

**ВАРИАЦИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ  
ИЗ-ЗА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД  
НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА  
УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К.**

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

Рассмотрены вопросы влияния уровня грунтовых вод на результаты измерения силы тяжести, способы вычислений абсолютных значений силы тяжести. Получены числовые подтверждения вариаций силы тяжести в зависимости от сезона выполнения гравиметрических наблюдений вдоль реки, озера или водохранилища. Предложен вариант учета уровня грунтовых вод в качестве более детального варианта поправки за промежуточный слой (редукция Буге) по результатам геологических, геофизических, гидрологических и сейсмологических изысканий на площадке строительства уникальных зданий и сооружений (УЗиС). Подробное исследование грунта на площадке строительства позволяет составлять детальные гравиметрические карты аномалий силы тяжести крупных масштабов на локальном участке строительства, что в свою очередь дает возможность вычислить уточненные аномалии высот и уклонения отвесных линий, вычислить реальную плотность топографических масс ( $\delta$ ), исходя от типа, влажности и пористости грунта. Сравнение вычисленных аномалий высот с гравитационными моделями Земли позволяет дать оценку их использования на площадке строительства. Точные данные по аномалиям высот и уклонениям отвесных линий разрешают вопрос вычисления поправок в результаты высокоточного нивелирования, напрямую переходящий от геодезических высот, полученных спутниковыми методами, к нормальным. С увеличением количества сезонных наблюдений возможно спрогнозировать последующие мониторинговые наблюдения, вносить в результаты измерений поправки, что исключает ошибки при оценке осадки и деформаций зданий и сооружений и дает более ясную картину изменений движений зданий и земной поверхности. При прогнозировании будет полезен тот же комплексный подход, который использовался при вычислении поправки за влияние топографических масс.

**Ключевые слова:** грунтовые воды, сила тяжести, редукция Буге, аномалия высоты, аномалия силы тяжести, высокоточное нивелирование, геодезическая высота, нормальная высота

**GRAVITY VARIATIONS CAUSED BY GROUNDWATER  
LEVEL IMPACT AT A SITE FOR CONSTRUCTION  
OF UNIQUE BUILDINGS AND STRUCTURES**

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

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

This paper addresses the impact of the groundwater level on gravity measurement results, and absolute gravity calculation methods. The authors obtained numerical evidence of gravity variations depending on the seasons of gravity measurements along a river, lake or water basin. The paper suggests how to incorporate the groundwater level (GWL) as a more detailed middle layer correction (Bouguer reduction) based on geological, geophysical, hydrological and seismological studies at a site for construction of unique buildings and structures (UBaS). Detailed soil studies at the construction site allow plotting large-scale maps of gravity anomalies at a local construction site to calculate more precise height anomalies and plumbline deviations, true density of topographic masses ( $\delta$ ) based on the soil type, water content and density. Comparison of the calculated height anomalies with Earth's gravity models will help in assessment of their use at the site. Precise data on height anomalies and plumbline deviations resolve a problem of calculating corrections to high-precision leveling results and makes it possible to switch directly from geodetic heights obtained by satellite methods to normal heights. With greater scope of seasonal observations, subsequent monitoring observations can be forecasted and corrections can be applied to measurements results in order to avoid errors when estimating settlements and deformations of the buildings and structures and understand changes in displacement of the buildings and ground surface more clearly. The same integrated approach as used for calculating topographic mass corrections will be useful in forecasting.

**Keywords:** groundwater, gravity, Bouguer reduction, height anomaly, gravity anomaly, high-precision leveling, geodetic height, normal height

При геодезическом сопровождении и строительстве уникальных зданий и сооружений (УЗиС) используются передовые технологии, связанные с использованием лазерных сканеров, спутниковых высокочастотных многочастотных приемников, беспилотной аппаратуры для рекогносцировки

и получения картографического материала, а также высокоточные нивелиры и тахеометры. Для получения гравиметрической информации на площадке используются абсолютные и относительные гравиметры.

Интересен с научной точки зрения вопрос влияния неприливных явлений на силу

тяжести, насколько это влияние сильно на небольшом участке строительства УЗиС. Ответы на эти вопросы постараются дать составители данной статьи.

