

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 528 (09)

DOI: 10.22389/0016-7126-2019-949-7-54-64

Как Бируни измерил Землю

© Масликов С. Ю., 2019

Новосибирское астрономическое общество

630114, Россия, г. Новосибирск, ул. Ключ-Камышенское плато, д. 1/1

s.maslikov@mail.ru

Известно, что 1000 лет назад знаменитый учёный-энциклопедист средневекового Востока Абу Рейхан аль-Бируни выполнил измерение земного шара, которое описал в не-скольких трактатах. Во многих более поздних комментариях, например в книге К. Н. Нарходжаева «Геодезические работы Бируни» (1977 г.), утверждается, что учёный получил весьма точный результат, не превзойдённый вплоть до Нового времени. В статье приведён подробный разбор методики измерений Бируни, а также оценка возможных ошибок, сопровождающих эти измерения; поэтапно воспроизведён процесс измерений, осуществлена привязка к конкретным местам наблюдений; рассмотрен предложенный Бируни паралактический метод измерения превышений, который технически смог быть реализован на практике лишь в XX в. В результате выполненного исследования показано, что методика Бируни не позволяла достигнуть приписываемой ей высокой точности. Кроме того, существует неопределённость в сопоставлении единиц измерения длины, которыми пользовался Бируни, с современными мерами.

Астролябия, Бируни, история астрономии, история геодезии, локоть, ошибки измерения, понижение горизонта, радиус Земли, рефракция.

Для цитирования: Масликов С. Ю. Как Бируни измерил Землю // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 7. – С. 0–0. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-949-7-0-0

Предыстория

Одно из самых ранних измерений земного шара осуществил древнегреческий учёный Эратосфен в III в. до н. э. Эратосфен сопоставил линейное расстояние между двумя египетскими городами Александрией и Сиеной (ныне Асуан) с разностью их широт. По его оценке расстояние в 5000 стадиев соответствовало 1/50 части окружности Земли, на основании чего он смог вычислить и всю окружность. Мы знаем, что в измерениях Эратосфена имелись неточности, но главная неопределённость заключается в том, что значение использовавшегося Эратосфеном стадия неизвестно, имеются лишь предположения, сильно разнящиеся между собой. Тем не менее принято считать, что Эратосфен сделал достаточно хорошее приближение к истинному размеру нашей планеты.

Попытки измерить Землю не прекращались и в последующие века. В данной статье

рассмотрим метод, который между 1022 и 1024 гг. применил на практике известный учёный-энциклопедист средневекового Востока Абу Рейхан аль-Бируни (973–1048). Бируни написал труд, посвящённый данному вопросу, который не дошёл до нашего времени [5, с. 26]. К счастью, ещё как минимум две его работы содержат краткое описание метода и полученных результатов: «Геодезия» [3, с. 217] и «Канон Масуда» [2, с. 431].

Бируни занимался многими науками. Проблема измерения размера земного шара долгое время не давала ему покоя. Он знал о том, что древние греки измерили окружность земного шара в стадиях, но признавал, что точное значение стадия уже неизвестно. Знал он и об измерениях длины меридиана, предпринятых в 827 г. астрономами багдадского халифа аль-Мамуна (786 – 833), когда две независимые группы учёных получили немного разнящиеся между собой значения

длины градуса меридиана: 56 и $56\frac{2}{3}$ арабской мили*. В то время ещё слабо представляли, как влияют на результат ошибки измерений. Никому и в голову не пришло, что нужно просто принять среднее значение. Сам Бируни считал это расхождение «...пунктом преткновения, побуждающим к возобновлению проверки и измерения», он даже подобрал подходящий для измерений ровный участок пустыни близ побережья Каспийского моря, но так и не решил организационные проблемы, связанные с надёжными помощниками, охраной, тяготами экспедиционных условий [3, с. 212].

К счастью, Бируни узнал про другой, менее трудозатратный способ. Его применил тот же самый халиф аль-Мамун. Во время похода на Византию он приказал своему астроному Абу Таййибу Санаду ибн Али подняться на гору и измерить в момент захода понижение центра солнечного диска относительно горизонтальной плоскости [3, с. 215].

