

УДК 528.481

**ВАРИАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОТ,  
ВЫЗВАННЫЕ КОЛЕБАНИЯМИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ,  
ОСАДКОВ И УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ПЛОЩАДКЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВА УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Морозов А.В., Баранов В.Н.**

*ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству, Москва,  
e-mail: morarte@yandex.ru*

При строительстве уникальных зданий и сооружений (УЗиС) используются передовые технологии и высокоточное оборудование (спутниковые многочастотные приемники, высокоточные нивелиры и тахеометры, абсолютные и относительные гравиметры). В статье рассмотрены вопросы вариаций геодезических высот при строительстве и эксплуатации уникальных зданий и сооружений, способы оценки современных движений земной поверхности (СДЗП) с помощью спутникового оборудования. Получены числовые подтверждения вариаций эллипсоидальных высот в зависимости от сезона выполнения наблюдений вдоль крупных рек, озер или водохранилищ, где наблюдаются вариации силы тяжести и уровня грунтовых вод. Геометрическое нивелирование зависит от отсчетной поверхности и дает объективную оценку деформаций зданий и сооружений и СДЗП при небольших расстояниях между исходными пунктами и площадкой строительства, особенно с учетом современной точности цифровых нивелиров. Спутниковые наблюдения не зависят от уровенной поверхности и изменения координат и высот, демонстрируют реальные изменения движения земной поверхности, зависящие от точности самих спутниковых наблюдений, а также метода обработки. Метод PPP с вводом поправок за атмосферу и учетом движения литосферных плит позволяет получить миллиметровую точность и применим для реальной оценки СДЗП. Предложен критерий выбора зон влияния вариаций силы тяжести. Доказана связь уровня грунтовых вод и силы тяжести.

**Ключевые слова:** вариация геодезических высот, уникальные здания и сооружения, реальная оценка СДЗП, уровень грунтовых вод, сила тяжести, метод PPP, эллипсоидальная высота, высокоточное нивелирование, корреляция

**VARIATIONS OF GEODETIC HEIGHTS CAUSED BY FLUCTUATIONS  
IN GRAVITY, PRECIPITATION AND GROUNDWATER LEVEL  
AT THE CONSTRUCTION SITE OF UNIQUE BUILDINGS AND STRUCTURES**

**Morozov A.V., Baranov V.N.**

*State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: morarte@yandex.ru*

Advanced technologies and high-current equipment (satellite multi-frequency receivers, high-precision levellers and tachometers, absolute and relative gravimeters) are used in the construction of unique buildings and structures (UBaS). This paper deals with the issues of variations of geodetic heights during the construction and operation of unique buildings and structures, methods for assessing modern movements of the Earth's surface (MMoES) using satellite equipment. Numerical confirmations of variations of ellipsoidal heights were obtained depending on the season of observations along large rivers, lakes or reservoirs, where variations in gravity and groundwater level (GWL) are observed. Geometric leveling depends on the reference surface and provides an objective assessment of the deformations of buildings and structures and MMoES at small distances between the starting points and the construction area, especially given the modern accuracy of digital levels. Satellite observations do not depend on the level surface and changes in coordinates and heights demonstrate real changes of the MMoES and depending on the accuracy of the satellite observations themselves, as well as the processing method. The PPP method with the introduction of corrections for the atmosphere and taking into account the movement of lithospheric plates, allows you to obtain millimeter accuracy and is applicable for a real assessment of the MMoES. A criterion for selecting zones of influence of gravity variations is proposed. The correlation of the groundwater level and gravity is proved.

**Keywords:** variation of geodesic heights, unique buildings and structures, real assessment of the MMoES, groundwater level (GWL), gravity, PPP method, high-precision leveling, ellipsoidal height, correlation

Согласно действующим нормативным документам [1], [2], для УЗиС средняя квадратическая погрешность (СКП) определения значений вертикального смещения наиболее удаленного пункта должна быть не более 1,0 мм.

Если учесть, что измерения во всех циклах равноточны, то СКП определения высоты пункта в слабом месте сети (наиболее

удаленного пункта от исходных реперов) не должна превышать:

$$M_{H_i} \leq \frac{m_s}{\sqrt{2}} = 0,7 \text{ мм,}$$

где  $m_s$  – СКП определения вертикального смещения;

$M_{H_i}$  – СКП определения высоты пункта.

Для соблюдения таких требований необходимы не только высокоточные инструменты, но и соблюдение специальных методов наблюдений и учет всех факторов.

