



О влиянии нагрузок на результаты исследований по ГНСС-наблюдениям

В.Л. Горшков^{1*}, Н.В. Щербакова¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 30 октября 2024 / Принята к публикации 6 декабря 2024

Аннотация

По данным поддерживаемой в Пулковской обсерватории базы скоростей ГНСС-станций (БДС) исследовано соответствие модельных нагрузок на координаты станций, обусловленных сезонными вариациями грунтовых вод, реальным сезонным вариациям координат, оцененным методом наименьших квадратов. Показано, что модельные нагрузки от вариаций грунтовых вод на положения ГНСС-станций в большинстве случаев не адекватны реальным сезонным вариациям координат станций для исследуемой территории Восточно-Европейской Платформы (ВЕП). При этом использование поправок за атмосферные нагрузки значительно стабилизирует вариации координат ГНСС-станций.

ключевые слова: нагрузочные эффекты в положениях ГНСС-станций, синхронные помехи в сетях ГНСС-станций, влияние метеорологических параметров на положения станций.

Введение

Основой геодинимических исследований по ГНСС-данным являются оценки скоростей станций, расположенных на исследуемой территории. Понятно, что от точности этих оценок зависит и надёжность получаемых результатов. В этом плане наиболее важными параметрами являются плотность распределения станций и продолжительность наблюдений на них. С увеличением того и другого растёт и надёжность результатов, и возможность проводить всё более детальные исследования. Однако, несмотря на возрастающую точность ГНСС-оборудования, в рядах наблюдений остаются систематические ошибки сравнимые и даже превосходящие декларируемые ошибки оборудования. К таким искажающим собственно геодинимическую информацию факторам следует отнести геофизические нагрузки.

Достигнутая точность позиционных ГНСС-наблюдений (субсантиметровая в горизонтальных координатах и сантиметровая в вертикальной) такова, что вариации атмосферных барических полей, грунтовых вод, уровня внутренних водоёмов, снежного покрова и других гидрологических нагрузок значительно влияют на координаты ГНСС-станций, искажая полученные по ним результаты геодинимических исследований. Некоторые из этих нагрузок (вариации толщины снежного покрова и уровня внутренних водоёмов) пока не учитываются ввиду отсутствия соответствующих модельных данных. Вариации снежного покрова, как показано в [Горшков и др. \(2021\)](#), вообще могут иметь противоположное воздействие на координаты рядом расположенных, но имеющих различное оборудование ГНСС-станций. Существующие же модели соответствующих нагрузочных поправок по объективным причинам имеют, во-первых, сглаженное, а, во-вторых, конечное пространственное (десятки и сотни километров) и временное (3 и более часов) разрешение. При этом расхождение имеющихся моделей иногда превышают два и более сантиметра в вертикальной составляющей.

*e-mail: vigor1946@yandex.ru

Зачастую применение этих моделей сильно не соответствует конкретной точке расположения ГНСС-станции, что приводит к увеличению вариаций её рядов положений и, соответственно, к увеличению ошибок координатных измерений. В основном это относится к нагрузкам за грунтовые воды (LWS – Land Water Storage), имеющие строго сезонные вариации и, вероятно, недостаточно учитывающие характер подстилающих грунтов, например, скальные или осадочные породы, перемежаемость которых значительно превосходит возможности пространственного разрешения моделей.

О влиянии модельных нагрузок от грунтовых вод на положения ГНСС-станций

В наиболее ответственных геодинимических исследованиях на основе ГНСС наблюдений стараются учесть все возможные поправки. Координаты станций изменяются под влиянием переменных геофизических нагрузок, в основном атмосферного (барические поля) и гидрологического (уровень поверхностных и грунтовых вод) характера. Исходными данными для вычисления геофизических нагрузок являются спутниковые и наземные данные геофизического мониторинга планеты, интерполируемые после соответствующего моделирования на координаты ГНСС-станции и на момент произведения наблюдений. Далее после учёта упругих свойств деформируемой под этими нагрузками Земли вычисляются соответствующие поправки в горизонтальные и вертикальные координаты станций.

К сожалению, некоторые из этих нагрузок пока не моделируются на общедоступном уровне поддержки в виде соответствующих сервисов, как например, вариации уровня воды внутренних водоёмов, неустойчивый снежный покров. Нами использовались нагрузочные поправки по данным из сайта <http://massloading.net> (Petrov and Boy (2004)), вычисленные, в свою очередь, для грунтовых вод по модели GLDAS (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas>).