Целью исследования является подтверждение влияния уровня грунтовых вод на результаты измерения силы тяжести на строительной площадке УЗиС, расположенных в непосредственной близости от водоемов, получение аномалий силы тяжести и уклонений отвесных линий, их влияние на высокоточное нивелирование, отработка методик гравиметрических наблюдений, прогнозирование и оценка полученных результатов.

### Материалы и методы исследования

Материал исследований был получен по результатам абсолютных гравиметрических наблюдений, данных от пьезометрических скважин и гидрологических постов, а также геологических и геофизических изысканий на площадке строительства УЗиС. В качестве гравиметра для определения абсолютных значений силы тяжести использовался абсолютный гравиметр ГБЛ-М.

Математическая обработка результатов производилась с применением следующих формул.

Среднее весовое значение силы тяжести в серии ( $g_p$ ) определялось по формуле

$$g_p = \frac{\sum_{i=1}^N p_i g_i}{\sum_{i=1}^N p_i}, \quad (1)$$

где  $g_i$  – измеренные значения в каждой серии;

$p_i$  – вес измеренной величины.

Вес измеренных значений силы тяжести вычислялся по известной формуле

$$p_i = \frac{C}{m_i^2}. \quad (2)$$

### Сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести между I и VI циклами наблюдений

Номер цикла	Разность силы тяжести на главных гравиметрических пунктах, мкГал		
	05	06	07
2–1 (октябрь 2019 – ноябрь 2019)	22	2	4
3–2 (март 2020 – ноябрь 2019)	-6	-19	-4
4–3 (март 2020 – сентябрь 2020)	-4	0	0
5–4 (сентябрь 2020 – апрель 2021)	-50	-5	-7
6–5 (апрель 2021 – сентябрь 2021)	30	19	15

Средняя квадратическая ошибка (стандартное отклонение) среднего весового вычисляется по формуле

$$m_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N p_i (g_i - g_p)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^N p_i}}, \quad (3)$$

Всего в исследовании участвовало три гравиметрических пункта. На каждом гравиметрическом пункте выполнялось не менее трех последовательных приемов наблюдений. Количество приемов регулировалось в зависимости от уровня микросейсмического шума. Измерения принимались в работу, если их отклонение не превышало двойной точности прибора согласно ГБЛ. Для ГБЛ технические характеристики прописаны в [1].

Фиксация изменения уровня грунтовых вод с 2019 по 2021 г. представлена на рис. 1.

По результатам гравиметрических наблюдений были получены итоговые значения абсолютных значений силы тяжести с учетом поправки за вертикальный градиент (редукция в свободном воздухе). Далее было выполнено сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести разных циклов наблюдений (таблица). Графическая иллюстрация представлена на рис. 2.

### Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее сильные отличия наблюдаются между циклами наблюдений, выполненных в марте и сентябре 2020 г. Сопоставляя полученные результаты с рис. 1, наблюдаем прямую зависимость с перепадами уровня грунтовых вод и изменением силы тяжести. По полученным данным изменение уровня воды на 8 м изменило силу тяжести на пятом гравиметрическом пункте на 50 мкГал, что соответствует изменению 6 мкГал на 1 м грунтовых вод.

