

УДК 539.3

EDN: FJWLFG DOI: 10.31429/vestnik-23-3-8-13

Прогнозный признак «стартового» землетрясения с использованием псевдо-производной по данным GPS-наблюдений

В. А. Бабешко¹✉, В. В. Калинчук², В. Л. Шестопалов², О. В. Евдокимова²,
В. В. Лозовой², И. С. Телятников², М. В. Зарецкая¹, В. С. Евдокимов¹,
П. В. Шестопалов², А. В. Плужник²

¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-кт Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

✉ Бабешко Владимир Андреевич; ORCID 0000-0002-6663-6357; SPIN 2943-6842; e-mail: babeshko41@mail.ru

Аннотация. В работе предлагается прогностический признак «стартового» землетрясения, основанный на оценке изменчивости временных рядов GPS-наблюдений посредством вычисления псевдопроизводной. Актуальность использования данного параметра обусловлена тем, что он характеризует скорость движения литосферной плиты. Её снижение (замедление движения) сопровождается накоплением упругих деформаций, которые впоследствии разряжаются в виде сейсмического события. Предложенный алгоритм расчёта псевдопроизводной отличается вычислительной простотой и доступностью реализации. Работоспособность метода продемонстрирована на модельном примере, а также на основе реальных данных GPS-наблюдений, полученных на спутниковом геодезическом пункте «Геленджик», расположенном в прибрежной зоне Черноморского побережья Западного Кавказа. Сейсмособытия (15.03.2020, $M = 4,3$), (01.09.2020, $M = 4,3$) и (12.12.2020, $M = 4,3$), зафиксированные в прибрежно-шельфовой зоне сопровождались бухтообразным уменьшением псевдопроизводной и могут иметь характер «стартового» землетрясения.

Ключевые слова: движение литосферы, «стартовое» землетрясение, изменчивость временных рядов GPS, псевдопроизводная, сейсмическая активность.

Финансирование. Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН на 2026 год, № госрегистрации проекта 125011200152-6.

Цитирование: Бабешко В. А., Калинчук В. В., Шестопалов В. Л., Евдокимова О. В., Лозовой В. В., Телятников И. С., Зарецкая М. В., Евдокимов В. С., Шестопалов П. В., Плужник А. В. Прогнозный признак «стартового» землетрясения с использованием псевдо-производной по данным GPS-наблюдений // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2026. Т. 23, № 3. С. 8–13. EDN: FJWLFG. DOI: 10.31429/vestnik-23-3-8-13

Поступила 15 августа 2026 г. После доработки 2 сентября 2026 г. Принято 4 сентября 2026 г. Публикация 25 сентября 2026 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2026. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY).

Forecasting Sign of a “Start” Earthquake Using a Pseudo Derivative Based on GPS Observations

V. A. Babeshko¹✉, V. V. Kalinchuk², V. L. Shestopalov², O. V. Evdokimova²,
V. V. Lozovoy², I. S. Telyatnikov², M. V. Zaretskaya¹, V. S. Evdokimov¹, P. V. Shestopalov²,
A. V. Pluzhnik²

¹ Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, Krasnodar, 350040, Russia

² Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Chekhova, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia

✉ Vladimir A. Babeshko; ORCID 0000-0002-6663-6357; e-mail: babeshko41@mail.ru

Abstract. The paper proposes a predictive indicator of a “starting” earthquake, based on assessing the variability of time series of GPS observations by calculating a pseudo derivative. The relevance of using this parameter is due to the fact that it characterizes the speed of the lithospheric plate movement. Its decrease (slowing down of movement) is accompanied by the accumulation of elastic deformations, which

are subsequently released in the form of a seismic event. The proposed algorithm for calculating the pseudo derivative is characterized by computational simplicity and ease of implementation. The effectiveness of the method has been demonstrated using a model example, as well as based on real GPS observation data obtained from the satellite geodynamic station “Gelendzhik”, located in the coastal zone of the Black Sea coast of the Western Caucasus. Seismic events (15.03.2020, $M = 4.3$), (01.09.2020, $M = 4.1$), and (12.12.2020, $M = 4.1$), recorded in the coastal and shelf zone, were accompanied by a bay like reduction in the pseudo derivative and may have the character of a “trigger” earthquake.

Keywords: lithosphere movement, ‘start’ earthquake, variability of GPS time series, pseudo-derivative, seismic activity.

Funding. The publication was prepared within the framework of the implementation of the state assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences for 2026, project state registration number 125011200152-6.