Как отмечалось нами в Горшков и др. (2012) учёт атмосферных нагрузок в среднем незначительно уменьшает сезонную и шумовую составляющую в рядах положений станций. Это объясняется широким спектром атмосферных нагрузок из-за вариаций барических полей от почти суточных и вплоть до сезонных и более долгопериодических. Этого нельзя сказать о почти сезонных вариациях уровня грунтовых вод и обусловленных ими нагрузках. Зачастую их применение, наоборот, приводит к появлению сезонной компоненты в рядах положений, ранее в ней отсутствующей, или к изменению её фазы и увеличению амплитуды, что демонстрирует пример станции KUSA на рис. 1. Видно, что удаление LWS-нагрузок из вертикальной компоненты только привне-

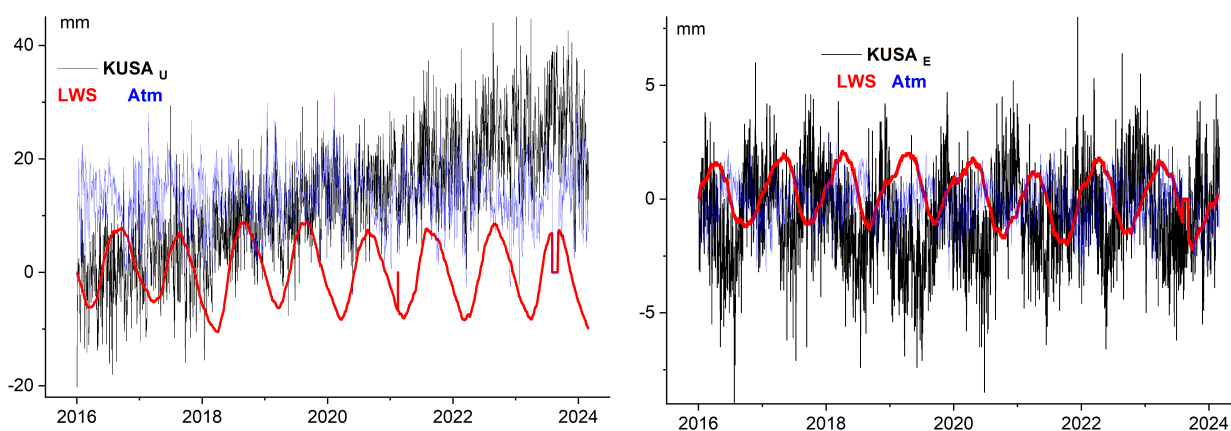


Рис. 1: Исходный ряд положений станции KUSA и модельные LWS и атмосферные нагрузки слева в вертикальной составляющей, справа – в долготной компоненте.

сёт в ряд отсутствующую в нём сезонность, а в долготной компоненте довольно сильно сместит

фазу имеющейся сезонности ряда. В обоих случаях появится (останется) сезонность, которую потребуется убирать.

Вариации LWS складываются из осадков, остающихся в верхнем слое почвы после испарения и стока по поверхности или по внутрипочвенным стокам. Этот механизм функционирует при положительных температурах с некоторыми задержками после выпадения осадков и приводит к нагрузочному эффекту с выраженной сезонностью. Снежные осадки не подвержены стоку и испарению, особенно в холодные зимы и поэтому не моделируются, и не учитываются в LWS, возможно являясь одной из причин общих для близких станций систематических ошибок, так называемых CME (Common Mode Error) в ГНСС-рядах, охватывающих иногда значительные регионы. Эти синхронные помехи исследовались нами в работе Горшков и Щербакова (2017).