Целями исследования являются демонстрация сезонных вариаций силы тяжести и геодезических высот, оценка коррелированности вариаций силы тяжести с уровнем грунтовых вод и результатами спутниковых наблюдений.

В статье приводится критерий выбора зон учета вариаций силы тяжести. Для пунктов, попадающих в эти зоны, предлагается проводить оценку устойчивости с помощью спутниковых методов.

На основе результатов нескольких циклов наблюдений (гравиметрических, гидрологических, высокоточного геометрического нивелирования, спутниковых наблюдений) обнаружена зависимость геодезических наблюдений от уровня грунтовых вод. В данной статье будет рассмотрено влияние уровня грунтовых вод на эллипсоидальные (геодезические) высоты.

Для учета сезонных вариаций предлагается проводить минимум два цикла комплексных наблюдений при максимальном и минимальном уровне вод на площадках строительства УЗиС вблизи крупных водоемов.

#### **Материалы и методы исследования**

Материал исследований получен по результатам абсолютных гравиметрических наблюдений, данных от пьезометрических скважин и гидрологических постов, высокоточного геометрического нивелирования I класса и спутниковых наблюдений на одной из площадок строительства УЗиС.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Согласно исследованиям [3] выявлено изменение силы тяжести из-за уровня грунтовых вод и в зависимости от сезона выполнения гравиметрических наблюдений на площадке строительства УЗиС.

По данным, приведенным в работе А.П. Юзефовича [4, с. 141], а также согласно инструкции по развитию Государственной гравиметрической сети России [4] подъем грунтовых вод на 1 м в слое песка с плотностью  $0,4 \text{ г/см}^3$  вызывает изменение силы тяжести на 17 мкГал.

На основе научных трудов и инструкций выбран критерий влияния вариаций силы тяжести в качестве удвоенного значения изменения силы тяжести за 1 м повышения уровня грунтовых вод – 35 мкГал.

Данный критерий позволил выбрать пункты, на которые распространяется методика учета вариаций силы тяжести.

При строительстве УЗиС необходимо соблюдать высокие требования к точности и методике выполнения работ. Неучет сезонных вариаций вызывает погрешности в оценке СДЗП, а также вносит погрешности при строительстве УЗиС.

Как пример, поправка за температуру может достигать нескольких миллиметров в измеренные превышения и должна учитываться при обработке высококлассного нивелирования [5].

Основная методика учета вариаций силы тяжести – подсчет отклонений отвесных линий (УОЛ) и ввод соответствующей поправки в измеренное превышение [7, с. 25].

Результаты высокоточного геометрического нивелирования зависят от отсчетной поверхности и дают объективную оценку деформаций зданий и сооружений и СДЗП на небольших расстояниях между исходными пунктами геодезического полигона (ГДП) и площадкой строительства, особенно с учетом точности современных цифровых нивелиров.

В рамках исследования предлагается подход, позволяющий дополнительно к измерениям традиционными геодезическими методами в поле силы тяжести Земли использовать спутниковые методы, в основе которых лежит геометрическая правильная и неизменная эллипсоидальная высота, исходя из теории геодезических высот.

На сегодняшний день множество работ посвящено точности определения геодезических высот спутниковыми методами [6-8].

Научная работа И.М. Кравчука [9] посвящена спутниковому нивелированию и оценке точности полученных геодезических и нормальных высот.

В целом, можно утверждать, что спутниковое нивелирование при соблюдении ряда условий позволяет получить точность нивелирования IV класса и в редких случаях – III класса (10 мм на 1 км).

Точность геодезических высот позволяет применять метод ГНСС для геодезических исследований.

А.В. Устинов в своей работе доказал эффективность метода Precise Point Positioning (PPP) на Загорской ГАЭС-2, получив точность абсолютных координат 2 мм в плане и 5 мм по высоте [12]. Работы [13-15] посвящены исследованиям метода PPP.

**Таблица 1**

Разность эллипсоидальных высот на пунктах исследования, определенных методом PPP с 2017 по 2021 гг.