Cite as: Babeshko, V. A., Kalinchuk, V. V., Shestopalov, V. L., Evdokimova, O. V., Lozovoy, V. V., Telyatnikov, I. S., Zaretskaya, M. V., Evdokimov, V. S., Shestopalov, P. V., Pluzhnik, A. V., Forecasting sign of a “start” earthquake using a pseudo derivative based on GPS observations. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2026, vol. 23, no. 3, pp. 8–13. DOI: 10.31429/vestnik-23-3-8-13

Received 15 August 2026. Revised 2 September 2026. Accepted 4 September 2026. Published 25 September 2026.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2026. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](#) license.

Введение

В течение многолетних наблюдений за временными рядами GPS в сети спутниковых геодинимических пунктов (СПП), установленных Южным научным центром РАН и АО «Южморгеология» в сейсмоактивных районах Черноморского побережья было выявлено общее движение этого региона на северо-восток и получены средние скорости движений пунктов [1,2]. В прибрежно-шельфовой зоне в условиях сложной блочно-иерархической структуры тектонических блоков существует вероятность реализации механизма землетрясений по типу «стартового» [3]. В последнее время проводятся исследования геодинимических аномалий, когда скорость движения тектонического блока на временном интервале в несколько месяцев может заметно отличаться от среднего значения [4]. Задержку тектонических движений часто связывают с процессом накопления сейсмической энергии, и её оценка представляет интерес при создании систем раннего предупреждения сейсмической опасности. На рис. 1 представлен пример горизонтального движения СПП Геленджик в 2019–2021 гг. Звёздочками отмечены сейсмические события зафиксированные в радиусе 200 км от СПП, с магнитудой ($M \geq 3,9$). Заметим, что американскими учеными экспериментально установлено скачкообразное движение одного гранитного слоя по другому при температуре 600 °C [5].

Петлеобразная траектория и облако точек горизонтального положения пункта указывают на задержку тектонического движения в период прохождения сейсмических событий (рис. 1, табл. 1).

В основе методики исследований лежит понятие псевдопроизводной, введённое Яковлевым для идентификации скачкообразных изменений временных рядов [6]. Этот показатель позволяет оценить изменчивость GPS-наблюдений в пределах заданного временного окна. В рамках настоящей работы использовались временные ряды горизонтальных перемещений геодинимического пункта, восстановленные по данным спутниковых измерений. Снижение величины псевдопроизводной рассматривается как индикатор замедления движения литосферной плиты, что, в свою очередь, приводит к аккумуляции упругих деформаций и их последующей реализации в форме сейсмического события.

Для практического применения был использован вычислительно простой алгоритм расчёта псевдопроизводной [7].

Рассмотрим временной ряд смещения материальной точки в пределах скользящего окна длиной M , которое разбито на два равных подокна L и R — левое и правое соответственно.

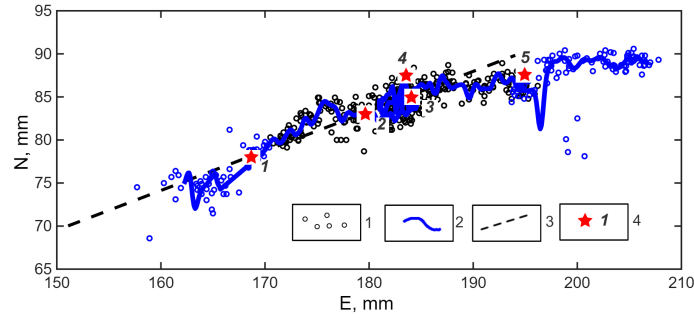


Рис. 1. Движение СГП Геленджик в горизонтальной плоскости и сейсмичность в 2019–2021 гг. 1 — исходные точки суточных измерений, 2–3 — траектория движения: 2 — сглаженная сплайном, 3 — средний многолетний тренд; 4 — номер землетрясения (табл. 1)

Fig. 1. Horizontal movement of the Gelendzhik seismic field and seismicity in 2019–2021
1 — initial points of daily measurements, 2–3 — movement trajectory: 2 — smoothed by a spline, 3 — average long-term trend; 4 — earthquake number (table 1)

Таблица 1. Характеристики землетрясений в районе Черноморского побережья в 2019–2020 гг.