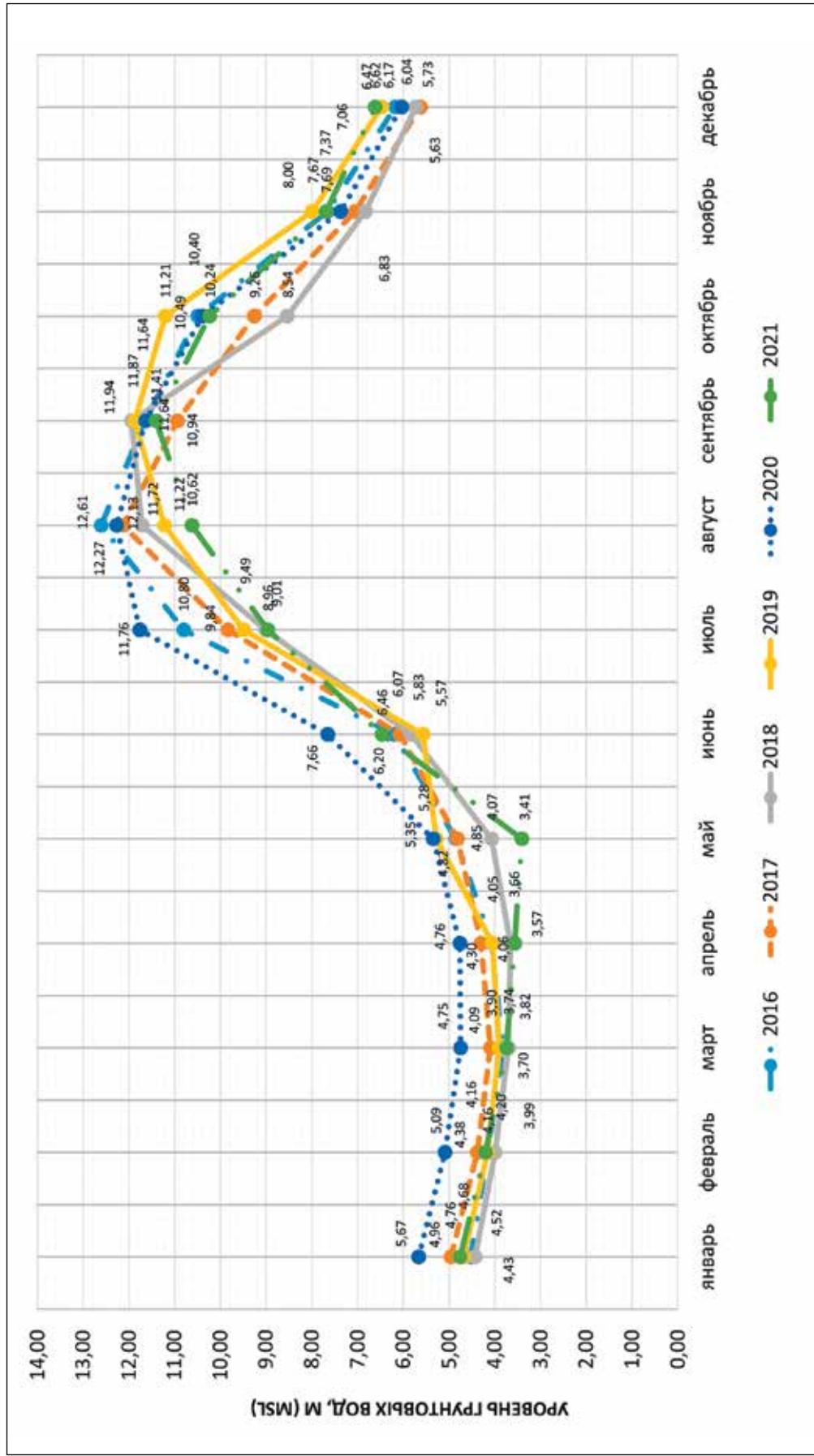


Рис. 1. Изменение уровня грунтовых вод в пьезометрических скважинах с 2016 по 2021 г.  
 на плотине строительства УЗиС вблизи крупной реки