Месяц и год наблюдений	Пункт 3 δН, мм	Пункт 4 δН, мм	Пункт 0 δН, мм
Сентябрь 2018	6	17	-170
Март 2019	-64	-29	112
Август 2019	48	-11	104
Март 2020	-4	-26	-113
Апрель 2021	18	-26	-3

**Таблица 2**

Корреляционный анализ между уровнем грунтовых вод и силой тяжести на гравиметрических пунктах исследования

ID	ГР2-1 и g2-1	ГР3-2 и g3-2	ГР4-3 и g4-3	ГР5-4 и g5-4	ГР6-5 и g6-5
Пункт 02	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Пункт 05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Пункт 09	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Пункт 0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Пункт 11	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Пункт 13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Пункт 14	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Пункт 15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Пункт 16	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Пункт 20	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Пункт 21	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Пункт 23	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Пункт 27	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Пункт 28	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

В результате выполненных спутниковых наблюдений на трех пунктах принудительного центрирования (ППЦ или РРС) были получены координаты и высоты методом Precise Point Positioning (PPP), обработанные в одном из сервисов (CSRS-PPP Magic GNSS Trimble RTX, GrafNet). Схема расположения пунктов представлена на рисунке 1. Межцикловое сравнение геодезических высот от сезона к сезону представлено в таблице 1.

Данные изменения уровня грунтовых вод на исследуемой площадке строительства УЗиС представлены в статье [3]. Исходя из многолетних наблюдений, минимум приходится на март – апрель, максимум – на август – сентябрь.

В результате исследования доказана коррелированность значений силы тяжести и изменения уровня грунтовых вод (рис. 2, табл. 2) для пунктов исследования (рис. 3).

Аномальные изменения наблюдаются на пункте, расположенном непосредственно у реки, – Пункт 0, при этом пункты Пункт 4 и Пункт 3 демонстрируют стабильность в нескольких циклах наблюдений (рис. 3).

В ходе обследования Пункта 0 не были выявлены какие-либо повреждения с 2017 по 2021 гг.

Можно утверждать, что существенное изменение эллипсоидальной высоты (превышающее годовое движение литосферной плиты и атмосферную нагрузку) является критерием неустойчивости пункта и служит реальной оценкой СДЗП.

В качестве независимого доказательства сезонности изменения геодезических высот за гидрологические эффекты взяты данные с пунктов ДНАК и BRN2 с официального сайта службы ITRF [16].



Рис. 1. Пункты исследования на площадке строительства УзиС

Изменение в пространстве пункта ITRF ДНАК представлено на рисунке 4. Удаленность между площадкой УзиС и пунктом ITRF ДНАК – порядка 130 км. Надо отметить, что г. Дакка подвержен сезонным наводнениям, что не раз освещалось в СМИ.

При увеличении масштаба становится отчетливо видна периодичность изменений геодезических высот пункта ДНАК с минимальной и максимальной амплитудой в апреле и сентябре, что согласовывается с изменением грунтовых вод на площадке УзиС.

