

УДК 006.91

ИЗМЕРЕНИЯ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСА НА ИЗВЕСТНОЙ МОСКОВСКОЙ АТТРАКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО АСТРОИЗМЕРИТЕЛЯ

© 2020 г. М. М. Мурзабеков^{1, *}, В. Ф. Фатеев^{1, **}, П. А. Юзефович^{2, ***}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия*

² *Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия*

*E-mail: murzabekov@vniiftri.ru

**E-mail: fateev@vniiftri.ru

***E-mail: p_yuzefovich@miigaik.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 04.03.2020 г.

Принята к публикации 30.05.2020 г.

В работе рассмотрены результаты измерений значений составляющих уклонений отвесной линии (УОЛ) с цифровым астроизмерителем на Московской гравитационной аномалии (аттракции), которая была обнаружена еще в 1850-х годах профессором астрономии Московского университета Б.Я. Швейцером. Статья основана на докладе, сделанном на конференции “Астрометрия вчера, сегодня, завтра” (ГАИШ МГУ, 14–16 октября 2019 г.).

DOI: 10.31857/S0004629920100059

1. ВВЕДЕНИЕ

Отвесной линией называется касательная к силовой линии поля силы тяжести. Направление отвесной линии задает ориентацию вертикальной оси z в топоцентрической (натуральной) системе координат. Угол между отвесной линией и плоскостью земного экватора является астрономической широтой.

Астрономо-геодезическим уклонением отвеса (или отвесной линии — далее УОЛ) называется угол между отвесной линией и нормалью к поверхности отсчетного эллипсоида.

Эта малая величина имеет среднее значение $8''$ (для общеземного эллипсоида) и меняется весьма нерегулярно вследствие неоднородности поля силы тяжести. В горных районах значение УОЛ возрастает, но не превышает $100''$.

УОЛ напрямую связана с разностью астрономических и геодезических координат. Долгое время определение УОЛ было единственным методом изучения формы уровенной поверхности потенциала силы тяжести (т.н. астрономо-геодезический метод) и его знание было необходимо геодезистам для редуцирования угловых измерений на отсчетную поверхность. С развитием гравиметрии появились другие способы решения этой задачи (понимаемой теперь как краевая за-

дача теории потенциала) [1], и в середине XX века астрономо-геодезический метод перестал применяться.

В настоящее время на смену традиционным линейно-угловым измерениям и астроопределениям пришли спутниковые системы и цифровые зенитные телескопы. Появилась возможность на новом уровне вернуться к геометрическому методу изучения формы уровенной поверхности (высот геоида). Кроме того, непосредственное определение УОЛ имеет прежнюю актуальность в задачах, связанных с баллистикой и определением астрономического азимута.

2. МОСКОВСКАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ АНОМАЛИЯ (АТТРАКЦИЯ)

2.1. Обнаружение гравитационной аномалии Б.Я. Швейцером

В 1862 г. из стен типографии Московского университета вышла книга “Исследование местной аттракции, существующей около Москвы”. Эта книга, посвященная анализу аномалий силы тяжести, обнаруженных в окрестностях Москвы, была написана профессором астрономии Московского университета Богданом Яковлевичем (Каспаром Готфридом) Швейцером [2].

Первые измерения составляющей уклонения отвесной линии (УОЛ) по широте (вдоль меридиана) Б.Я. Швейцер провел в 1848 г. (в то время су-

