

УДК 550.348.43

СИНХРОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ КООРДИНАТ ГФО «МИХНЕВО» ПО ДАННЫМ GPS СТАНЦИИ И ВАРИАЦИЙ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

© 2024 г. Б. Г. Гаврилов¹, И. А. Санина^{1,*}, Н. Л. Константиновская¹, О. В. Овчинникова¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: irina@idg.ras.ru

В работе представлены результаты временных изменений координат измерительного пункта по данным GPS станции и вариаций кинематических и динамических параметров сейсмических волн, полученных на уникальной научной установке Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» ИДГ РАН. Показано, что наблюдается подобие в поведении этих параметров в период 2016–2022 гг. Установлена четко выраженная годовая периодичность изменения координат станции и динамических параметров – вариаций логарифма отношения максимальных амплитуд поперечных и продольных волн $Lg(AS_{\max}/AP_{\max})$.

Ключевые слова: среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево», GPS станция, вариации кинематических и динамических параметров сейсмических волн.

Для цитирования: Гаврилов Б.Г., Санина И.А., Константиновская Н.Л., Овчинникова О.В. Синхронные наблюдения смещения координат ГФО «Михнево» по данным GPS станции и вариаций кинематических и динамических параметров сейсмических волн // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 1–7. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_1

Введение

Уникальная научная установка Института динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (УНУ СКГН «Михнево») расположена в 80 км от Москвы, в Ступинском районе Московской области. Измерительный комплекс, расположенный в районе со слабым влиянием антропогенных помех, состоит из ряда уникальных по своим характеристикам установок, включает инструментальные комплексы регистрации параметров различных геофизических полей, позволяющие проводить синхронную регистрацию физических полей и исследование квазистатических, динамических и энергомассообменных процессов в литосферно-атмосферно-ионосферной системе и механизмов их взаимодействия [Кочарян и др., 2022].

На УНУ СКГН «Михнево» проводятся сейсмологические, гидрогеологические, акустические, атмосферные и ионосферные исследования. В 2004 г. на территории обсерватории была установлена малоапертурная сейсмическая группа (МСГ). Сейсмическая группа состоит из 12 пунктов наблюдений и является единственной подобной системой в центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕРП). Радиофизический комплекс УНУ позволяет получать данные о структуре и динамике ионосферной плазмы, вариациях электромагнитных полей в широком спектральном диапазоне. Контроль состояния верхней ионосферы проводится с использованием линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) ионозонда и приемников глобальных навигационных спутниковых систем Javad Sigma и Javad Prego. Приемники применяются для измерений координат и геодезических определений абсолютных и относительных положений объекта и измерений полного электронного содержания ионосферы. Данные определения координат измерительного пункта с использованием приемника Javad Prego с 2016 по 2022 гг. использованы в настоящей работе.

УНУ СКГН «Михнево» расположена в Центральной части Восточно-Европейской платформы, которая относится к тектонически пассивным территориям. В тоже время значительная техногенная нагрузка на геологическую среду может приводить к нарушению естественного равновесия [Кишкина и др., 2023]. В данном исследовании мы исходили из предположения, что вариации координат и параметров сейсмических волн определяются изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) среды. Возможность синхронных наблюдений сейсмических событий и изменения координат сейсмической станции представляет несомненный интерес с точки зрения осуществления контроля за изменениями НДС. Целью настоящей работы является поиск возможного механизма изменений кинематических и динамических параметров сейсмических волн в период 2016–2023 гг. Предполагается, что они могут быть вызваны локальным изменением НДС вследствие неравномерной деформации земной коры при смещении ВЕП. Задачей работы является получение данных по изменению географического положения УНУ по данным спутниковых измерений и сопоставление их с вариациями параметров сейсмических волн по записям на центральном приборе МСГ в «Михнево» от антропогенных возмущений в районе г. Алексин.