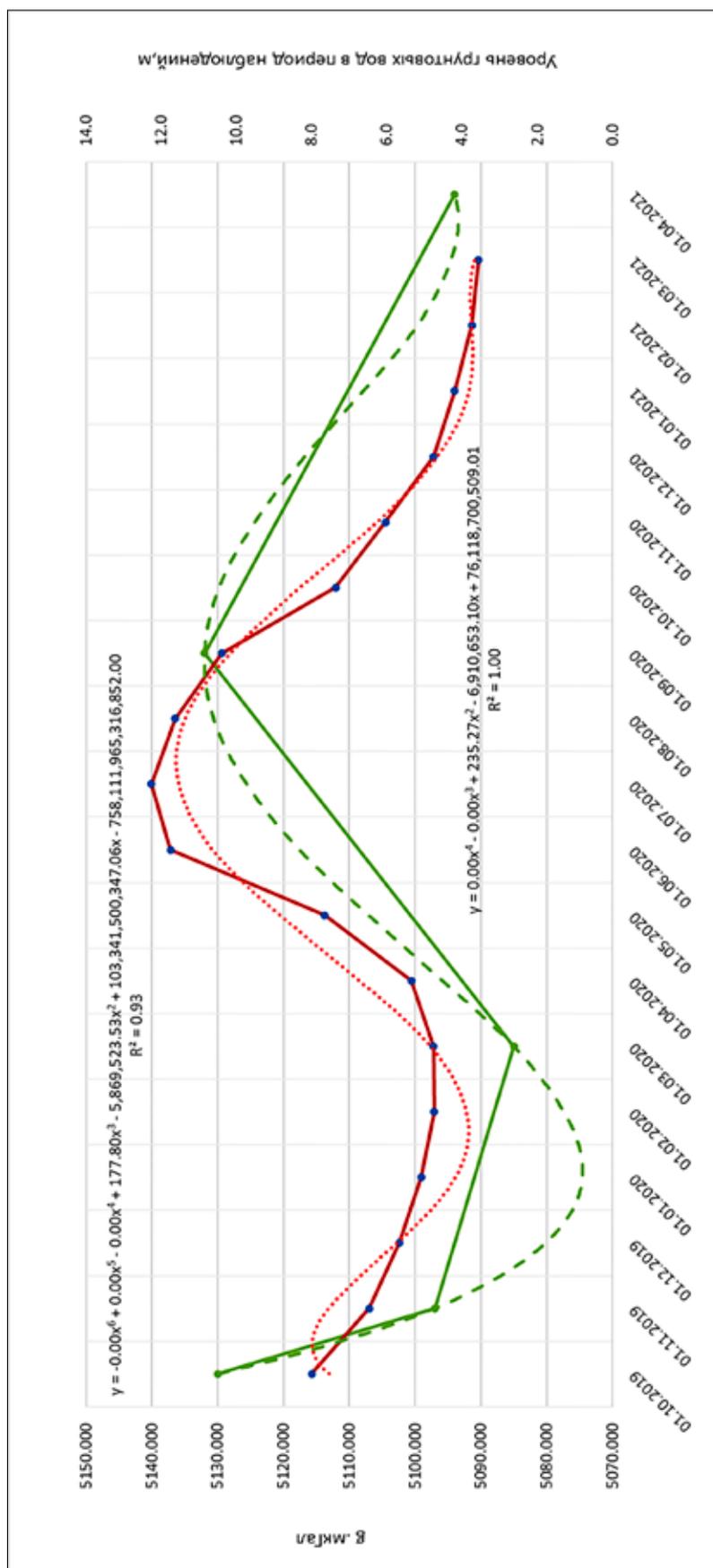


Рис. 2. График зависимости силы тяжести на пункте у реки от уровня грунтовых вод

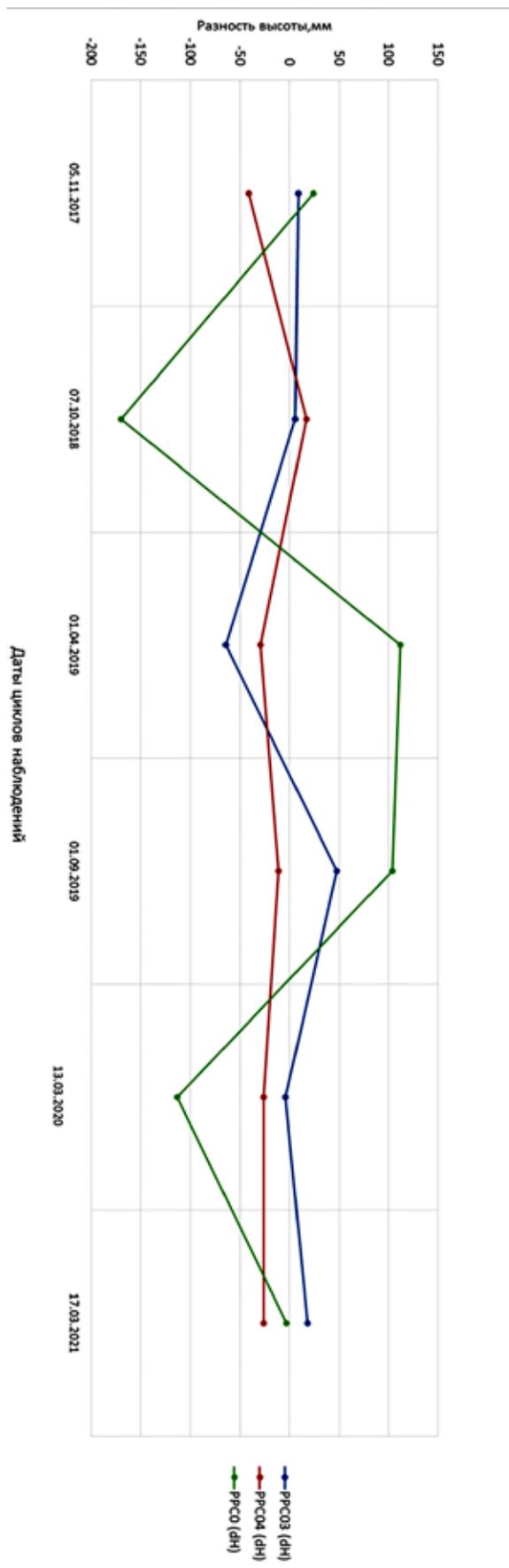


Рис. 3. Графики изменения эллипсоидальной высоты с 2017 по 2021 гг. на пунктах исследования