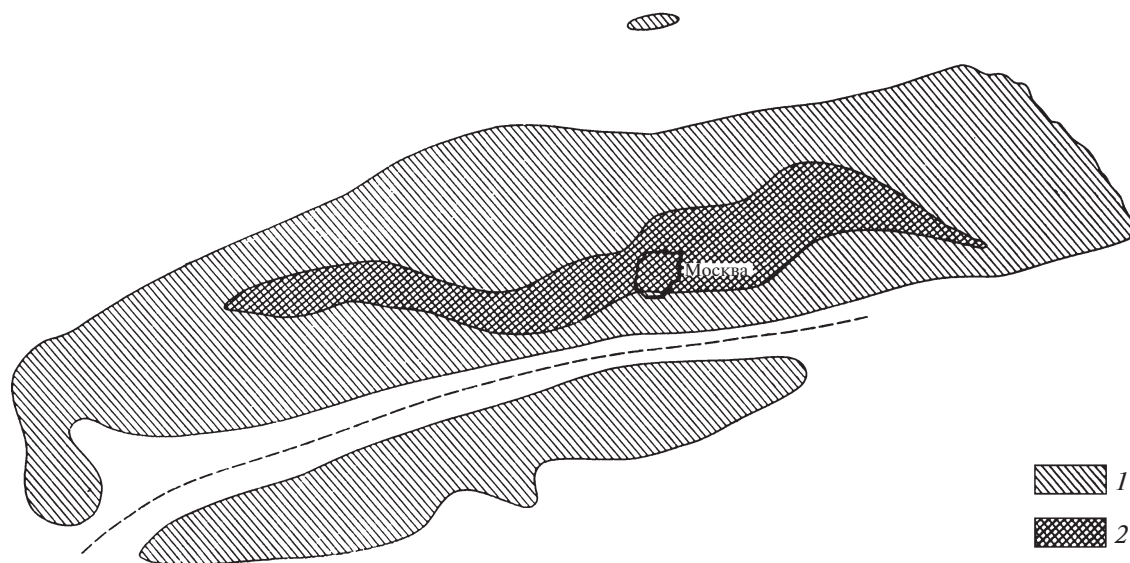


Рис. 1. Окончательная карта уклонений отвеса, измеренных Б.Я. Швейцером с 1848 по 1863 г. в районе Московской гравитационной аномалии.

ществовала возможность определения только этой составляющей УОЛ). Затем в ходе организованных экспедиций в 1853, 1858 и 1859 г. Б.Я. Швейцер при содействии студентов Межевого института осуществил детальную гравиметрическую съемку территории Московской губернии. А в 1862 г. в уже упоминавшейся монографии “Исследования Московской аттракции” Б.Я. Швейцер опубликовал математически обработанные итоги этой съемки, включающие карту УОЛ по широте (рис. 1). На окончательной карте темным цветом заштрихованы участки со значениями уклонения отвесной линии более $4''$ по абсолютной величине, светлым – от $2''$ до $4''$. Области с уклонениями менее $2''$ не заштрихованы. Таким образом, на карте ясно видны структуры аномального распределения подземных масс [3].

2.2. Геологическая структура аттракции

По современным данным Московская аттракция является проявлением геологической структуры, носящей название Подмосковский авлакоген, или глубокий и узкий грабен в фундаменте древней платформы, заполненный осадками (рис. 2).

В соответствии с геологическим строением аттракции, гравитационная аномалия вызвана наличием длинного разлома в кристаллической платформе, на которой находится Московская область [4]. Плотность вещества платформы равна 2.7 г/см^3 , а плотность осадочных пород, которыми сверху покрыта платформа и которыми заполнен разлом, составляет $2.2\text{--}2.3 \text{ г/см}^3$.

Как известно, изменение знака УОЛ для простейшей модели точечной или сферической аномальной массы происходит непосредственно над местом ее залегания [5]. Пример изменения знака УОЛ над точечной аномальной массой представлен на рис. 3.

3. ИЗМЕРЕНИЯ УОЛ НА ИЗВЕСТНОЙ МОСКОВСКОЙ АТТРАКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО АСТРОИЗМЕРИТЕЛЯ

3.1. Описание цифрового астроизмерителя УОЛ

Астроизмерители УОЛ (в зарубежной литературе используется название “цифровая зенитная камера” – digital zenith camera) обеспечивают определение УОЛ в сеансах измерений в режиме реального времени в точке размещения. Эти приборы в силу высокой точности и оперативности получили широкое распространение в ряде стран [6, 7]. Точность существующих стационарных астроизмерителей находится в пределах $0.2''\text{--}0.3''$, а точность единичных измерений может достигать до $0.1''$. Время измерений в точке размещения не более 1.5 ч. Они являются автоматизированными и транспортабельными.