Методика обработки и экспериментальные данные

Использование технологий GPS/ГЛОНАСС позволяет исследовать изменение географических координат объекта. Абсолютный метод определения координат реализуется по измерениям кода сигналов, получаемых со спутников ГНСС, и вычислениям псевдодальностей – расстояний от спутника до приемника. Метод позволяет получать данные по координатам приемника в земной геоцентрической системе или отнесенных к земному эллипсоиду в режиме реального времени. По данным [Галаганов и др., 2017; Гусева и др., 2020] горизонтальные перемещения ВЕП в 2006–2018 гг. имели северо-восточное направление со средней скоростью от 23.7 мм/год на севере до 27.3 мм/год на юге. Скорости вертикальных движений составляли от 4 до 1 мм/год.

График изменения широты (ΔN), долготы (ΔE), горизонтального смещения (ΔH) в мм по данным GPS приемника, расположенного на территории ГФО «Михнево», представлен на рис. 1. Красными пунктирными линиями показан линейный тренд смещения. На нижнем рисунке – общий тренд изменения радиуса смещения приемника (ΔR) с годовым усреднением.

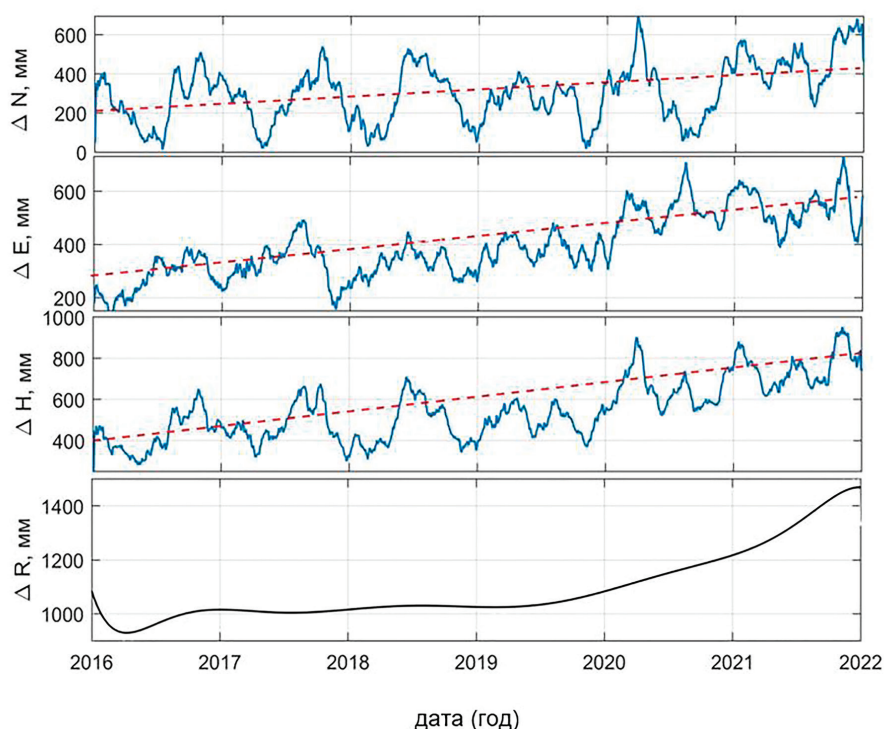


Рис. 1. Изменение широты (ΔN), долготы (ΔE), горизонтального смещения (ΔH) в мм с показанным красной пунктирной линией линейным трендом и общий тренд изменения радиуса смещения приемника (ΔR)

Из графиков видно, что средняя скорость смещения в направлении север-юг в этот период составила 33 мм/год, скорость смещения в направлении восток-запад – ~56 мм/год, а общая скорость смещения в северо-восточном направлении составила 40 мм/год. Общий тренд изменения радиуса смещения приемника ΔR показал, что в период 2020–2022 гг. скорость смещения существенно выросла и составила ~100 мм/год.

Обращает на себя внимание четко выраженная годовичная периодичность в величинах вектора смещения. Эта периодичность в данных GPS связывается с сезонными вариациями в точке установки станции GPS, обусловленными изменениями атмосферного давления, радиационного воздействия Солнца, гидрологическими вариациями уровня подземных вод, температурными изменениями [Van Dam et al., 2001; Romagnoli et al., 2003].