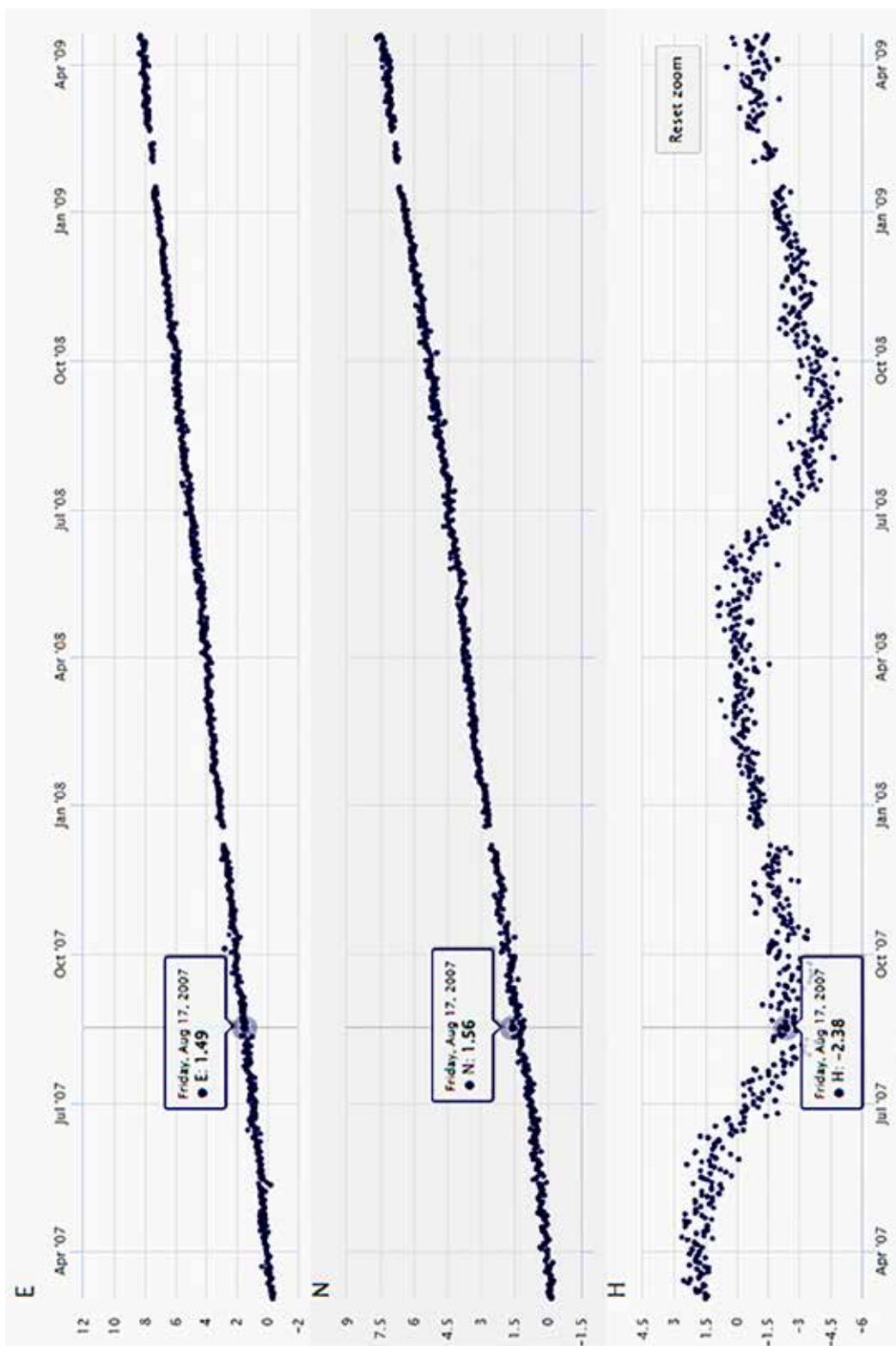


Рис. 4. Динамика изменения положения пункта ITRF DHAК

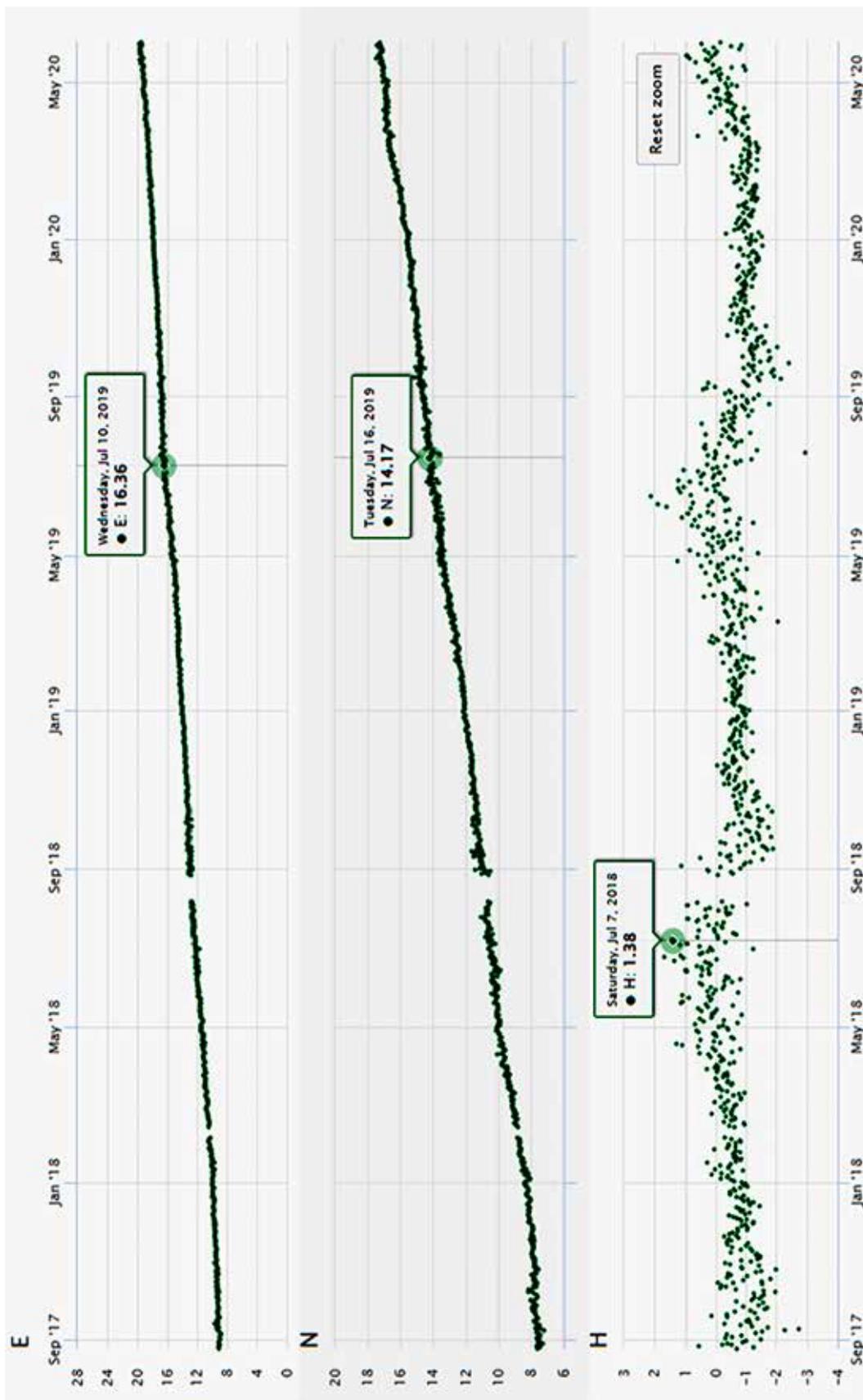


Рис. 5. Динамика изменения положения пункта ITRF BRN2

