидация блоков земной коры отражается также в согласованности показаний различных пространственно разнесенных датчиков систе-

мы мониторинга, охватывающих зону подготовки сейсмического удара. На основе этой информации в работе [11] для низкочастотных систем геофизического мониторинга был предложен критерий интегральности, указывающий на повышение напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе анализа главных компонент многоканальной матрицы спектральной мощности в частотно-временной области. Сеть спутниковых геодинамических станций, рассмотренную в настоящей работе, можно отнести к низкочастотным системам геофизического мониторинга, для которых, следуя работе [12], можно сформировать критерий интегральности поведения блоков. На первом этапе определяется многоканальная матрица спектральной плотности мощности $\mathbf{P}_{xx}(f)$ размером $[m \times m]$ в виде [13]:

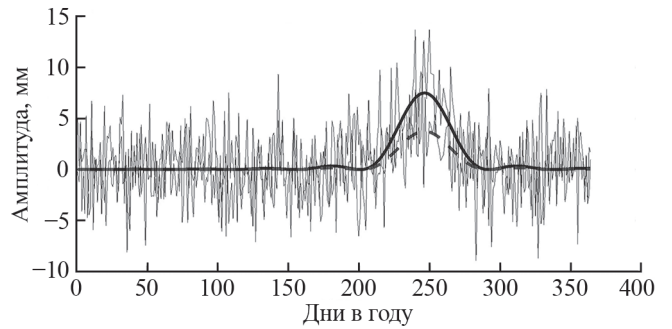
$$\mathbf{P}_{xx}(f) = \begin{bmatrix} P_{11}(f) & P_{12}(f) & \dots & P_{1m}(f) \\ P_{21}(f) & P_{22}(f) & \dots & P_{2m}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1}(f) & P_{m2}(f) & \dots & P_{mm}(f) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где m – число каналов данных, представляющих скалярные временные ряды измеряемых параметров. Диагональные элементы $\mathbf{P}_{xx}(f)$ соответствуют спектральной мощности отдельных каналов, а недиагональные $P_{xy}(f)$ – взаимные спектральные мощности пар каналов. Матрица $\mathbf{P}_{xx}(f)$ обладает свойством эрмитовости и является положительно полуопределенной. Ее собственные числа вещественны и неотрицательны. Обозначим $0 \leq \lambda_m(f) \leq \dots \leq \lambda_2(f) \leq \lambda_1(f)$ – собственные числа матрицы $\mathbf{P}_{xx}(f)$ – и упорядочим их по убыванию. Вычислив собственные числа $\mathbf{P}_{xx}(f)$ в скользящем временном окне, можно оценить эволюцию первого числа $\lambda_1(f)$ в частотно-временной области. Увеличение значения $\lambda_1(f)$ указывает на синхронизацию измеряемых параметров на отдельных станциях, то есть на степень коллективности движения блоков земной коры, в процессе которого накапливается сейсмоупругая энергия деформаций.

Следуя работе [14], представим исходный входной поток данных в виде m -мерного векторного временного ряда $Y^{(i)}$, состоящего из m -скалярных временных рядов, каждый из которых относится к различным измеряемым параметрам движения пространственно разнесенных GNSS-станций:

$$Y^{(i)} = (Y_1^{(i)}, \dots, Y_m^{(i)})^T, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где N – длина каждого m -го ряда наблюдений.



— сигнал 1 ---- сигнал 2 — сигнал 1 + сигнал 2 + шум
Рис. 1. Вариации синтезированного сигнала двух временных рядов с амплитудой вариаций 8 мм и 4 мм и нормально распределенным шумом с нулевым средним и стандартным отклонением 3 мм.

Fig. 1. Variations of the synthesized signal of two time series with an amplitude of variations of 8 mm and 4 mm and normally distributed noise with zero mean and standard deviation of 3 mm.