Метод понижения горизонта

Рассмотрим, что представляет собой метод понижения горизонта (рис. 1). Если наблюдатель поднимется на вершину горы A , он увидит линию горизонта в точке B . Линия визирования AB будет касательной к поверхности земного шара и, соответственно, перпендикулярна радиусу Земли OB . Из полученного прямоугольного треугольника можно прийти к соотношению

$$R = h \frac{\cos \alpha}{1 - \cos \alpha}, \tag{1}$$

где α – угол понижения горизонта; h – высота горы относительно поверхности шара.

На практике решение этого простого выражения отягощается несколькими проблемами: точностью измерения малого угла α , влиянием рефракции вблизи горизонта, ровностью подстилающей поверхности (в случае Бируни – пустыни), точностью

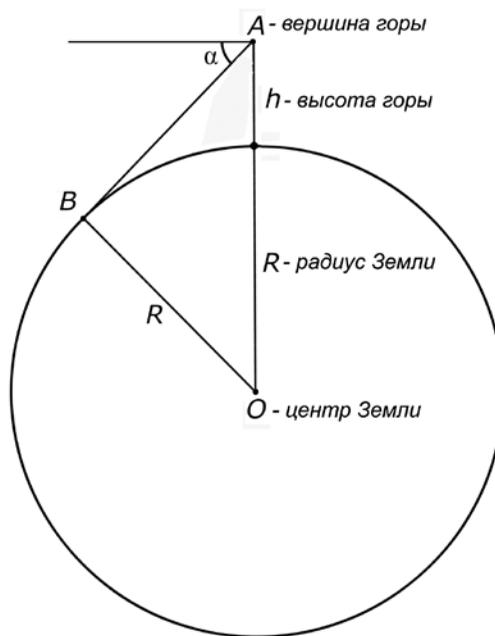


Рис. 1. Геометрическая сущность метода понижения горизонта
Fig. 1. The geometric point of the method of dip the horizon

измерения высоты h , а также инструментальными ошибками и ошибкой визирования. Подробнее о них будет сказано ниже.

Бируни между 1022 и 1024 гг. совершил путешествие в Индию, результатом которого стал обширный энциклопедический трактат «Индия». Кроме того, у Бируни появилась возможность осуществить свою давнюю мечту – вычислить размер Земли. Как он сам писал:

«Когда случилось мне остановиться в крепости Нандна в земле Индии, над которой возвышается на западе высокая гора, я заметил к югу от последней пустыню, и пришло мне на ум испробовать в ней этот метод.

Я различил, [находясь] на вершине горы, явственное соприкосновение Земли с [небом], окрашенным в лазурные [тона]. Линия визирования опустилась от перпендикуляра, падающего на вертикальную линию, на $0^{\circ}34'$.

Я измерил перпендикуляр горы и нашёл его в $652^p 3' 18''$ локтя***, относящегося

* П. Г. Булгаков (со ссылкой на К. Наллино) приводит значение арабской мили 1973,2 м [5, с. 52]. В других источниках длина арабской мили достигает 2,3 км и больше, особенно, если исходить из того, что три мили составляли один фарсах (от 6 до 8 км). В данной статье не будем останавливаться на соответствии мер длины.

** *В десятичной системе счисления это составляет 652,055 локтя, что соответствует 322,1 м, если считать 1 локоть = 49,4 см [5, с. 322].

[к виду] ас-сияб, которыми пользуются в этой местности» [3, с. 217].

В «Каноне Масуда», написанном примерно через 10 лет после «Геодезии», Бируни описывает ситуацию немного иначе: «... нашёл в земле индийцев гору, возвышающуюся над пустыней с ровной поверхностью, ровность которой можно сопоставить лишь с гладкостью поверхности моря. Я измерил с вершины этой горы [угол к линии], где на взгляд встречается небо с Землёй, то есть [угол к] кругу горизонта. И я нашёл, что [горизонт] понижается по [показаниям] инструмента относительно линии восток – запад, [наблюдаемой у подножья горы], немного меньше, чем на треть с четвертью градуса, и принял эту [величину] за тридцать четыре минуты. Я определил высоту горы, наблюдая высоту её вершины с двух мест, лежащих вместе с основанием высоты на одной прямой линии, и нашёл, что она равна шестистам пятидесяти двум локтям с половиной одной десятой [то есть $652 + 1/20 = 652,05$] локтя» [1, с. 431].