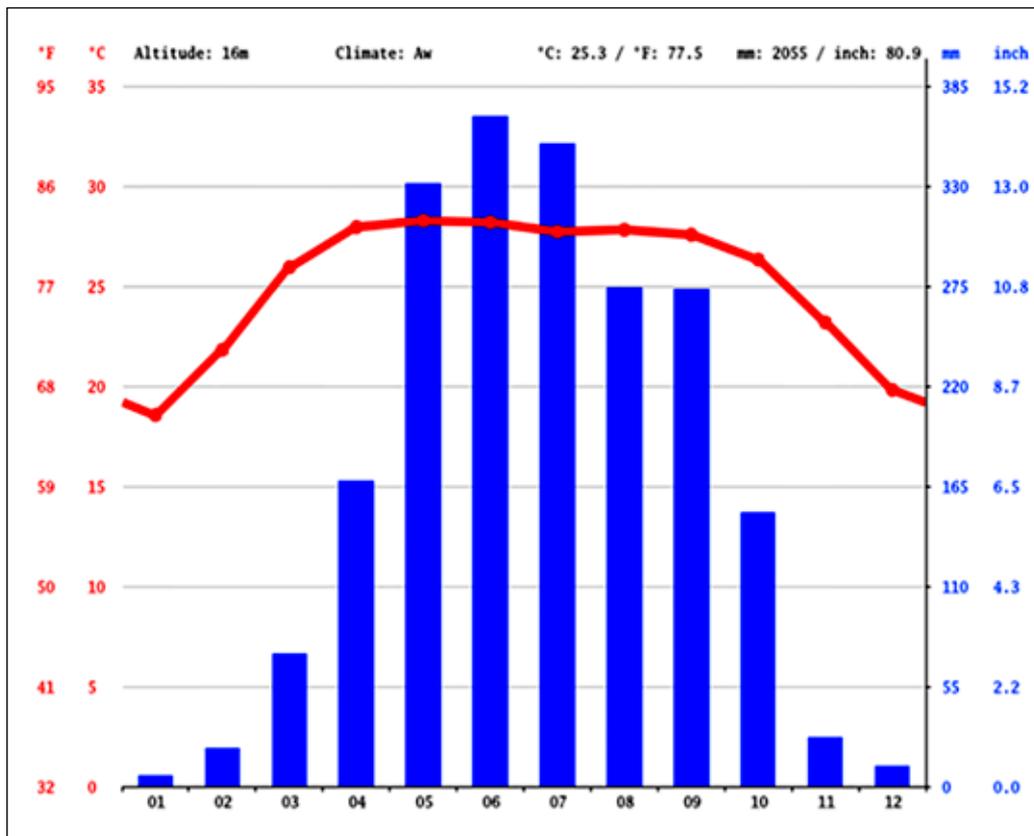


Рис. 6. Среднемесячная сумма осадков для г. Дакка

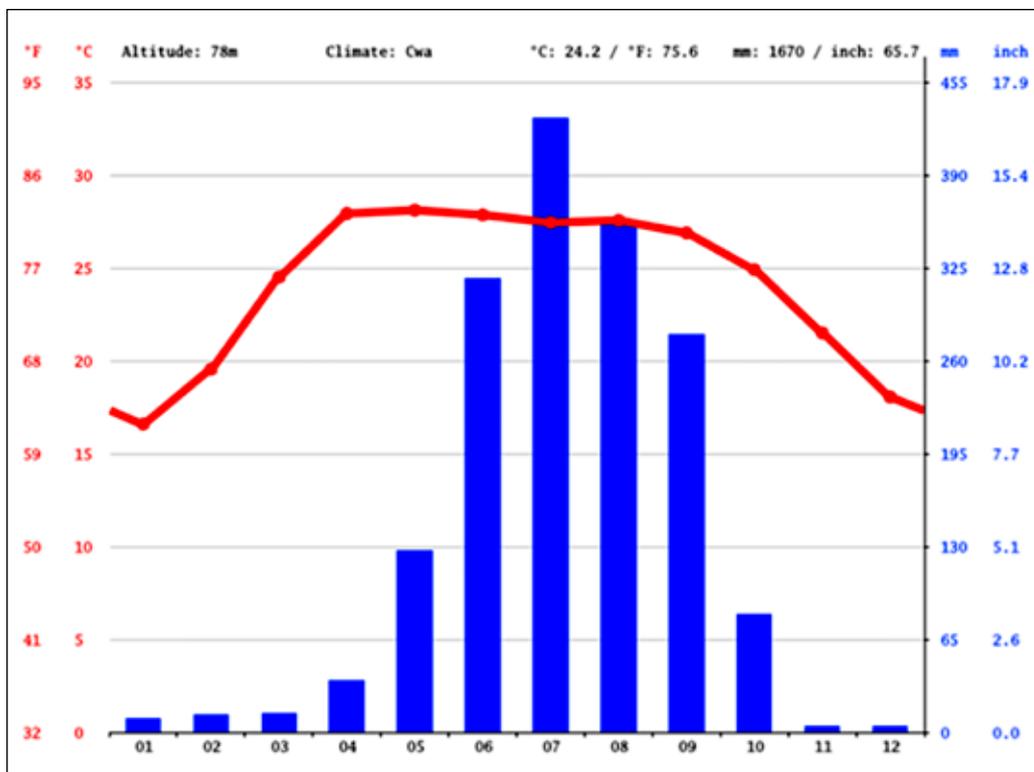


Рис. 7. Среднемесячная сумма осадков для г. Биратнагар

Другая ситуация наблюдается с пунктом ITRF BRN2, расположенным в г. Биратнагаре в Непале. Данные ограничены 2020 г. Город расположен далеко от рек, траектория изменения BRN2 представлена на рисунке 5.