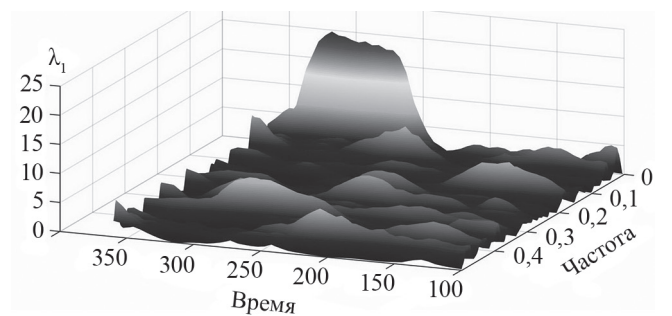


Рис. 2. Эволюция первого собственного числа спектральной матрицы $\lambda_1(f, \tau)$. Время выражено в днях в году, частота в циклах в год.

Fig. 2. The evolution of the first eigenvalue of the spectral matrix $\lambda_1(f, \tau)$. Time is expressed in days in a year, frequency in cycles per year.

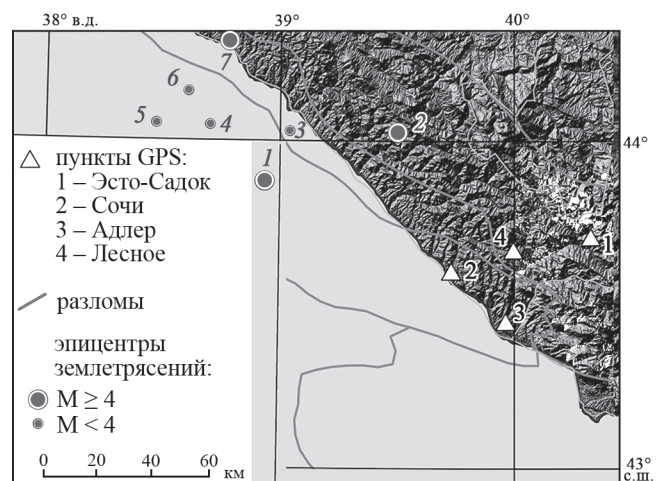


Рис. 3. Сеть GNSS-станций и сейсмичность в районе Большого Сочи в 2017 и 2018 гг. Цифрами обозначены номера землетрясений с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Fig. 3. The network of GNSS stations and seismicity in the Greater Sochi region in 2017 and 2018. The digits represent the numbers of earthquakes with the characteristics given in table 1.

Таблица 1. Характеристики землетрясений в районе Большого Сочи в 2017 и 2018 гг.
Table 1. Characteristics of earthquakes in the Greater Sochi region in 2017 and 2018.

№	Дата Date	Координаты эпицентра Epicenter coordinates		Глубина очага, км Depth focus, km	Магнитуда Magnitude
		Широта Latitude	Долгота Longitude		
1	30.04.2017	43,82 N	38,96 E	10	4,0
2	28.09.2017	44,06 N	39,48 E	10	4,5
3	01.05.2017	44,09 N	39,05 E	10	3,7
4	26.01.2018	44,10 N	38,71 E	10	3,9
5	28.01.2018	44,09 N	38,67 E	10	3,5
6	26.01.2018	44,16 N	38,67 E	10	3,9
7	26.01.2018	44,26 N	38,73 E	10	4,0

Алгоритм вычисления критерия интегральности можно представить следующим образом:

1) Считывается выборка из исходного многомерного ряда $Y^{(i)}$, задаются временное окно длиной L отсчетов и значение смещения соседних окон ΔL , $1 \leq \Delta L \leq L$. Величина ΔL определяет детальность развертки по времени. Если принять за Δt интервал получения данных с каждой станции, то временную координату скользящего окна τ определим из выражения:

$$\tau = \tau_0 + \Delta t(L - 1) + (k - 1)\Delta L, \quad (3)$$

$k = 1, \dots$ – номер временного окна, τ_0 – момент начала наблюдений.

2) Устраняется многолетний тренд наблюдаемого параметра для каждого канала измерений.