В сейсмологическом эксперименте реализована классическая схема измерений, когда анализируемый участок среды просвечивается сейсмическими волнами от постоянного источника и регистрируется сейсмической станцией. При этом источниками могут быть взрывы, вибраторы, землетрясения. Установленные вариации кинематических и динамических параметров сейсмических волн во времени рассматриваются как индикаторы изменения состояния среды.

Основой для изучения кинематических и динамических вариаций сейсмических волн явились записи сейсмических событий из района г. Алексин более чем за 10-летний период наблюдений. Вариации кинематических параметров исследовались по разности времен вступлений поперечных и продольных волн ($T_s - T_p$), что позволяет не учитывать влияние источника [Кочарян и др., 2011]. Изменения динамических параметров изучались с использованием методики, неоднократно применяемой ранее к анализу вариаций затухания, в основном, в сейсмически активных районах, а также на платформенных территориях [Копничев и др., 2009; 2012]. Метод заключается в анализе изменения во времени логарифма отношения амплитуд поперечной и продольной волн или логарифм отношения максимальной амплитуды в группе поперечных волн к максимальной амплитуде в группе продольных волн, т.е. $Lg(AS/AP)$ или $Lg(AS_{\max}/AP_{\max})$, что позволяет не учитывать интенсивность сигнала в источнике. В нашем случае анализируется логарифм отношения максимальных амплитуд, что обеспечивает более четкое выделение полезного сигнала по сравнению с первым вступлением волн P и S , учитывая достаточно малую магнитуду рассматриваемых событий. Все измерения проводились на вертикальных каналах широкополосного и короткопериодного датчиков, расположенных в штольне на глубине 20 м. Последующее суммирование полученных отношений позволило увеличить количество измерений и повысить надежность установленных зависимостей.

В результате проведения спектрального анализа [Асминг и др., 2021] был выбран частотный диапазон 3–9 Гц, в котором полезный сигнал выделяется наиболее четко. Временной интервал, в котором рассматривались максимальные амплитуды, составлял для волн $P_{\max}$ 1.2 сек и 3 сек для волн $S_{\max}$. Достаточный объем сейсмологических данных (порядка 30–50 событий в месяц) позволяет не только оценить общий тренд, но и провести детальный анализ установленных зависимостей. График изменения разности времен пробега, осредненный по годам, представлен на рис. 2.

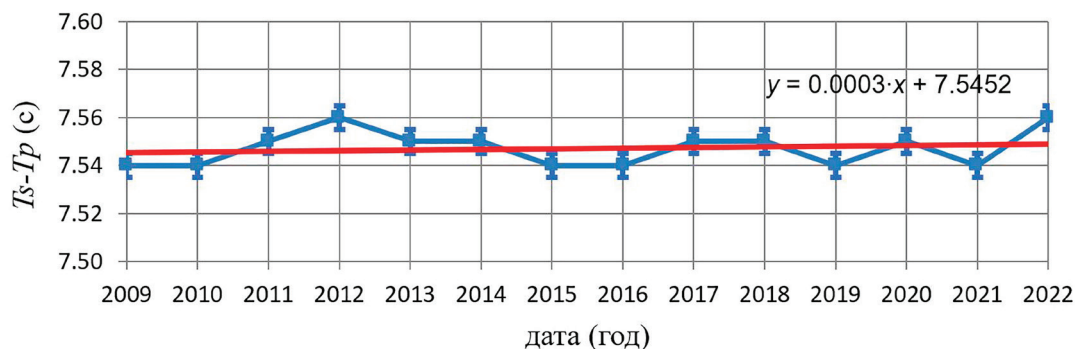


Рис. 2. График осредненных по годам значений разности времен вступлений волн $T_s - T_p$ для событий вблизи г. Алексин за период с 2009 по 2022 гг.