Информация о среднемесячных осадках г. Дакка и г. Биратнагар представлена на рисунках 6 и 7.

В статье [17] описано, что атмосферные нагрузки приводят к изменениям геодезических высот порядка 5 мм. При движении литосферных плит порядка 4 см полугодовое смещение составит 20 мм.

### Заключение

В результате полученных данных было подсчитана разность эллипсоидальных высот в зависимости от сезона наблюдений. Эти данные доказывают зависимость геодезических высот от сезона наблюдений.

Объединив результаты ранее выполненных исследований [3], получаем зависимость силы тяжести и геодезических высот от гидрологических изменений.

Статья [18] также подтверждает корреляционную зависимость между уровнем грунтовых вод и силой тяжести. Используя модель затопления [19, с. 69, 89], возможно построить единую модель изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод на площадках УЗиС вблизи водоемов с высокими требованиями к точности геодезических работ.

Предлагается с помощью спутниковых технологий проводить реальную оценку устойчивости пунктов на основе абсолютных наблюдений по методу PPP и проводить измерение современного движения земной поверхности за вычетом других физических факторов.

Вариации за гидрологию можно разделить на две категории:

первая категория – вариации, связанные с крупными водоемами;

вторая категория – вариации, связанные с осадками.

При этом амплитуда вариаций первой категории почти в два раза превышает амплитуду второй категории.

При закладке пунктов немаловажным является учет агрессивного воздействия среды. Рекомендации по учету приведены в [20].

Результаты исследования предлагается использовать для создания методики учета сезонных вариаций в результате геодезических измерений.

### Список литературы

1. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений: дата введения 01.01.1975. М.: Стройиздат, 1975. 95 с.

2. ГОСТ 24846-2019 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений: дата введения 01.01.2021. М.: Стандартинформ, 2020. 13 с.

3. Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. 2022. № 4. С. 92-97.

4. Юзефович А.П. Поле силы тяжести и его изучение. М.: МИИГАиК, 2014. 194 с.

5. ГКИНП (ГНТА)-04-122-03. Инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России: дата введения 2004.02.01. М.: Роскартография, 2004. 108 с.

6. ГКИНП (ГНТА)-03-010-03 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов: дата введения 01.02.2004. М.: Роскартография, 2004. 120 с.

7. Кузьмин В.И. Гравиметрия. Новосибирск: СГТА, 2011. 193 с.

8. Кутушев Ш-И.Б. Геосистемные исследования процессов формирования зон геодинамических рисков региональных нефтегазоносных территорий (на примере Башкирии): специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... докт. тех. наук. Москва, 2021. 48 с.

9. Маркович К.И. Совершенствование геодезических методов мониторинга геодинамических процессов с привлечением глобальных моделей Земли и обеспечением многодисциплинарного подхода: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2021. 24 с.

10. Остроумов Л.В. Разработка технологии определения нормальных высот с использованием спутникового метода на акватории морей: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2011. 24 с.

11. Кравчук И.М. Разработка методов вычисления нормальных высот по результатам спутниковых измерений в инженерно-геодезических работах: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2010. 24 с.

12. Мельников А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинамических исследованиях его применения в геодинамических исследованиях // Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. № 6. С. 605-615.

13. Терещенко В.Е., Лагутина Е.К. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений / В.Е. Терещенко // Вестник СГУ-ГиТ. 2019. Т. 24. № 2. URL: [https://geocartography.ru/source/vestnik\\_ssugt/2019\\_2\\_76-94](https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2019_2_76-94) (дата обращения: 21.01.2023).

14. Трофимов Д.А. Определение координат пунктов из ГНСС-наблюдений методом PPP: учебное пособие. СПб., 2019. 73 с.

15. Устинов А.В. Разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания (на примере здания Загорской ГАЭС-2): дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2022.

16. International Terrestrial Reference Frame (ITRF): [Электронный ресурс]. URL: <https://itrf.ign.fr/en/homepage> (дата обращения: 23.01.2023).

17. Калинин В.В., Устинов А.В., Косарев Н.С. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 3. С. 34-41.

18. Костицын В.И. О корреляционной зависимости между колебаниями уровня грунтовых вод и изменениями силы тяжести // Электронная библиотека Полоцкого государственного университета. 2016. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/18390> (дата обращения: 23.01.2023).

19. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.

20. ГОСТ 31384-2017: дата введения 2018.03.01. М.: Стандартинформ, 2018. 50 с.