3) Для исключения влияния эффекта физической разнородности и разномасштабности скалярные компоненты исходного векторного ряда в выбранном скользящем окне наблюдений нормируют на единичную дисперсию:

$$X_j^{(i)} = \frac{(Y_j^{(i)} - \mu_j)}{\sigma_j}, \quad i = 1, \dots, L; \quad j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где $\mu_j = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L-1} Y_j^{(i)}$, $\sigma_j^2 = \frac{1}{L-2} \sum_{i=1}^{L-1} (Y_j^{(i)} - \mu_j)^2$ – выборочные оценки средних значений и дисперсий по каждой из компонент векторов исходных данных.

4) Производится сглаживание выборок $X_j^{(i)}$ на конечных интервалах окном Уэлча [15].

5) В каждом временном окне формируется многоканальная матрица спектральной мощности $P_{xx}(f)$ (1). Диагональные элементы этой матрицы представляют спектр мощности каждого канала. В случае временного ряда с отсчетами, взятыми в дискретные моменты времени с постоянным

шагом, спектр мощности вычисляется традиционным алгоритмом дискретного преобразования Фурье [16]:

$$P_{xx}(f_n) = \frac{1}{L} \left[\left(\sum_j X_j \cos 2\pi j f_n \right)^2 + \left(\sum_j X_j \sin 2\pi j f_n \right)^2 \right], \quad j = 1, \dots, L, \quad (5)$$

где $f_n = n/T$, T – фундаментальный период, а $n = 1, \dots, L/2$.

Во многих случаях временные ряды GPS содержат многочисленные пробелы измерений, что затрудняет использование алгоритма дискретного преобразования Фурье.

В настоящей работе для таких рядов предлагается вычислять спектр мощности алгоритмом Ломба – Скаргла [16; 17], реализованного в программной среде Matlab процедурой `plomb` [18]:

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{2} \left(\frac{\left[\sum_j X_j \cos 2\pi(t_j - \tau)f \right]^2}{\sum_j \cos^2 2\pi(t_j - \tau)f} + \frac{\left[\sum_j X_j \sin 2\pi(t_j - \tau)f \right]^2}{\sum_j \sin^2 2\pi(t_j - \tau)f} \right), \quad j = 1, \dots, L, \quad (6)$$

$$\tau = (1/2\pi f) \arctg \left[\frac{\sum_{i=1}^N \sin(4\pi t_i f)}{\sum_{i=1}^N \cos(4\pi t_i f)} \right]. \quad (7)$$

Взаимную спектральную мощность $P_{xy}(f)$ можно вычислить, сформировав новый процесс $z[k] = x[k] + y[k]$ из исходных комплексных процессов $x[k]$ и $y[k]$, где k – индекс времени и квадратные скобки обозначают дискретный процесс. Вычислив с помощью (6) и (7) спектры $P_{xx}(f)$, $P_{yy}(f)$ и $P_{zz}(f)$, нетрудно показать, что взаимную спектральную мощность между каналами x и y можно представить в виде [13]:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{P_{xy}(f)\} &= (1/2)[P_{zz}(f) - P_{xx}(f) - P_{yy}(f)], \\ \operatorname{Im}\{P_{xy}(f)\} &= (1/2)[P_{yy}(f) - P_{xx}(f) - P_{zz}(f)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее для недиагональных элементов $\mathbf{P}_{xx}(f)$ из выражения (8) используется действительная часть $\operatorname{Re}\{P_{xy}(f)\}$.

б) Выполняется оценка максимального собственного числа $\lambda_1(f, \tau)$ спектральной матрицы $\mathbf{P}_{xx}(f)$ в скользящем временном окне для момента времени τ , соответствующего правому концу окна. Представив зависимость $\lambda_1(f, \tau)$ в виде линий уровня или объемной поверхности, можно определить моменты времени и частотные полосы, где наблюдается резкий подъем значений $\lambda_1(f, \tau)$, что указывает на увеличение синхронного поведения скалярных компонент исходного многомерного ряда.