В существующем методе измерений УОЛ телескоп поворачивают вокруг своей оси в горизонтальной плоскости, измерение положения звезд выполняют в двух его противоположных положениях. При этом необходимо:

1) перед началом измерений определить калибровочные коэффициенты – масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра, углы взаимной ориентации осей инклино-

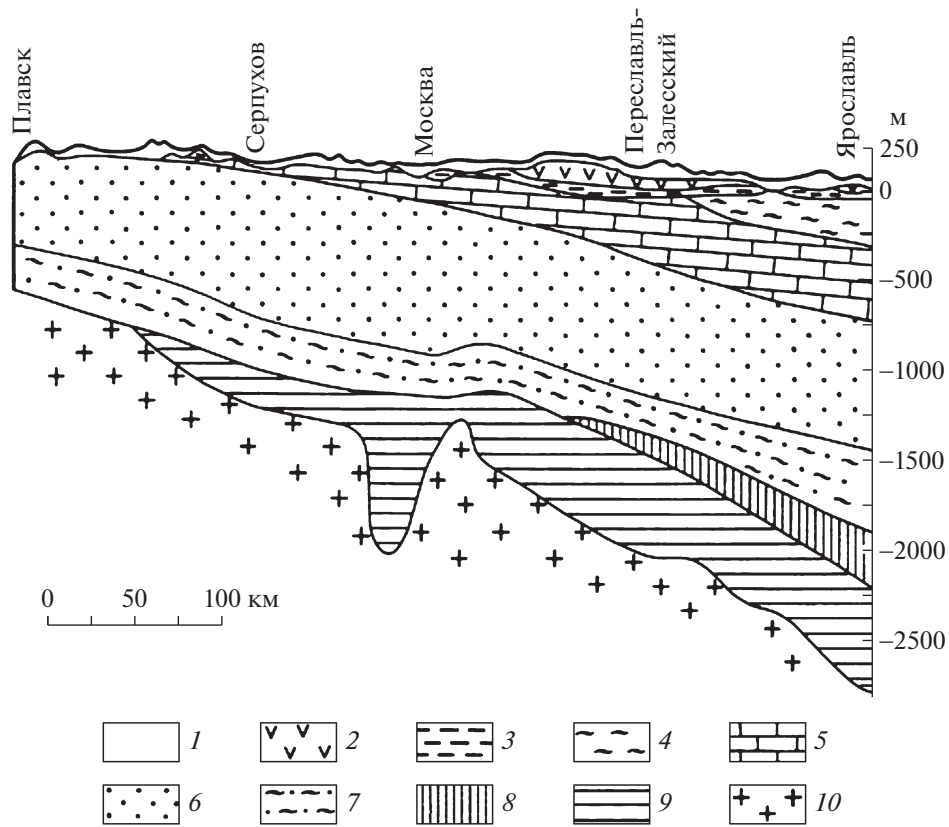


Рис. 2. Геологический разрез Московской области.