№	Дата	Координаты эпицентра, градусы		Глубина очага, км	M
		Широта	Долгота		
1	18.12.2019	43,910 N	39,890 E	10	4,0
2	15.03.2020	44,82 N	37,07 E	49	4,3
3	01.06.2020	45,100 N	37,70 E	10	3,9
4	01.09.2020	44,16 N	39,07 E	10	4,3
5	12.12.2020	44,63 N	37,27 E	10	4,3

Если $X(t)$ — временной ряд, где $t = 1, \dots, N$, то подокна L и R будут иметь длины $[M/2]$ и $M - [M/2]$ отсчетов соответственно. Введём описательную статистику ряда с использованием следующих величин:

$$L_{\max}^i = \max X(t)_{i \leq t \leq i + [M/2]}, \quad L_{\min}^i = \min X(t)_{i \leq t \leq i + [M/2]}, \quad (1)$$

$$R_{\max}^i = \max X(t)_{i + [M/2] \leq t \leq i + M}, \quad R_{\min}^i = \min X(t)_{i + [M/2] \leq t \leq i + M}, \quad (2)$$

где $i = 1, \dots, N - M$.

Введём две величины

$$\Delta ED_i = R_{\max}^i - L_{\min}^i, \quad \Delta ID_i = R_{\min}^i - L_{\max}^i. \quad (3)$$

и назовем их явным и скрытым приращением соответственно, тогда полным приращением будет являться их сумма (рис. 2).

Псевдопроизводной на базе M назовем величину

$$D_i = \frac{ED_i + ID_i}{2}, \quad (4)$$

которая и будет являться характеристикой изменчивости сигнала. Коэффициент $1/2$ введен, чтобы не учитывать событие дважды.

Алгоритм вычисления псевдопроизводной был реализован в среде Matlab и проверялся на численной модели. Рассматривалось одномерное движение литосферной плиты (ЛП) по оси x с длиной временного ряда $N = 500$ по следующему закону:

$$x(t) = a_1 [(1 - \cos(t - \varphi_1)) / t^2] + a_2 [(1 - \cos(t - \varphi_2)) / t^2] + \varepsilon. \quad (5)$$

где $a_1 = a_2 = 1,5$; $\varphi_1 = \varphi_2 = 150 \text{ dt}$; $\text{dt} = 12\pi/N$, $t_i = t_{i-1} + \text{dt}$, $i = 1, 2, \dots, N$.

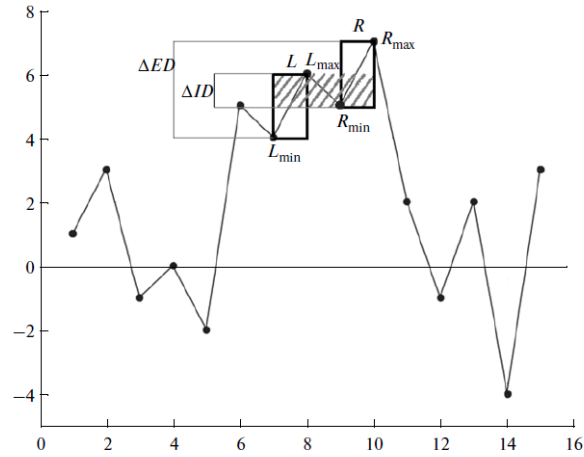


Рис. 2. Явное и скрытое приращения, $M = 4$

Fig. 2. Explicit and implicit increments, $M = 4$

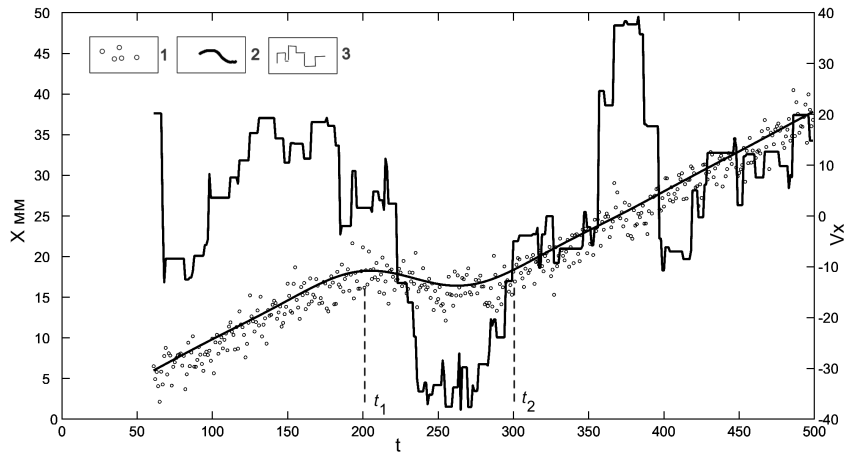


Рис. 3. Модель движения ЛП вдоль оси x с задержкой.