Работу предложенного алгоритма можно показать на примере синтезированного сигнала двух временных рядов с шагом дискретизации $\Delta t = 1$ сутки на годовом интервале согласно следующему выражению:

$$\begin{aligned} x(t) &= a_1[(1 - \cos(t - \varphi_1) / t^2)] + \\ &+ a_2[(1 - \cos(t - \varphi_2) / t^2)] + \varepsilon. \end{aligned} \quad (9)$$

Амплитуда вариаций в первом и втором каналах выбиралась $a_1 = 10$ мм и $a_2 = 5$ мм соответственно. К общему сигналу был добавлен нормально распределенный шум ε с нулевым средним и стандартным отклонением 3 мм (рис. 1).

Результат обработки двухканального временного ряда (9) представлен на рисунке 2.

Вычисления выполнялись в скользящем временном окне длиной $L = 100$ отсчетов и смещением $\Delta L = 5$. Максимальное собственное число λ_1 нарастает в диапазоне 200–300 отсчетов, то есть в моменты наибольшей синхронизации процессов. Одним из преимуществ алгоритма Ломба – Скаргла является его устойчивая работа при входных данных, неравномерно распределенных на оси времени, с общим объемом потерь до 30 % [19].

При анализе вариаций $\lambda_1(f, \tau)$ можно выделить следующие причины повышения значений этой величины [12]:

П1. Влияние внешнего источника помех с большим радиусом корреляции.

П2. Консолидация блоков земной коры в области, охваченной сетью станций геофизического мониторинга.

П3. Постсейсмические вариации геофизических полей в сейсмоактивных районах после достаточно сильных землетрясений.

Естественные вариации атмосферного давления (причина П1) являются одной из основных широкополосных сильно пространственно коррелированных помех. Наиболее заметно влияние баровариаций на показания датчиков глубины подземных вод и в других системах геофизического мониторинга [20]. В процессе обработки GNSS-измерений с помощью пакета GAMIT устранялись как приливные, так и неприливные погрешности высоты, вызванные вариациями атмосферного давления на земную кору.

ПРИМЕР ОБРАБОТКИ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ СЕТИ GNSS-СТАНЦИЙ

Метод частотно-временного анализа главных компонент был использован для оценки геодинاميической активности района Большого Сочи в 2017 г. и напряженно-деформированного состояния геологической среды.

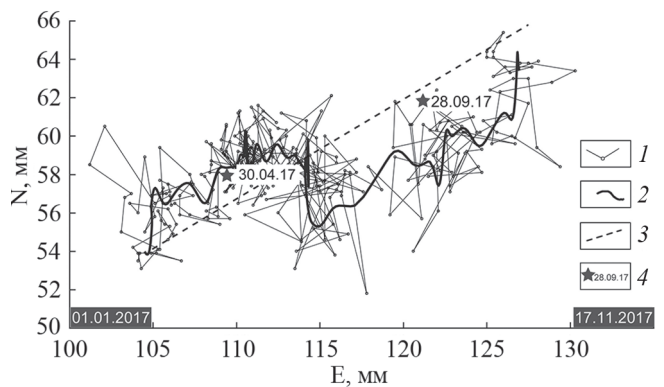


Рис. 4. Движение станции Лесное в горизонтальной плоскости и сейсмичность в 2017 г.: 1–3 – траектория движения: 1 – исходная (посуточная), 2 – сглаженная, 3 – тренд; 4 – дата ближайшего сейсмического события; N, E – смещение в северном и восточном направлениях соответственно; даты на темном фоне указывают начало и конец наблюдений.

Fig. 4. Horizontal movement of the Lesnoye station and seismicity in 2017: 1–3 – trajectory: 1 – initial (daily), 2 – smoothed, 3 – trend; 4 – date of the nearest seismic event; N, E – north and east offset, respectively; dates on a dark background indicate the beginning and the end of observations.