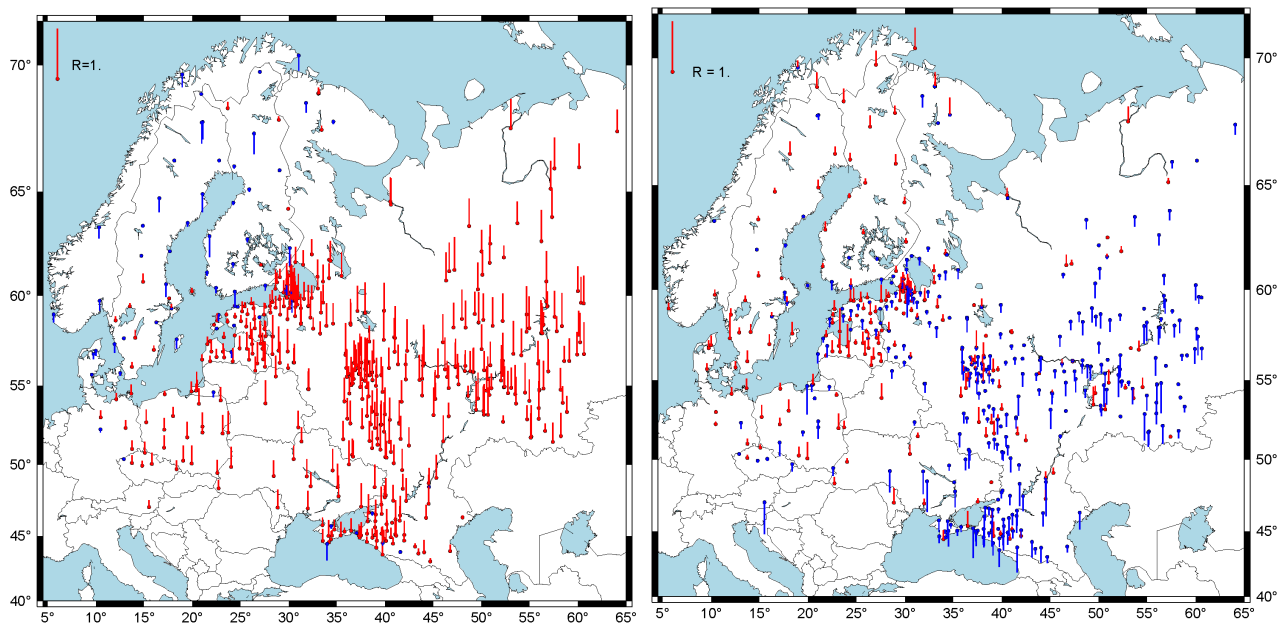


Рис. 2: Слева – корреляции между сезонностью исходных рядов положений станций и модельными нагрузками за уровень грунтовых вод в вертикальной составляющей, справа – в широтной компоненте.

Наш продолжительный опыт использования различных модельных LWS нагрузок Горшков и Щербакова (2016), обусловленный развитием и поддержкой базы БДС, привёл нас к выводу о нецелесообразности их использования, что связано с их неадекватностью реальным сезонным вариациям в положениях ГНСС-станций. Главная же причина в том, что при окончательной обработке рядов станций практически всегда присутствуют остаточные сезонные вариации, которые, как правило, исключают с помощью МНК по модели:

$$X_i = a_1 \sin(2\pi t_i) + a_2 \cos(2\pi t_i) + a_3 \sin(4\pi t_i) + a_4 \cos(4\pi t_i) + \nu_i \quad (1)$$

где X_i – текущие значения любой координаты станции на момент t_i . Это связано с тем, что помимо гидрологических нагрузок ряды положений ГНСС-станций частоотягощены сезонностью, природа происхождения которой не всегда понятна, но всегда в той или иной мере присутствует.

На рис. 2 приведены корреляции модельных нагрузок LWS и сезонных вариаций рядов, оцененные методом наименьших квадратов по исходным положениям станций для вертикальной и широтной компонент по ежесуточным данным. Были использованы все станции БДС с продолжительностью более 4 лет, которых оказалось 555.

Видно, во-первых, что даже для вертикальной составляющей, наиболее подверженной любым нагрузкам, уровень соответствия (корреляции, R) LWS нагрузок и реальной сезонности исходных рядов редко достигает величины $R = 0.5$ (в среднем 0.25). Во-вторых, заметно, что на территории ВЕП положительные корреляции приурочены к Русской плите, в основном состоящей из

осадочных пород, а почти нулевые и даже отрицательные – к скальному Балтийскому щиту. И, в-третьих, для широтной и долготной компонент вклад LWS нагрузок близок нулю и качественно противоположен вкладу в вертикальную компоненту (средние $R_{LAT} = -0.02$, $R_{LONG} = +0.02$).

Из этого ясно, что если для станций на Русской плите имеется хоть какое-то соответствие поправок за нагрузки от грунтовых вод для координат станций в вертикальной составляющей, то на скальных грунтах Балтийского щита их применение просто противопоказано. Для горизонтальных координат их применение вообще бессмысленно.