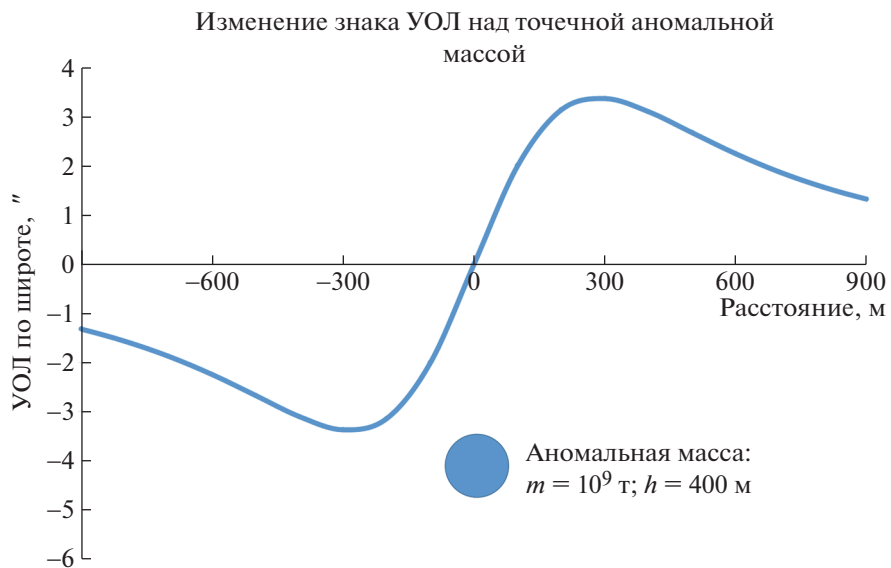


Рис. 3. Пример изменения знака УОЛ над точечной аномальной массой.



Рис. 4. Макет астроизмерителя УОЛ.

метра и ПЗС-сенсора, которые в дальнейшем учитываются как постоянные величины;

2) осуществить разворот телескопа на 180° в горизонтальной плоскости с погрешностью не хуже $10''$;

3) обеспечить стабильность положения горизонтального основания, на котором установлен астроизмеритель.

3.2. Описание макета цифрового астроизмерителя с новым методом измерений

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан макет астроизмерителя УОЛ, представленный на рис. 4. В макете астроизмерителя применен новый метод измерений. В соответствии с новым методом измерения можно выполнять в произвольных направлениях оптической оси телескопа и при произвольных углах в горизонтальной плоскости и отличаться от серии к серии. Наиболее эффективная реализация метода заключается в дискретном вращении телескопа в горизонтальной плоскости дважды с измерениями по схеме, показанной на рис. 5.

При этом новый метод обладает следующими преимуществами:

1. В каждой серии происходит оценивание и учет калибровочных коэффициентов астроизмерителя, т.е. происходит автокалибровка прибора. Это повышает оперативность наблюдений.

2. Оценка и учет калибровочных коэффициентов для каждой серии позволяют избежать погрешностей, которые могут возникать при их изменении между сериями измерений.

3. Предложенный метод измерений не требует устройства специального жесткого основания и высокоточного измерения угла поворота телескопа в горизонтальной плоскости.

Более подробно предложенный метод описан в работе [8].

Испытания макета астроизмерителя с новым методом измерений происходили на различных географических точках России: в Калужской, Новгородской и Московской областях. При этом получено, что среднее СКО измерений УОЛ не превышает $0.2''$, а СКО единичных измерений доходит до $0.1''$ и лучше.

3.3. Измерения УОЛ на аттракции с помощью цифрового астроизмерителя

С астроизмерителем проведены измерения УОЛ на Московской аттракции летом 2019 г. Был построен профиль УОЛ вдоль линии, пересекающей аттракцию с севера на юг. Профиль состоит из 21 точки со средним расстоянием 4.5 км между ними. На двух точках профиля проводились повторные контрольные наблюдения. При этом получено, что разность УОЛ на них не превышает