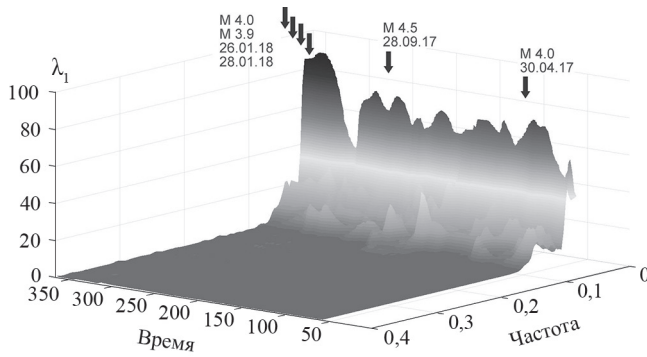


Рис. 5. Эволюция первого собственного числа спектральной матрицы $\lambda_1(f, \tau)$ в районе Большого Сочи в 2017 г. (GNSS-станции Сочи, Адлер, Лесное и Эсто-Садок). Время выражено в днях в году, частота в циклах в год.

Fig. 5. Evolution of the first eigenvalue of the spectral matrix $\lambda_1(f, \tau)$ in the Greater Sochi region in 2017, (GNSS stations Sochi, Adler, Lesnoye and Esto-Sadok). Time is expressed in days in a year, frequency in cycles per year.

Временные ряды компонент вектора местоположения четырех GNSS-станций вычислялись в международной координатной системе ITRF2014, реализация которой осуществлялась опорными станциями ARTU (г. Екатеринбург, Россия), MOBN (г. Обнинск, Московская обл., Россия), GLSV (г. Киев, Украина), JOZ2 (Польша), PENC (Венгрия), WTZR (Германия) и ZECK (станция Зеленчукская, Карачаево-Черкесия, Россия).

Ранее в работе [21] была показана связь геодинимических аномалий движения GNSS-станций с сейсмическим режимом этой области в 2017 г. Сейсмическая обстановка в этот период в районе Большого Сочи показана на рисунке 3.

Исходным входным потоком данных $Y^{(i)}$ (2) являлись суточные измерения компонент горизон-

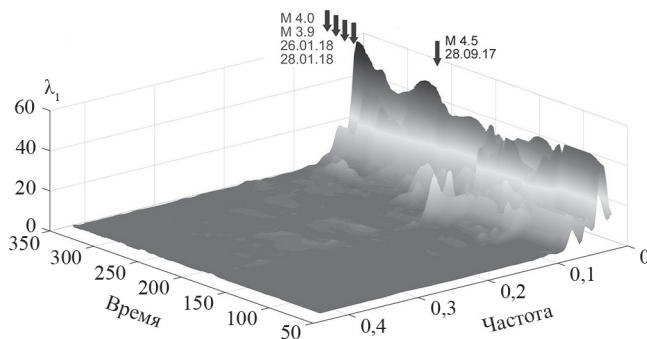


Рис. 6. Эволюция первого собственного числа спектральной матрицы $\lambda_1(f, \tau)$ в районе Большого Сочи в 2017–2018 гг. (GNSS-станции Адлер, Лесное и Эсто-Садок).

Fig. 6. Evolution of the first eigenvalue of the spectral matrix $\lambda_1(f, \tau)$ in the Greater Sochi region in 2017 and 2018, (GNSS stations Sochi, Adler, Lesnoye and Esto-Sadok).

тального местоположения GNSS-станций в течение 2017 г. ($N = 365$).

На основе анализа результатов ранее выполненных работ [22] и опыта зарубежных исследователей [23] измерения высоты не включались в обработку. Каждый из m -скалярных временных рядов содержал измеренные компоненты горизонтального движения по широте и долготе для четырех GNSS-станций – Сочи, Адлер, Лесное и Эсто-Садок ($m = 8$).

Вычисления выполнялись в скользящем временном окне длиной $L = 60$ суток и смещением $\Delta L = 1$ сутки. Входные данные предварительно сглаживались кубическим сплайном процедурой csaps пакета программ Matlab, и к ним применялся алгоритм обработки согласно выражениям (3–7). На рисунке 4 представлена траектория горизонтального движения станции Лесное.