Таким образом, имеем все необходимые данные для вычисления радиуса Земли по формуле (1). Далее возможны различные толкования, в зависимости от предположений относительно длины одного локтя. Так, К. Н. Нарходжаев пишет, что по данным, приведённым Бируни в «Каноне Масуда», радиус Земли получается с ошибкой всего $31,5 \text{ км}^{**}$, что составляет $0,5 \%$ [8, с. 30]. В данной статье рассмотрим, мог ли в действительности Бируни получить размер Земли с такой точностью. Для начала поэтапно восстановим процесс измерений и определим местонахождение точек наблюдения.

Местонахождение точек наблюдения

Восстановим место и обстоятельства наблюдений Бируни. На картах сервиса Google Maps на перевале Соляного хреб-

* Радиус земного эллипсоида на широте «лаборатории Бируни» $32^{\circ}43'$ составляет $6371,9 \text{ км}$, что близко к среднему радиусу земного шара $6371,2 \text{ км}$. Радиус Земли по данным Бируни и расчётам К. Н. Нарходжаева составил $6339,58 \text{ км}$.

та в Пакистане в точке с координатами $32^{\circ}43'34''$ с. ш., $73^{\circ}13'45''$ в. д. отмечена «лаборатория Бируни». Здесь сохранились остатки башни древней крепости Нандна, через которую в Средние века пролегал караванный маршрут. Ещё раньше, в 326 г. до н. э., через перевал во время похода на Индию прошла армия Александра Македонского [10, с. 3]. Ныне это северная часть пакистанской провинции Пенджаб, а остатки крепости Нандна расположены почти посередине между столицей страны Исламабадом и вторым по численности населения городом Лахором.

Вопрос о том, с какой именно вершины наблюдал Бируни, ранее уже обсуждался А. Гомезом [10, с. 3]. Для контроля воспользуемся интернет-сервисом Flood Map (www.floodmap.net), созданным на основе высотной съёмки НАСА. Согласно А. Гомезу, абсолютная высота «лаборатории Бируни» составляет 404 м . Отметки подстилающей поверхности, т. е. пустыни, простирающейся к югу от этого места вплоть до видимого горизонта, изменяются в пределах от 210 до 195 м (у А. Гомеза приведён профиль этой пустыни). Единственная подходящая гора находится на юго-западе от «лаборатории Бируни». Её абсолютная высота 533 м . Судя по карте, она вполне доступна для подъёма на неё и примерно на $320\text{--}340 \text{ м}$ выше подстилающей поверхности, что близко к измерениям Бируни. Линия горизонта при наблюдении с вершины этой горы в сторону юга находится на расстоянии около 70 км .

У подножия горы – измерение высоты горы

Разберёмся, как Бируни нашёл высоту вершины. В «Геодезии» он описывает неизвестный ранее способ определения высоты, основанный на использовании вспомогательного устройства – квадратного щита [3, с. 216–217]. Этот метод сам по себе представляет большой интерес. Рассмотрим его (рис. 2).

Наблюдатель наводит сторону *CB* квадрата на вершину горы *E*. Затем смотрит

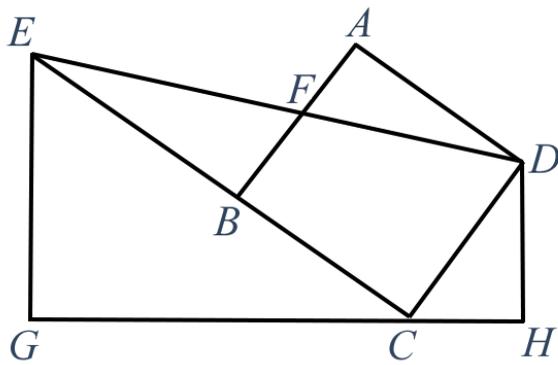


Рис. 2. Схема параллактического метода Бируни:

E – вершина горы; *G* – её основание; *ABCD* – квадратный щит со стороной, равной одному ЛОКТЮ

Fig. 2. Scheme of the parallactic method of Biruni:

E – peak of the mountain; *G* – base of the mountain; *ABCD* – square shield with a side equal to one cubit

на эту же вершину из точки *D* и замечает, что она видна в направлении *F*. Говоря современным языком, возникает явление параллакса, при котором наблюдение объекта ведётся из двух разных точек. Теоретически здесь всё верно, но на практике метод сопряжён с рядом сложных технических проблем.