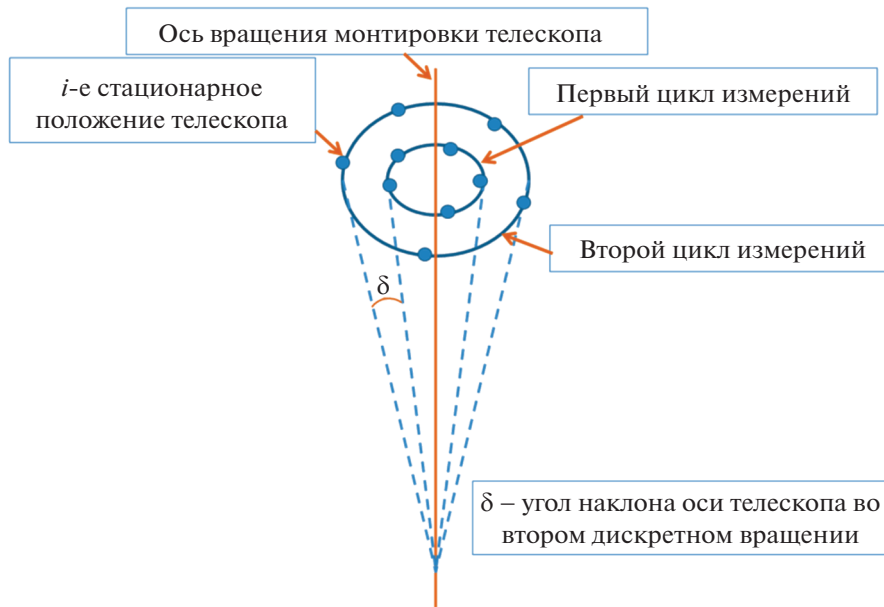


Рис. 5. Пример практической реализации нового метода измерений УОЛ.

0.1", что говорит о хорошей повторяемости результатов измерений.

Первые измерения на аттракции начались в конце мая 2019 г. В первые наблюдательные ночи измерения выполнялись только на трех точках. Это было связано со световым режимом: наблюдения начинались около 23:00 и длились всего 3 часа до 02:00. В дальнейшем, в связи с увеличением длительности ночи, наблюдения в конце июля—начале августа можно было выполнять уже на 4 и более точках.

Точки измерений с астроизмерителем на аттракции подбирались, исходя из следующих требований:

1. *Наличие твердого основания.* Астроизмеритель предназначен для выполнения наблюдений только в стационарном состоянии и только на твердом основании. При этом разработанный метод измерений позволяет выполнять наблюдения с астроизмерителем на любом заранее неподготовленном твердом основании, к которому можно отнести грунтовые, асфальтовые дороги и площадки, т.е. более нет необходимости в специальных железных, бетонных или иных основаниях. Одно из основных условий — стабильность плоскости основания во время измерений в каждом стационарном положении телескопа.

2. *Отсутствие вибраций от сильно загруженных автомобильных дорог.* Вибрации, которые возникают от проезжающих машин, особенно больших, приводят к сильному разбросу показаний инклинометра. В связи с этим расстояние до дорог должно быть не менее 100 м.

3. *Отсутствие засветок от уличного освещения.* Одно из основных условий измерений — отсутствие непосредственного попадания прямой паразитной засветки от уличных фонарей на объектив телескопа. Для этого в составе астроизмерителя используется бленда, которая отсекает паразитную боковую засветку от различных источников: фонарей уличного освещения, проезжающих машин и т.д. В связи с этим выполнение наблюдений с астроизмерителем возможно при расстоянии не менее 30–40 м от источников освещения.

4. *Открытость небосвода.* В состав астроизмерителя входит ГНСС-приемник с антенной для определения геодезических координат точки измерений. При этом точность определения геодезических координат напрямую влияет на точность определения составляющих УОЛ. Для обеспечения достаточного количества наблюдаемых навигационных спутников и высокой точности определения геодезических координат необходимо располагать астроизмеритель вдали от высотных объектов, деревьев, зданий и т.д. Также следует минимизировать помехи, исходящие от радио- и электрического оборудования, в частности, от высоковольтных линий электропередачи. Помехи от них могут привести к временному или полному срыву слежения за спутником, и даже полной невозможности производить измерения на пункте.