1 — точки положения ЛП согласно (5) с учётом шума измерений ε , 2 — положения ЛП при $\varepsilon = 0$ (5),
3 — псевдопроизводная Vx в условных единицах, t — время в сутках

Fig. 3. Model of LP motion along the x axis with a delay.

1 — LP position points according to (5) taking into account the measurement noise ε , 2 — LP position at $\varepsilon = 0$ (5),
3 — pseudo-derivative Vx in arbitrary units, t — time in days

Анализ рис. 3 показывает уменьшение псевдопроизводной на временном интервале $t_1 - t_2$, где задерживается движение литосферной плиты.

База M выбиралась 60 суток. Середина каждого скользящего временного окна выбиралась в качестве его временной метки. К местоположению $x(t)$ добавлялся гауссовский белый шум ε с амплитудой 3,0 мм и нулевым средним. Полученные временные ряды обрабатывались программой вычисления псевдопроизводной по алгоритму (1–4). Графики движения ЛП и псевдопроизводной представлены на рис. 3.

Результаты

Рассмотренная методология применялась к анализу движения ЛП в районе расположения СГП Геленджик в период сейсмогеодинамической активности в 2019–2021 гг. За рассматриваемый период по информации Европейско-средиземноморского сейсмологического центра



Рис. 4. Сейсмичность в районе Черноморского побережья 2019–2021 гг. Цифрами представлены номера землетрясений с характеристиками в табл. 1
 Fig. 4. Seismicity in the Black Sea Coast Region 2019–2021 (the numbers from the table 1)

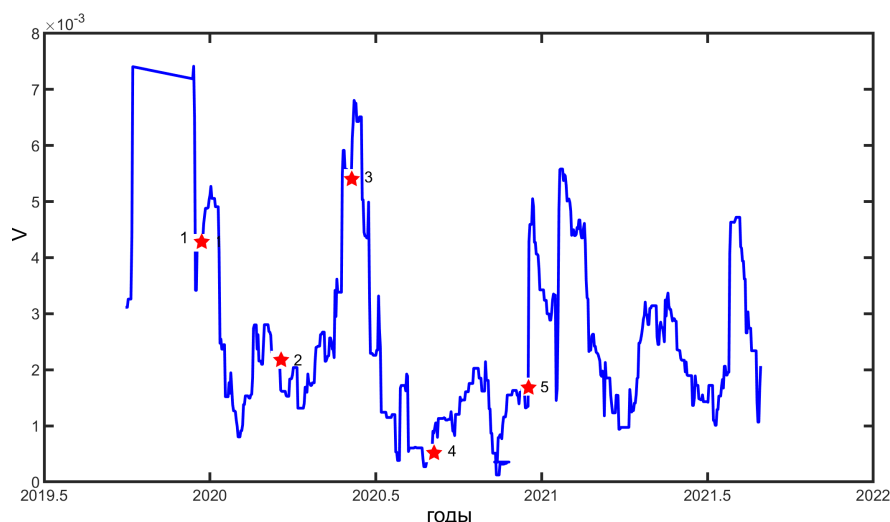


Рис. 5. Псевдопроизводная, отражающая скорость движения ЛП в районе СГП Геленджик в 2019–2021 гг. Звездочками отмечены землетрясения с номерами согласно табл. 1
 Fig. 5. Pseudo-derivative reflecting the velocity of the LP movement in the SGP area Gelendzhik in 2019–2021. Asterisks mark earthquakes with numbers according to the table 1

(EMSC) [6] в пределах исследуемой области произошло 5 сейсмособытий с магнитудой в диапазоне от 3,9 до 4,3 (рис. 4, табл. 1).

Движение ЛП измерялось аппаратурой GPS на СГП Геленджик. Обработка данных суточных измерений выполнялась пакетом GAMIT (V. 10.7) [8]. Точность определения положения в горизонтальной плоскости составила 3–4 мм. Псевдопроизводная вычислялась в скользящем временном окне ($M = 60$) по алгоритму (1–4) для каждой компоненты местоположения V_x и V_y в горизонтальной плоскости в системе UTM. Результирующее значение псевдопроизводной на плоскости V определялось из выражения

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (6)$$

Анализ рис. 5 даёт возможность предположить замедление скорости движения ЛП в период прохождения землетрясений 2, 4, 5 (рис. 4, табл. 1) в акватории Чёрного моря. Эти события приурочены, по видимому, к геодинамическим активным структурам Восточно-Черноморского разлома и могут быть реализованы по механизму «стартового». Сейсмические события 1 и 3

зафиксированы на суше в другой геодинамической обстановке и для этих землетрясений замедление движения ЛП в районе СГП Геленджик не наблюдается.