Эволюция первого собственного числа спектральной матрицы $\lambda_1(f, \tau)$ показана на рисунке 5: видны три заметных максимума вариаций $\lambda_1(f, \tau)$ в низкочастотной области. Первый локальный максимум предшествовал сейсмическому событию 30.04.2017 г. в Черном море, в 28 км к юго-востоку от прибрежного пос. Шепси ($M = 4,0$). Следующий максимум совпадает по времени с землетрясением магнитудой 4,5 вблизи пос. Лазаревский 28.09.2017 г. (271-й день в году). Этот момент времени отвечает максимуму синхронизации составляющих горизонтального движения GNSS-станций Сочи, Адлер, Лесное и Эсто-Садок. После спада напряженности в земной коре в октябре – ноябре стал наблюдаться еще более заметный рост согласованного движения GNSS-станций, завершившийся триплетом землетрясений: магнитудами 4,0 и 3,9 на шельфе Черного моря в 22 км к западу от г. Туапсе 26.01.2018 г. и магнитудой 3,5 в том же районе 28.01.2018 (рис. 3). На рисунке 5 эти процессы отразились в максимуме величины $\lambda_1(f, \tau)$ в последние дни 2017 г.

Вычисления были выполнены также для сети из трех станций ($m = 6$): станция Сочи была исключена из-за наличия высокого шума измерений горизонтальных координат (табл. 2).

Эволюция $\lambda_1(f, \tau)$ для сети станций Адлер – Лесное – Эсто-Садок представлена на рисунке 6. Первый локальный максимум совпадает по времени с землетрясением магнитудой 4,5 вблизи пос. Лазаревский 28.09.2017 г. Второй максимум в последние дни 2017 г. соответствует росту сейсмической активности в январе 2018 г. Заметно отсутствие реакции критерия λ_1 на землетрясение в Черном море 30.04.2017 г. Это можно объяснить исключением из

обработки данных прибрежной станции Сочи, более чувствительной к геодинамическим процессам в акватории Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к оценке напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе выделения синхронизации результатов измерений компонентов горизонтального положения станций GNSS с указанием частотных полос и временных интервалов, когда наблюдается коллективное поведение станций. Указанный подход использует спектральные методы многомерной статистики и реализован в виде алгоритма и программы на основе численно устойчивой процедуры Ломба – Скаргла.

Алгоритм оценки эволюции максимального собственного числа спектральной матрицы применялся к многомерным рядам наблюдений четырех и трех станций GNSS в районе Большого Сочи. Частотно-временная зависимость $\lambda_1(f, \tau)$, выступающая в качестве интегрального критерия напряженности земной коры в исследуемом районе, сопоставлена с сейсмическим режимом, и выделены предвестниковые сигналы синхронизации (П2).

Предложенная вычислительная технология оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды может быть рекомендована для определения прогнозных признаков землетрясений в комплексных системах раннего предупреждения сейсмической опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коп М.Л. 1997. *Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе*. М., Научный мир: 314 с.
2. Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А. 1972. Сейсмическая активность и большие землетрясения Кавказа. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1: 35–49.
3. Уломов В.И., Шумилина Л.С. 1999. *Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСП-97. Масштаб 1 : 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах*. М., Объединенный Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта: 57 с.
4. Kaftan V., Melnikov A. 2016. Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data. *Russ. J. Earth Sci.* 16: ES3001. doi: 10.2205/2016ES000568
5. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S. 2018. *GAMIT/GLOBK Reference Manual Release 10.7*. URL: http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf (дата обращения: 05.02.2020).