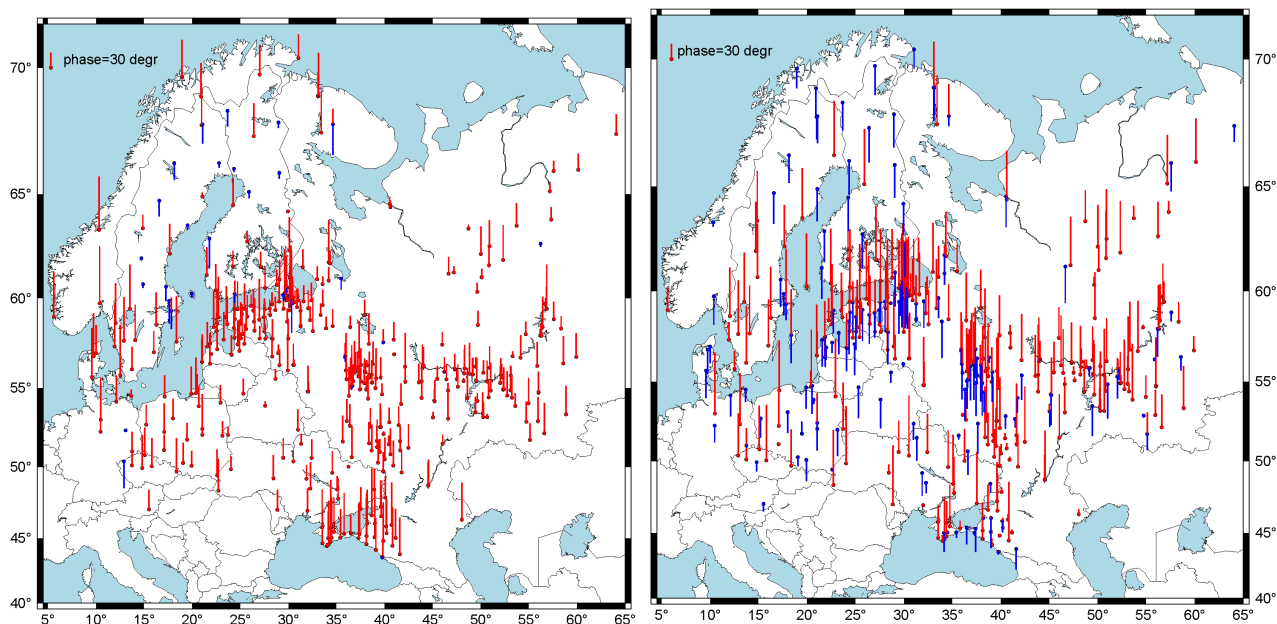


Рис. 3: Разность фаз сезонных вариаций LWS-нагрузок и МНК оценок по модели (1) в исходных положениях в вертикальной (слева) и широтной (справа) компоненте.

Ещё одним аргументом несоответствия модельных LWS-нагрузок реальным сезонным вариациям в исходных положениях ГНСС станций является фазовое расхождение этих рядов. На рис. 3. приведены разности фаз «LWS-нагрузки – исходная сезонность координат» для вертикальной и широтной компонент.

Видно, что синфазность этих рядов явление исключительное. В среднем разность фаз составляет 1–2 месяца для вертикальной составляющей и несколько больше для горизонтальных координат с существенно большим разбросом от станции к станции. При этом если для вертикальной составляющей исходных ГНСС-рядов экстремумы вариаций в среднем близки к началу года (минимум) и к его середине (максимум), то для модельных LWS-нагрузок минимальные значения сосредоточены с конца марта по начало апреля, а максимальные с конца августа по начало сентября.

Дискуссия и Выводы

Таким образом наши результаты свидетельствуют об относительной адекватности моделей LWS-нагрузок тем территориям, где почвы позволяют в достаточной степени накапливаться грунтовыми водами. В целом же их применение, как практически гармонический процесс, вполне замещается использованием МНК модели (1), всегда точно соответствующей ряду положений конкретной ГНСС-станции. При этом учёт атмосферных нагрузок в ГНСС-положениях необходим при особо точных геодезических исследованиях. Проверить оба эти утверждения можно сравнив в случайном и систематическом отношении результаты вычисления поля скоростей станций с учётом и без соответствующих модельных поправок за атмосферные и LWS-нагрузки. Для этого нами были вычислены средние по всем 555 станциям разности скоростей станций

($dV = V_{load} - V_{origin}$) для всех вариантов учёта нагрузок (V_{load}) по отношению к исходной оценке (V_{origin}). При этом в исходных рядах (V_{origin}) учтена сезонность по модели (1), так как в противном случае её влияние доминировало бы в величине ошибок dV . Данные суммированы в табл. 1.