Время измерений с астроизмерителем в каждой точке составляло около 45 минут и включало:

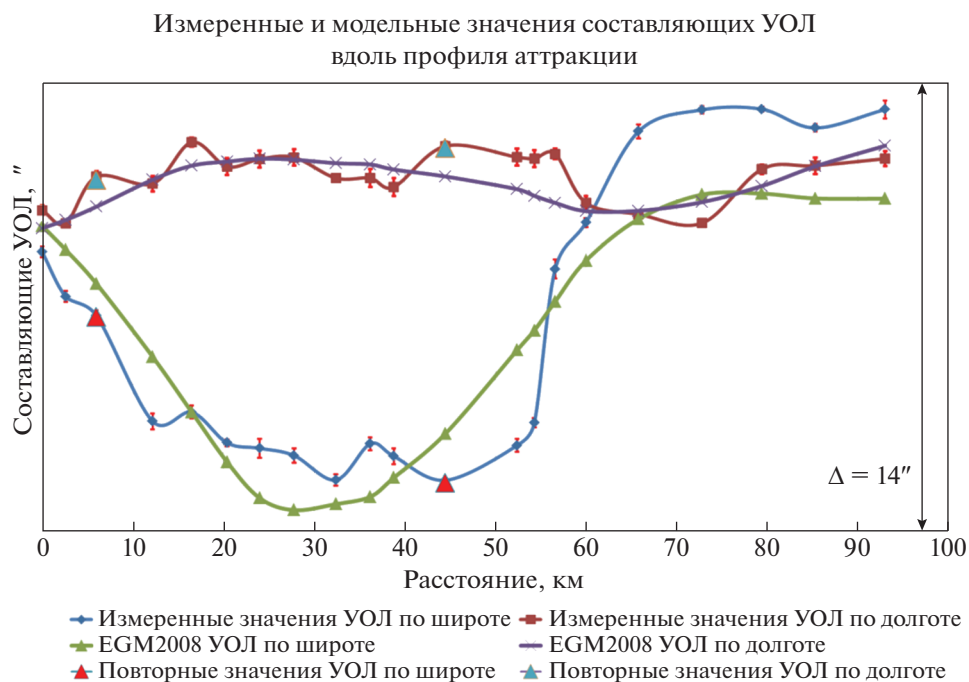


Рис. 6. Измеренный и модельный профили составляющих УОЛ на аттракции.

1) *время на подготовку астроизмерителя* — не более 15 мин (сборка астроизмерителя, выравнивание по показаниям инклинометра; определение геодезических координат; в случае необходимости, фокусировка на изображение звездного неба; получение тестовых кадров звездного неба и показаний инклинометра);

2) *время на измерения*: 5 серий измерений по 6 мин. В каждом стационарном положении телескопа делается кадр звездного неба, записываются текущие показания инклинометра, температура окружающей среды и геодезические координаты. Вся эта информация сохраняется в формате FITS для последующей обработки. При этом заранее известны данные звездного каталога, параметры движения полюса и поправки ко времени UT1–UTC, получаемые из бюллетеней Международной Службы вращения Земли;

3) *время на вычисление значений УОЛ*: обработка данных измерений для оценки текущих значений УОЛ составляет не более 30 с и может выполняться во время процесса измерений.

3.4. Результаты измерений и сравнение их с модельными значениями

Заранее для точек профиля Московской аттракции вычислены значения УОЛ по глобальной модели геопотенциала EGM2008. Измеренный и модельный профили УОЛ показаны на

рис. 6. Из рис. 6 видно, что профили УОЛ, построенные по модели EGM2008, сглажены в силу низкого разрешения модели (18–20 км), в то время как измеренные профили показывают сильную изрезанность УОЛ вдоль профиля.

На рис. 7 показаны разности составляющих УОЛ между измеренным и модельным профилями. Как видно из рис. 7, наблюдается существенная разность между измеренными и модельными значениями УОЛ. Эта разность УОЛ по широте изменяется от $-3''$ до $+2.8''$ с СКО $1.9''$, а по долготе — от $-0.66''$ до $+1.54''$ с СКО $+0.64''$.