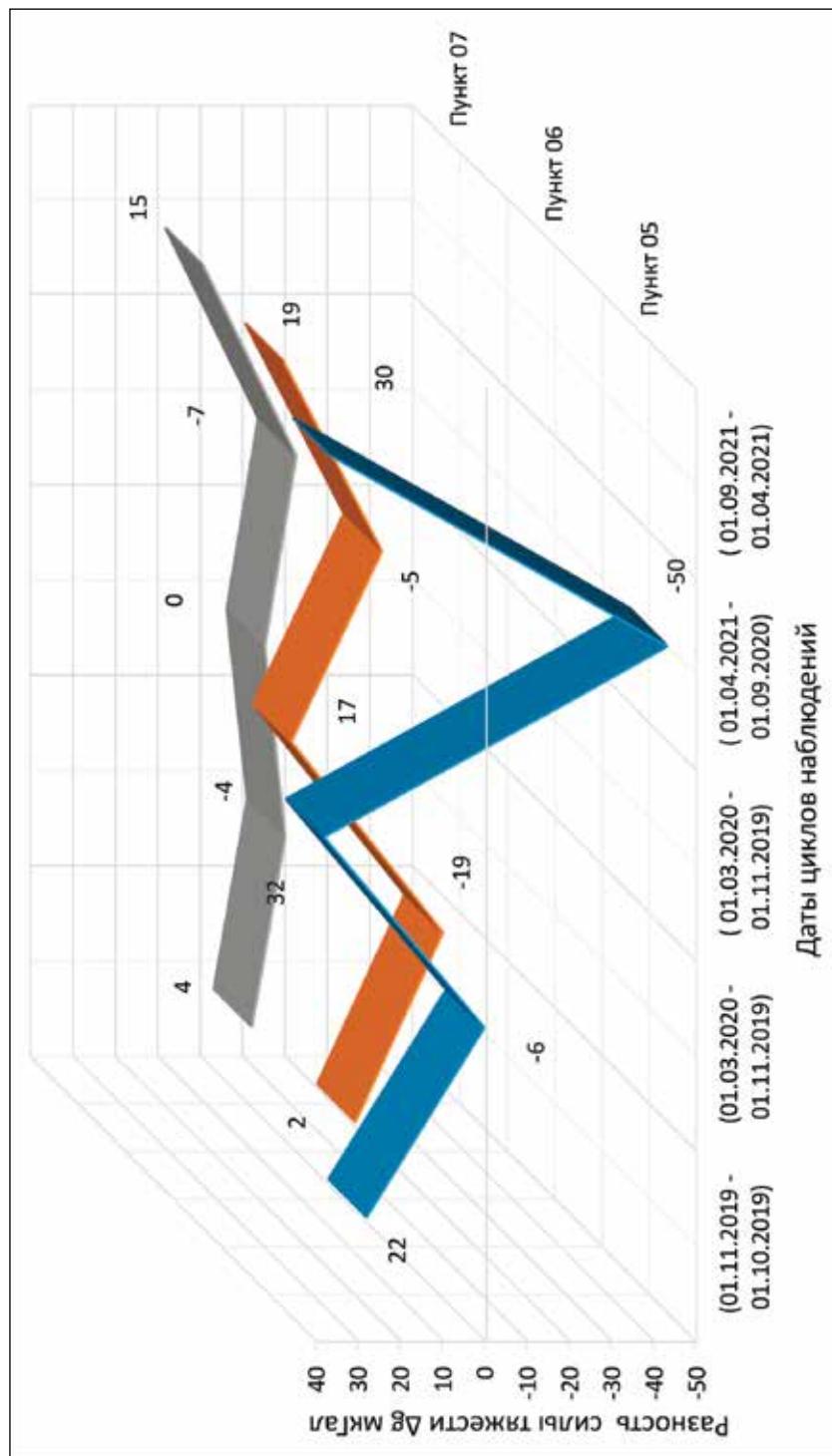


Рис. 2. Результаты сравнения абсолютных значений силы тяжести на главных гравиметрических пунктах в разные циклы наблюдений

Самым очевидным способом учета этих колебаний является детализация формулы поправки за топографические массы (редукция Буге):

$$\Delta g_B = 2\pi G \delta \Delta H_t^m \quad (5)$$

где  $\Delta g_B$  – поправка за влияние топографических масс (аномалия Буге);

$G = 6,673 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$  – постоянная тяготения;

$\delta$  – плотность промежуточного слоя (обычно  $\text{г}/\text{см}^3$ );

$\Delta H_t^m$  – толщина бесконечного плоскопараллельного слоя, см.

С учетом того, что грунт может сменяться водоносным слоем и наоборот, а также вычислив постоянные коэффициенты, общая формула может выглядеть так:

$$\Delta g_B = 0.42 \left( \sum_{n=1}^m \delta_n H_\Pi + \sum_{B=1}^k H_B \delta_s \right), \quad (6)$$

где  $\Delta g_B$  – поправка за влияние топографических масс (аномалия Буге);

$\delta_n$  – плотность преобладающего грунта (обычно  $\text{г}/\text{см}^3$ );

$\delta_s$  – плотность водоносного слоя. Для чистой воды плотность  $1,00 \text{ г}/\text{см}^3$ , морской воды  $1,03 \text{ г}/\text{см}^3$ ;

$H_B$  – общая толщина водоносного слоя, см;

$H_\Pi$  – общая толщина грунта над поверхностью точки наблюдения, см.