Табл. 1: Средние разности скоростей $dV = V_{load} - V_{origin}$ в мм/год

dV_U		dV_N		dV_E	
атм	LWS	атм	LWS	атм	LWS
-0.02	+0.26	+0.01	-0.01	0.00	+0.10
$\pm .15$	$\pm .46$	$\pm .02$	$\pm .09$	$\pm .02$	$\pm .14$

Видно, что влияние на координаты атмосферных нагрузок не вносит систематических ошибок в оценки скоростей, в то время как использование LWS-нагрузок приводит к смещению оценок не только в вертикальной составляющей, но и в долготной. Кроме того, величина вариаций этих разностей от станции к станции, судя по приведённым дисперсиям, также минимальна при применении атмосферных нагрузок и резко возрастает при применении LWS-нагрузок.

В БДС представлены данные по скоростям в двух вариантах: 1) вычисленные с учётом модели (1) с помощью МНК (V_{lss}), и 2) просто медианная оценка скоростей (V_{med}) без учёта сезонности по (1). В табл. 2 представлены средние разности скоростей ($dV = V_{lss} - V_{med}$), полученные этими методами, в зависимости от продолжительности наблюдений (dT) при учёте только атмосферных нагрузок.

Табл. 2: Средние разности скоростей $dV = V_{lss} - V_{med}$ в мм/год. dT в годах

dT/N	dV_U	dV_N	dV_E
2/839	$-0.03 \pm .95$	$-0.02 \pm .33$	$-0.01 \pm .29$
4/555	$-0.02 \pm .44$	$-0.01 \pm .17$	$-0.01 \pm .12$
6/388	$-0.04 \pm .32$	$+0.01 \pm .12$	$-0.01 \pm .10$

Очевидно отсутствие систематических разностей для всех составляющих скоростей и быстрое уменьшение их разброса от станции к станции с ростом dT , что говорит о снижении влияния сезонности при увеличении продолжительности наблюдений. Видно, что при $dT > 2$ лет уровень ошибок внешней сходимости между станциями становится сравним с внутренними ошибками скоростей на каждой станции.

Таким образом проведённое исследование доказывает неадекватность модельных LWS-нагрузок реальным наблюдательным данным на территории ВЕП, в связи с чем данные нагрузки в дальнейшем не будут использоваться при формировании Пулковской БДС.

Список литературы

- Горшков и др., (2012). Горшков, В.Л., С. С. Смирнов, Н. В. Щербакова. Нагрузочные эффекты в ГНСС-наблюдениях при исследовании региональной геодинамики. Вестник Санкт-Петербургского университета, серия 1: Мат, Мех, Астр. 2012, №2, с. 148–156.
- Горшков, Щербакова (2016). Горшков, В.Л., Н. В. Щербакова. Сравнение нагрузочных моделей и ГНСС-систем ГЛОНАСС и GPS в рядах положений станций. Труды ИПА РАН. 2016, Вып.37, с. 68–71.
- Горшков, Щербакова (2017). Горшков, В.Л., Н. В. Щербакова. Анализ синфазных помех в региональных ГНСС-сетях, Труды ИПА РАН. 2017, Вып. 42, с. 95–100.
- Горшков и др., (2021). Горшков В. Л., А. В. Мохнаткин, Н. В. Щербакова. База скоростей станций ГНСС Восточно-Европейской платформы для решения научных и прикладных задач. Геодезия и картография. 2021, 1, с. 34–44. (doi: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-34-44).
- Petrov and Boy (2004). Petrov, L., and J.-P. Boy. Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. JGR, 109, B03405, (doi:10.1029/2003JB002500). (<http://massloading.net>).

About the influence of the loading effects on the results of research by GNSS observations

V.L. Gorshkov¹, N.V. Scherbakova¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 30 October 2024 / Accepted 6 December 2024

Abstract

According to the data of the GNSS station velocity database (VDB) maintained at the Pulkovo Observatory, the correspondence of model loadings on station coordinates due to seasonal variations in Land Water Storage (LWS) to the real seasonal variations in coordinates estimated by the least squares method has been studied. It is shown that the model loadings from variations of LWS on the positions of GNSS stations in most cases are not adequate to the real seasonal variations of station coordinates for the studied territory of the Eastern European Craton.

key words: loading effects at GNSS station positions, common mode errors in GNSS station networks, influence of meteorological parameters on station positions