Базис *CD* имеет длину 1 локоть, т. е. около 0,5 м. Но если учесть, что расстояние до вершины составляет не менее 1 км, то смещение вершины при наблюдении из точек *C* и *D* будет чрезвычайно мало. Угол *ADF*, равный углу при вершине *CEF*, в данном случае составит $5 \cdot 10^{-4}$ рад, или примерно 1,8'. При этом отрезок *AF*, который Бируни предлагает измерять, будет всего около 0,2 мм! Чтобы зафиксировать такие малые величины, щит Бируни должен быть изготовлен с невероятной для того времени точностью, а наблюдения нужно вести с помощью оптических приспособлений и микрометрических винтов. Понятно, что в то время это было технически нереализуемо. Остаётся загадкой, почему Бируни ничего не говорит об этом. В любом случае, можно рассматривать данную идею Бируни достойной заявкой на патент, который был воплощён в жизнь лишь в XX в. в виде оп-

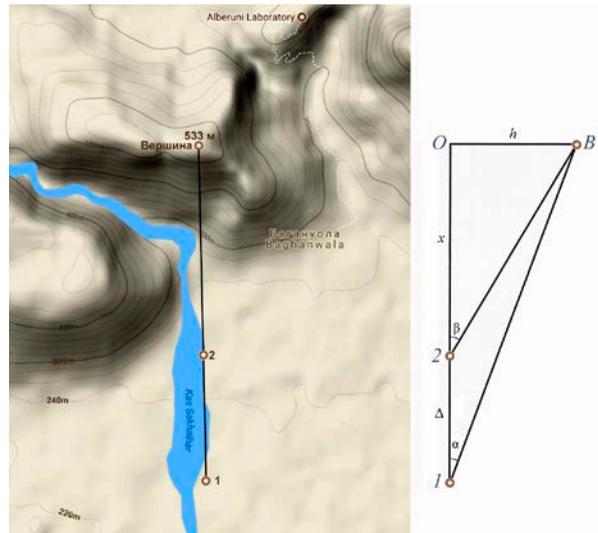


Рис. 3. Карта местности, на которой вёл наблюдения Бируни, и принцип определения высоты вершины из двух точек

Fig. 3. A map of the area near the observation points of Biruni, and the principle of determining the height of the peak from two points

тических дальномеров с внутренней, т. е. находящейся внутри прибора, базой.

В «Каноне Масуда» Бируни уже не вспоминает про метод квадратного щита и пишет: «Я определил высоту горы, наблюдая высоту её вершины с двух мест, лежащих вместе с основанием высоты на одной прямой линии...» [1, с. 431]. При этом скорее всего была использована астролябия. Метод определения высоты вершины, основание которой недоступно, подробно описан в XI книге «Канона Масуда» [2, с. 161].

Обозначим искомую высоту *h*, два измеренных угла α и β , расстояние между точками наблюдения Δ (рис. 3). Выразим высоту *h* из треугольников *IOB* и *2OB*:

$$h = (x + \Delta) \operatorname{tg} \alpha;$$

$$h = x \operatorname{tg} \beta.$$

Неизвестную величину *x* выразим из второго уравнения, подставим в первое и преобразуем. Тогда высота горы

$$h = \frac{\Delta \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha}.$$

Для упрощения расчётов астролябия имела на обратной стороне так называемую шкалу теней, которая позволяла сразу определять тангенс измеренного угла. Шкала обычно была разделена на 12 пальцев. Это значит, что по шкале можно отсчитывать дискретные значения тангенсов измеренных углов: первое деление $-\frac{1}{12} = 0,083(3)$ – соответствует углу $4,8^\circ$; второе деление $-\frac{2}{12} = 0,16(6)$ – углу $9,5^\circ$; третье деление $-\frac{3}{12} = 0,25$ – углу 14° ; четвертое деление $-\frac{4}{12} = 0,3(3)$ – углу $18,4^\circ$ и т. д.

Для упрощения вычислений Бируни рекомендовал смещаться между наблюдениями на такое расстояние Δ , чтобы тангенс угла, отсчитываемый по шкале теней, изменился ровно на один палец, т. е. чтобы

$$(\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha) = \frac{1}{12}.$$

$$h = 12\Delta \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta. \quad (2)$$

На основании методики Бируни можно попытаться восстановить положение двух точек наблюдения, лежащих у подножия горы.