Стоит отметить, что пункты расположены в непосредственной близости к реке и удалены от каких-либо дорог, что исключает вероятность внесения в результаты погрешностей.

Впоследствии по полученным данным возможно вычислить аномалии высот и уклонения отвесных линий для внесения конкретных поправок в результаты высокоточного нивелирования. Один из способов приведен в [2, с. 25–26, 89, 107]. Также существуют варианты использования не бесконечнопараллельного слоя, а сферического сегмента (рис. 3, формула (7)) [3, с. 25–28].



Рис. 3. Визуализация сферического и плоскопараллельного слоя

Формула Г.Г. Ремпеля:

$$\Delta_2 g_{C\phi.cl} = 2\pi G \delta \left[ \left( \frac{1}{3R^2} (R^3 - R_0^3 + dL - d_0 L_0) - R^2 \sin \alpha \cos \alpha \ln \frac{d + R - R \cos \alpha}{d_0 + R_0 - R \cos \alpha} \right) \right], \quad (7)$$

где  $\Delta_2 g_{C\phi.cl}$  – поправка за влияние топографических масс при сферическом сегменте (вариация редукции Буге);

$$\alpha = \frac{S}{R_0} - \text{угол сферического сегмента}$$

$$R = R_0 + H ;$$

$$d = R\sqrt{2(1-\cos \alpha)} ;$$

$$d_0 = \sqrt{R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \alpha} ;$$

$$L = R^2 (\cos \alpha + 3 \cos^2 \alpha - 1) ;$$

$$L_0 = R_0^2 + RR_0 \cos \alpha + 3R^2 \cos^2 \alpha - 2R^2 .$$

### Заключение

Многие авторы в своих трудах приводили влияние непараллельности уровенных поверхностей и учета этих поправок в измеренные превышения [4, с. 36]. В работах Юзефовича [5, с. 139, 140] также дана характеристика влияния уровня грунтовых вод на силу тяжести. Согласно его данным, изменение плотности грунта толщиной в 1 м на 0,2 г/см<sup>3</sup> приведет к изменению силы тяжести на 8 мкГал, а подъем грунтовой воды на 1 м в слое песка с плотностью 0,4 г/см<sup>3</sup> на 17 мкГал.

В результате проведенного исследования были получены численные подтверждения влияния изменения уровня грунтовых

вод на гравитационное поле на строительной площадке вблизи крупных водоемов. Перемещение массы воды влияет на гравитационное поле, изменяет наклон уровенной поверхности и создает упругие деформации земной поверхности [6]. В результате по вычисленным аномалиям можно вычислить уклонения отвесных линий и аномалии высот на строительной площадке [7].

### Список литературы

1. ГКИИП (ГНТА)-04-252-01. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. М.: ЦНИИГАиК, 2001. 67 с.
2. Кузьмин В.И. Гравиметрия. Новосибирск: СГГА, 2012. 163 с.
3. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь: УрО РАН, 2015. 142 с.
4. Огородова Л.В. Нормальное поле и определение аномального потенциала. М.: 2012. 36 с.
5. Юзефович А.П. Поле силы тяжести и его изучение. М: МИИГАиК, 2014. 194 с.
6. Андреев В.К. Оценивание параметров локальной геодинамики геодезическими методами // X Международная научно-практическая конференция «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. На рубеже веков» (Москва, 14–15 февраля 2019 г.). [Электронный ресурс]. URL: <https://config.com/wp-content/uploads/2019/02/Andreev-Vasilij-Kirillovich-AO-Atomenergoproekt-Otsenivanie-parametrov-lokalnoj-geodinamiki-geodezicheskimi-metodami.pdf> (дата обращения: 07.04.2022).
7. Елагин А.В. Теория фигуры Земли. Новосибирск: СГГА, 2012. 174 с.