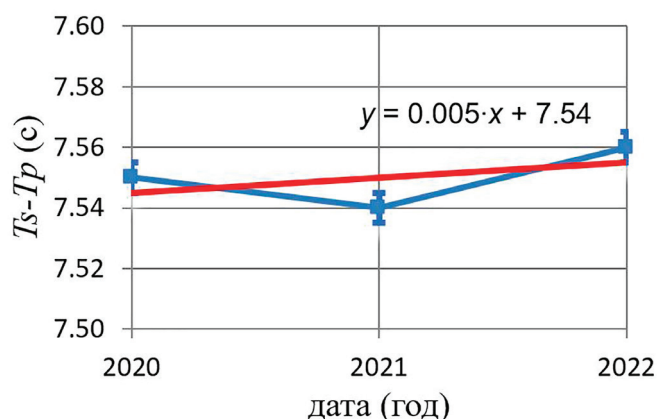


Рис. 3. $T_s - T_p$ среднее по годам для событий вблизи г. Алексин с 2020 по 2022 гг.

Как видно из графика, временной тренд практически отсутствует. Отметим, что общий тренд изменения радиуса смещения приемника (ΔR) с 2017 г. до середины 2019 г. был также незначительным (рис. 1). Слабый положительный тренд наблюдался в период 2020–2022 гг. (рис. 3), что также качественно совпадает с данными изменения координат станции (рис. 1).

Рассмотрим вариации логарифма отношения максимальных амплитуд поперечных к продольным волнам $Lg(AS_{\max}/AP_{\max})$. Как уже отмечалось выше, в месяц регистрировалось от 30 до 50 событий, что позволяет помимо расчета общего тренда выполнить более детальный анализ полученного облака точек. Для этого были рассмотрены значения, осредненные за месяц с последующим осреднением в скользящем среднем по 3-м месяцам. Такой подход позволил выделить периоды в 1–2 года (рис. 4), причем максимумы, в основном, приходятся на середину года.

Особенностью поведения зависимостей на рис. 4 является резкое изменение характера графиков, начиная с января 2017 г., выражающееся увеличением значений примерно в два раза. Заметное изменение общего радиуса смещения координат, показанное на рис. 1, наблюдалось с 2019 г.

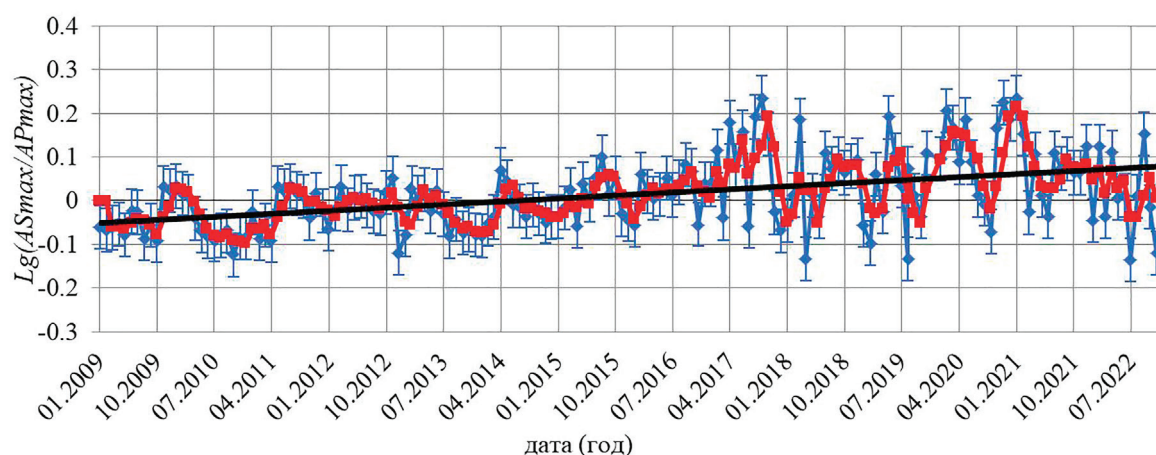


Рис. 4. Вариации отношения логарифма амплитуд поперечных и продольных волн: синяя линия и синие ромбы – временной ряд за 2009–2022 гг. осредненных по месяцам значений параметра $Lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ по записям антропогенных сейсмических возмущений вблизи г. Алексин. Красная линия и красные квадраты – скользящее среднее временного ряда по трем месяцам. Черной линией показан линейный тренд ($y = 0.00003 \cdot x - 1.0763$, $R^2 = 0.2$)