Таблица 2. Точностные характеристики определения горизонтальных координат GNSS-станций Сочи, Адлер, Лесное и Эсто-Садок

Table 2. The accuracy characteristics of determining the horizontal coordinates of GNSS stations in Sochi, Adler, Lesnoye and Esto-Sadok

Станция Station	Среднеквадратическая ошибка (мм) Root mean square error (mm)	
	Широта Latitude	Долгота Longitude
Эсто-Садок Esto-Sadok	3,9	3,3
Сочи Sochi	6,5	5,7
Адлер Adler	2,9	2,5
Лесное Lesnoye	4,2	3,4

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам АО «Южморгеология» П.И. Курилову, Е.А. Глазырину, В.А. Фоменко, В.В. Куликовой, М.В. Карцевой, Л.Ф. Дмитриенко, А.М. Бородако, А.С. Овчарову, чей труд сделал возможным получение представленных в этой статье результатов измерений. Авторы выражают также благодарность водителям А.В. Заленскому и Р.П. Артёмову за помощь при выполнении полевых работ.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 01201354241.

6. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. 1987. *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс*. М., Наука: 101 с.
7. Nicolis G., Prigogine I. 1989. *Exploring Complexity: An Introduction*. New York: W.H. Freeman & Co. 313 p.
8. Голицын Б.Б. 1960. *Избранные труды. Т. 2: Сейсмология*. М., изд-во АН СССР: 490 с.
9. Гамбурцев Г.А. 1982. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». В кн.: *Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике*. М., Наука: 304–311.
10. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. 2016. К проблеме физико-механического предвестника стартового землетрясения: место, время, интенсивность. *ДАН*. 466(6): 664–669. doi: 10.7868/S0869565216060074
11. Любушин А.А. 1993. Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга. *Физика Земли*. 3: 103–108.
12. Любушин А.А. 1994. Классификация состояний низкочастотных систем геофизического мониторинга. *Физика Земли*. 7–8: 135–141.