Заключение

Предложен прогностический признак возрастания сейсмической активности, основанный на оценке изменчивости временных рядов GPS-наблюдений с использованием псевдопроизводной. Установлено, что данный параметр коррелирует с замедлением движения литосферной плиты, которое сопровождается накоплением упругих деформаций и их последующей сейсмической разрядкой. Разработан простой в реализации алгоритм вычисления псевдопроизводной. Работоспособность алгоритма продемонстрирована на модельном примере, а также на основе реальных данных GPS-наблюдений, полученных на спутниковом геодинамическом пункте «Геленджик», расположенном в прибрежной зоне Черноморского побережья Западного Кавказа. Сейсмособытия (15.03.2020, $M = 4,3$), (01.09.2020, $M = 4,3$) и (12.12.2020, $M = 4,3$), зафиксированные в прибрежно-шельфовой зоне, сопровождались бухтообразным уменьшением псевдопроизводной и могут иметь характер «стартового» землетрясения. Данные временных рядов псевдопроизводных, рассчитанных на сети спутниковых геодинамических пунктов ЮНЦ РАН могут быть включены в процедуры определения интегрального критерия напряженно-деформированного состояния геологической среды, что может повысить точность предсказания в системе раннего предупреждения сейсмической опасности [8,9].

Литература [References]

1. Бабешко, В.А., Шестопалов, В.Л., Юбко, В.М., Глазырин, Е.А., Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации. *Наука Юга России*, 2016, т. 12, № 4, с. 33–40. [Babeshko, V.A., Shestopalov, V.L., Yubko, V.M., Glazyrin, E.A., Description of crust movements according to GPS measurements in the Azov-Black sea coast area of the Russian Federation. *Nauka Yuga Rossii*, 2016, 12(4), pp. 33–40. (In Russian)]
2. Глазырин, Е.А., Шестопалов, В.Л., Современные движения поверхности Земли Российского сегмента побережья Черного моря по данным GPS-наблюдений. В *Система Черного моря*. Москва, Научный мир, 2018, с. 76–83. [Glazyrin, E.A., Shestopalov, V.L., Modern crust movements of the Russian segment of the Black Sea coast according to GPS observations. In *Sistema Chernogo moray = Black Sea system*. Moscow, Nauchnyy mir, 2018, pp. 76–83. (In Russian)]
3. Бабешко, В.А., Евдокимова, О.В., Бабешко, О.М., Хрипков, Д.А., Телятников, И.С., Евдокимов, В.С., Шестопалов, В.Л., О стартовых землетрясениях в прибрежной зоне. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2018, т. 15, № 3, с. 12–18. [Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M., Khripkov, D.A., Telyatnikov, I.S., Evdokimov, V.S., Shestopalov, V.L., About start earthquakes in the coastal zone. *Ehkologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ehkonomicheskogo sotrudnichestva*, 2018, no. 3, pp. 12–18. (In Russian)] DOI: 10.31429/vestnik-15-3-12-18 EDN: YABSWL
4. Касьянова, Н.А., *Экологические риски и геодинамика*. Москва, Научный мир, 2003. [Kasyanova, N.A., *Ekologicheskie riski i geodinamika = Environmental risks and geodynamics*. Moscow, Nauchnyy mir, 2003. (In Russian)]
5. Mitchell, E.K., Fialko, Y., Brown, K.M., Frictional properties of gabbro at conditions corresponding to slow slip events in subduction zones. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2015, vol. 16, pp. 4006–4020.
6. Любушин, А.А., Яковлев, П.В., Энтропийная мера скачкообразной составляющей временных рядов GPS. *Физика Земли*, 2016, № 1, с. 98–107. [Lyubushin, A.A., Yakovlev, P.V., Entropy measure of the hopping component of GPS time series. *Fizika Zemli*, 2016, vol. 1, pp. 98–107. (In Russian)]
7. Euro-Mediterranean Seismological Centre. URL: <https://www.emsc.eu> (accessed: 03.03.2022).
8. Бабешко, В.А., Калинин, В.В., Шестопалов, В.Л., Интегральный признак напряженно-деформированного состояния среды по данным GNSS-наблюдений. *Наука Юга России*, 2020, т. 16, № 1, с. 3–10. [Babeshko, V.A., Kalinchuk, V.V., Shestopalov, V.L., Integral factor of the crust stress-strain state according to GNSS observations. *Nauka YUGA Rossii*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 3–10. (In Russian)]
9. Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., McClusky, S., GAMIT Reference Manual Release 10.7.2018. URL: http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf (accessed 04.05.26).