Обсуждение и выводы

Совместное рассмотрение зависимостей, приведенных на рисунках 1–4, указывают на подобие в поведении вариаций координат по данным GPS приемника и кинематических и динамических параметров сейсмических волн.

Показано, что временной ход вариаций динамических параметров сейсмических волн и вариаций векторов смещения УНУ СКГН «Михнево» характеризуется годичной периодичностью (рисунки 1 и 4). Периодичность в данных GPS связывается с сезонными климатическими возмущениями в точке установки станции GPS. Сейсмический приемник расположен в штольне на глубине 20 м в слое известняка, максимальная амплитуда в продольных и поперечных волнах связана с рефрагированной волной, распространяющейся вдоль границы на глубине 17–20 км. В этих условиях объяснение выявленной годичной периодичности сейсмических данных влиянием климатических факторов, указанных как причина вариаций координат по данным GPS приемника, не представляется правомерным.

Вторая выявленная особенность в поведении измеренных параметров – это изменение вариаций динамических параметров сейсмических волн с 2017 г. и координат станции с 2019 г.

Если рассмотреть зависимости разности времен пробега $T_s - T_p$ за период с 2020 по 2022 гг. (рис. 3), то можно выделить незначительный положительный тренд, что коррелируется с ростом вектора смещения в этот же временной интервал. Период с 2016 по 2019 гг. характеризуется отсутствием значимого тренда как в кинематических параметрах сейсмических волн, так и в смещении координат ГФО «Михнево». Возможно, что слабая выраженность временного тренда в сейсмических данных связана с регистрационными возможностями сейсмических датчиков, частота дискретизации которых для широкополосного датчика составляет 100 Гц, а для короткопериодного – 200 Гц. При этом наши данные показывают большую чувствительность динамических параметров к изменению состояния геологической среды. Тенденция к ускорению смещения, показанная по данным станции GPS на Восточно-Европейской платформе в 2020–2022 гг., возможно связана с отмеченным в [Zotov et al., 2022] ростом скорости вращения Земли примерно в тот же период (рис. 5).

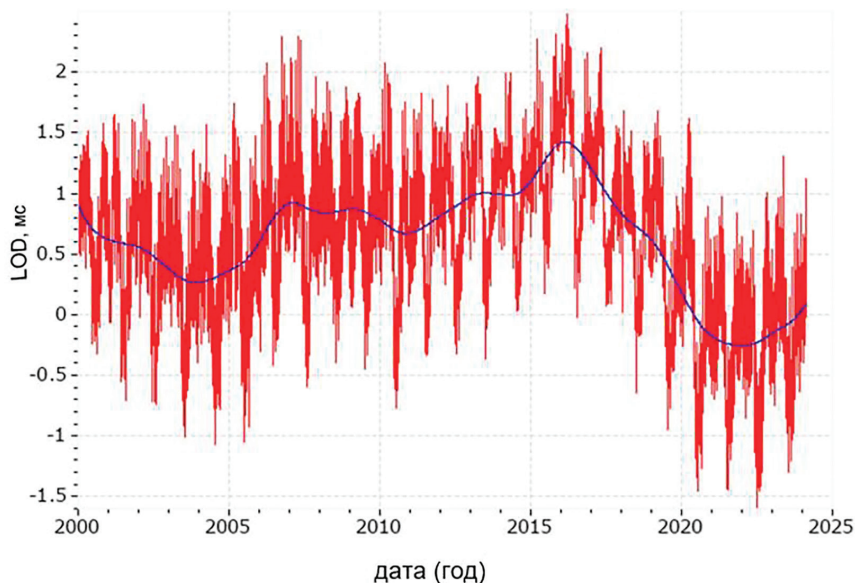


Рис. 5. Вариации длительности земных суток LOD с 2000 по 2023 гг. (адаптировано из [Zotov et al., 2022])