13. Марпл С.Л. 1990. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. М., Мир: 584 с.
14. Любушин А.А. 2007. *Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга*. М., Наука: 228 с.
15. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. 1992. *Numerical recipes*. New York, Cambridge University Press: 818 p.
16. Lomb N.R. 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Space Sci.* 39: 447–462. doi: 10.1007/BF00648343
17. Scargle J.D. 1982. Studies in astronomical time series analysis, Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced points. *Astrophys. J.* 263: 835–853. doi: 10.1086/160554
18. MathWorks. URL: <https://es.mathworks.com/products.html> (дата обращения: 05.02.2020).
19. Mao A., Harrison C.G.A., Dixon T.H. 1999. Noise in GPS coordinate time series. *J. Geophys. Res.* 104(B2): 2797–2816.
20. Любушин А.А., Осика В.И., Пчелинцев В.А., Петухова Л.С. 1992. Анализ отклика деформаций земной коры на вариации атмосферного давления. *Физика Земли*. 2: 81–89.
21. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Глазырин Е.А., Шереметьев В.М. 2019. Исследование сейсмической активности района Большого Сочи методами спутниковой геодезии. *Наука Юга России*. 15(1): 3–11. doi: 10.7868/S25000640190101
22. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Юбко В.М., Глазырин Е.А. 2016. Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации. *Наука Юга России*. 12(4): 33–40.
23. Dermanis A., Kotsakis Ch. 2005. Estimating Crustal Deformation Parameters from Geodetic Data: Review of Existing Methodologies, Open Problems and New Challenges. In: *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. International Association of Geodesy Symposia. Vol. 131*. Berlin, Heidelberg, Springer: 7–18. doi: 10.1007/978-3-540-38596-7_2
4. Kaftan V., Melnikov A. 2016. Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data. *Russ. J. Earth Sci.* 16: ES3001. doi: 10.2205/2016ES000568
5. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S. 2018. *GAMIT/GLOBK Reference Manual Release 10.7*. Available at: http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf (accessed 5 February 2020).
6. Sadovskiy M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. 1987. *Deformirovanie geofizicheskoy sredy i seysmicheskiy protsess. [Deformation of geophysical environment and seismic process]*. Moscow, Nauka: 101 p. (In Russian).
7. Nicolis G., Prigogin I. 1989. *Exploring Complexity: An Introduction*. New York: W.H. Freeman & Co. 313 p.
8. Golitsyn B.B. 1960. *Izbrannye trudy. T. 2: Seysmologiya. [Selected works. Vol. 2: Seismology]*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR: 490 p. (In Russian).
9. Gamburtsev G.A. 1982. [Perspective plan of research “Research and development of earthquake forecasting”. In: *Razvitie idey G.A. Gamburtseva v geofizike. [The development of the ideas of G.A. Gamburtsev in Geophysics]*. Moscow, Nauka: 304–311. (In Russian).
10. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. 2016. The problem of physical and mechanical precursors of an earthquake: place, time, and intensity. *Doklady Physics*. 61(2): 92–97. doi: 10.1134/S1028335816020099
11. Lyubushin A.A. 1993. [Multidimensional analysis of time series of geophysical monitoring systems]. *Fizika Zemli*. 3: 103–108. (In Russian).
12. Lyubushin A.A. 1994. [Classification of low frequency geophysical monitoring systems]. *Fizika Zemli*. 7–8: 135–141. (In Russian).
13. Marpl S.L. 1990. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya. [Digital spectral analysis and its applications]*. Moscow, Mir: 584 p. (In Russian).
14. Lyubushin A.A. 2007. *Analiz dannykh sistem geofizicheskogo i ekologicheskogo monitoringa. [Analysis of geophysical and environmental monitoring systems data]*. Moscow, Nauka: 228 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Коп М.Л. 1997. *Struktury lateral'nogo vyzhmaniya v Al'piysko-Gimalayskom kollizionnom poyase. [Lateral squeeze structures in the Alpine-Himalayan collision belt]*. Moscow, Nauchnyy mir: 314 p. (In Russian).
2. Riznichenko Yu.V., Dzhibladze E.A. 1972. [Seismic activity and strong earthquakes of the Caucasus]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1: 35–49. (In Russian).
3. Ulomov V.I., Shumilina L.S. 1999. *Komplekt kart obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii OSR-97. Mashtab 1 : 8 000 000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh rayonakh. [The complete set of maps of the general seismic division into districts of the territory of the Russian Federation OSR-97. Scale 1 : 8 000 000. An explanatory note and the list of cities and the settlements located in seismic areas]*. Moscow, Schmidt United Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 57 p. (In Russian).
15. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. 1992. *Numerical recipes*. New York, Cambridge University Press: 818 p.
16. Lomb N.R. 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Space Sci.* 39: 447–462. doi: 10.1007/BF00648343
17. Scargle J.D. 1982. Studies in astronomical time series analysis, Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced points. *Astrophys. J.* 263: 835–853. doi: 10.1086/160554
18. MathWorks. Available at: <https://es.mathworks.com/products.html> (accessed 5 February 2020).
19. Mao A., Harrison C.G.A., Dixon T.H. 1999. Noise in GPS coordinate time series. *J. Geophys. Res.* 104(B2): 2797–2816.
20. Lyubushin A.A., Osika V.I., Pchelintsev V.A., Petukhova L.S. 1992. [Analysis of the crust deformations response to atmospheric pressure variations]. *Fizika Zemli*. 2: 81–89. (In Russian).
21. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Glazyrin E.A., Sheremet'ev V.M. 2019. [Research of seismic activity of the Greater Sochi

- area by methods of satellite geodynamics]. *Nauka Yuga Rossii*. 15(1): 3–11. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640190101
22. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Yubko V.M., Glazyrin E.A. 2016. [Description of crust movements according to GPS measurements in the Azov-Black Sea coast area of the Russian Federation]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(4): 33–40. (In Russian).
23. Dermanis A., Kotsakis Ch. 2005. Estimating Crustal Deformation Parameters from Geodetic Data: Review of Existing Methodologies, Open Problems and New Challenges. In: *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. International Association of Geodesy Symposia. Vol. 131*. Berlin, Heidelberg, Springer: 7–18. doi: 10.1007/978-3-540-38596-7_2

Поступила 23.12.2019