Из сопоставления разностей следует, что значение УОЛ на Московской аттракции претерпевает вдоль профиля значительно более резкое изменение, чем это предсказано моделью. Характерно, что наибольшее расхождение с моделью происходит дважды, по обе стороны от места, где составляющая УОЛ в меридиане меняет знак между 50 и 60 км профиля (см. рис. 6). При этом предположительные места максимумов УОЛ соответствуют наибольшим расхождениям между измеренными значениями и моделью гравитационного поля EGM2008.

В соответствии с геологической структурой аттракции, отвесная линия, находящаяся над разломом, отклоняется и к одному и к другому его краю, что приводит к возникновению положительных и отрицательных максимумов и расположенной между ними линии нулевых отклонений.



Рис. 7. Разности УОЛ между измеренным и модельным профилями.

Это хорошо наблюдается на графике измеренных значений УОЛ (см. рис. 6, расстояние от 40 до 80 км).

3.5. Сравнение с картой Б.Я. Швейцера

Непосредственное сравнение измеренных значений со значениями, полученными по карте Б.Я. Швейцера, является затруднительным по нескольким причинам:

1) на карте Б.Я. Швейцера приводятся названия населенных пунктов, в которых проводились наблюдения. Но даже при возможности их идентификации на современной местности у нас нет информации о точном местоположении самого измерительного пункта. Некоторые населенные пункты вошли со временем в состав Москвы и городов-спутников, многие населенные пункты значительно увеличились в размерах. Поэтому непосредственное выполнение наблюдений внутри населенных пунктов стало невозможно, в том числе и из-за засветки от уличного освещения;

Таблица 1. Разброс значений УОЛ между минимальным и максимальным значениями на идентифицированных точках профиля

Вид профиля	Разброс
Измеренный	10.8"
Модельный	5.8"
По карте Б.Я. Швейцера	11.2"

2) значения составляющей УОЛ на карте Б.Я. Швейцера приведены относительно эллипсоида Бесселя. Прямой пересчет значений УОЛ затруднен в связи с неопределенностью элементов ориентирования эллипсоида относительно системы координат ПЗ-90.11. Однако параметром, не зависящим от выбора системы координат, является разброс значений УОЛ между минимальным и максимальным значениями на идентифицированных точках вдоль измеренного профиля (табл. 1).

По данным табл. 1 важно отметить, что значения УОЛ, измеренные Б.Я. Швейцером и с помощью астроизмерителя, согласуются друг с другом лучше, чем с глобальной моделью.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1) с помощью современного цифрового астроизмерителя получены уточненные значения УОЛ на известной Московской аттракции;

2) измеренные значения УОЛ согласуются с измерениями Б.Я. Швейцера лучше, нежели чем с модельными значениями;

3) точность измерений УОЛ значительно повышена при использовании современного цифрового астроизмерителя с 1", характерной для измерителей позапрошлого века, до 0.2";

4) результаты измерений УОЛ с помощью астроизмерителя согласуются с геологической структурой Московской аттракции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. С. Молоденский, *Физика Земли*, № 11, 122 (1967).
2. Б. Я. Швейцер, *Исследование местной аттракции, существующей около Москвы. Сообщения первое и второе* (М.: Университетская типография, 1862).
3. А. Е. Медунин, *Развитие гравиметрии в России* (М.: Наука, 1967).
4. http://www.sai.msu.ru/history/town_mencin.html (2019).
5. Л. В. Огородова, А. П. Юзефович и Б. П. Шимбирев, *Гравиметрия* (М.: Недра, 1978).
6. C. Hirt, *Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung*, Ph.D. Thesis, Wissen. Arb. der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover, Nr. 253 (2004).
7. K. Halicioğlu, R. Deniz, and H. Özener, *Determining astro-geodetic deflections of the vertical using digital zenith camera system*, 26th IUGG General Assembly 2015, Prague (2015).
8. М. М. Мурзабеков, В. Ф. Фатеев, А. В. Пругло, С. С. Равдин, *Астрон. журн.* **95**, 912 (2018).