В работе сделана попытка сравнить экспериментальные данные по перемещению измерительного пункта и изменению кинематических и динамических параметров сейсмических волн за период 2016–2022 гг., полученные в УНУ СКГН «Михнево». Насколько нам известно, подобных наблюдений на территории ВЕП ранее не проводилось. Выявление значимости и механизмов отмеченной корреляции исследованных параметров будет являться предметом дальнейших исследований.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (темы № 122032900175-6 и № 122040400015-5).

Список литературы

- Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 27–40. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02>
- Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П. Деформации земной коры Восточно-Европейской платформы по данным спутникового мониторинга // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. Т. 3. № 32. С. 6–14. <https://elibrary.ru/zkafiv>
- Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П., Розенберг Н.К. Спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России // Геофизические исследования. 2020. Т. 21 № 1. С. 24–32. <https://doi.org/10.21455/gr2020>
- Кишкина С.Б., Будков А.М., Кочарян Г.Г. Сильные техногенные землетрясения в районах добычи твердых полезных ископаемых // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 2. С. 38–62. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_38
- Копничев Ю.Ф., Гордиенко Д.Д., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 49–64. <https://elibrary.ru/jvtvqx>
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Временные вариации поля поглощения S-волн в районах ядерных полигонов Лобнор и Новая Земля // Вестник НЯЦ РК. 2012. Вып. 2.
- Кочарян Г.Г., Гамбурцева Н.Г., Санина И.А., Данилова Т.В., Нестеркина М.А., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Г. Временные вариации механических характеристик локальных участков земной коры по данным сейсмических наблюдений // Физика Земли. 2011. № 4. С. 58–66. <https://doi.org/10.1134/S0002333711040041>
- Кочарян Г.Г., Локтев Д.Н., Ряховский И.А., Санина И.А. Уникальная научная установка «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. Vol. 13 (2). P. 0590. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590>
- Romagnoli C., Zerbini S., Lago L., Richter B., Simon D., Domenichini F., Elmi C., Ghirotti M. Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations // J. Geodyn. 2003. Vol. 35 (4–5). P. 521–539.
- Van Dam T., Wahr J., Milly P.C.D., Shmakin A.B., Blewitt G., Lavalle D., Larson K.M. Crustal displacements due to continental water loading // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. P. 651–654. <https://doi.org/10.1029/2000GL012120>
- Zotov L., Bizouard C., Sidorenkov N., Marchukova O. Anomalies of the Earth's rotation in 2010-2020-s // Geokosmos. 2022.

SYNCHRONOUS OBSERVATIONS OF THE MIKHNEVO GEOPHYSICAL OBSERVATORY COORDINATES DISPLACEMENT ACCORDING TO GPS STATION DATA AND VARIATIONS IN THE KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF SEISMIC WAVES

© 2024 B. G. Gavrilov¹, I. A. Sanina^{1, *}, N. L. Konstantinovskaya¹, O. V. Ovchinnikova¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: irina@idg.ras.ru*

The paper presents the results of temporary changes in the coordinates of the measuring point according to GPS station data and variations in the kinematic and dynamic parameters of seismic waves obtained at the unique scientific installation Mid-latitude complex of geophysical observations «Mikhnevo». It is shown that there is a similarity in the behavior of these parameters in the period 2016–2022. A clearly defined annual periodicity of changes in station coordinates and dynamic parameters has been established – variations in the logarithm of the ratio of the maximum amplitudes of transverse and longitudinal waves $Lg(AS_{\max}/AP_{\max})$.

Keywords: mid-latitude complex of geophysical observations «Mikhnevo», GPS station, variations of kinematic and dynamic parameters of seismic waves.