Высота вершины h известна, примем её равной 649 локтям (почему не 652,05 – об этом скажем ниже). Каждое фиксирован-

ное значение тангенсов углов α и β соответствует вполне определённым расстояниям от вершины. Элементы рельефа, в свою очередь, диктуют диапазон возможных расстояний от горы. Так, ближе 700 м от горы начинается резкий подъём, а на расстоянии более 2000 м угол получается слишком малым. Исходя из этого, можно предполо-

жить, что Бируни сделал два отсчёта: $\frac{2}{12}$ и

$\frac{3}{12}$, – находясь в точках 1 и 2 на расстоянии соответственно 3894 и 2596 локтей (1923,6 и 1282,4 м) от основания горы (из решения треугольников $1OB$ и $2OB$ на рис. 3). Расстояние Δ между точками 1 и 2 составляет в этом случае 1298 локтей (641,2 м). Проверить расчёты можно по формуле (2), вычис-

лив высоту $h = 12\Delta \frac{2}{12} \frac{3}{12} = \frac{\Delta}{2} = 649$ локтей (320,6 м), которая в данном случае равна половине расстояния Δ между точками 1 и 2. Реальный перепад высот, согласно карте, составляет немного меньше – около 300 м. Конечно, за 1000 лет возможно и некоторое изменение рельефа, но, как покажем далее, эта разность находится в пределах точности измерений Бируни. На карте (см. рис. 3) видно примерное положение точек наблюдения. Они находятся вблизи уреза воды, на берегу заводи, образованной горным потоком. Поток, вырвавшись из ущелья, течёт на юг по сравнительно плоской поверхности (рис. 4).



Рис. 4. Заводь, образованная горным потоком, у подножия горы – предполагаемое место, откуда Бируни с помощью астролябии измерял высоту вершины

Fig. 4. The creek, formed by the mountain stream at the foot of the mountain, is the supposed place from which Biruni measured the height of the peak by the astrolabe

С какой точностью Бируни мог получить высоту горы? При практической реализации данного метода присутствуют две возможные ошибки. Одна из них связана с точностью измерения расстояния Δ , вторая – с точностью взятия отсчётов по шкале тангенсов. Кроме того, неизвестно, какую именно точку на вершине горы наблюдал Бируни, вершина достаточно плоская. Наверняка, он должен был выставить там какую-то марку (или человека), чтобы её было видно на расстоянии 2 км. Расстояние Δ могло быть промерено шнуром с точностью порядка $\frac{1}{100}$, т. е. около 6 м, так что его вклад в ошибку высоты около 3 м. Что касается шкалы теней, на ней отмечены только целые деления, редко – половинные, вероятная ошибка отсчитывания составит порядка 0,1. Из треугольников $1OB$ и $2OB$ (см. рис. 3) понятно, что в соответствующих отсчётах $\frac{2}{12}$ и $\frac{3}{12}$ это приведёт к ошибке в высоте, равной $\frac{1}{40}$ или $\frac{1}{60}$ высоты горы, т. е. составит 5–8 м.

При этом будем считать, что Бируни учёл инструментальные ошибки астролябии, т. е. положение нулевой линии шкалы теней (место нуля – в современных терминах), которая должна быть горизонтальна, а также проверил ошибки нанесения штрихов самой шкалы. Он должен был максимально уменьшить методические ошибки, например, снизить колебания астролябии во время измерений, а также зафиксировать (и учесть в дальнейших вычислениях) высоту инструмента над поверхностью земли.

Кстати, не даёт ли нам дробная часть измерения Бируни возможность узнать высоту точки визирования? Астролябию во время измерения располагали на весу на уровне глаз. Возможно, измеренная Бируни высота 652,055 локтя состоит из двух слагаемых: 649 локтей получается из решения треугольников (см. рис. 3) и 3,055 локтя (≈ 152 см) – это высота точки визирования, т. е. глаз наблюдателя. Если так, то Бируни был ниже среднего роста – не выше 165 см. Остаётся

найти независимые подтверждения этого предположения. Могила аль-Бируни по данным на 2018 г. находится в заброшенном состоянии в г. Газни (Афганистан).

Другая проблема заключается в том, что определения высоты вершины были проведены у подножия горы, где абсолютная отметка высоты составляет около 220 м. С вершины Бируни наблюдал пустыню вблизи горизонта, где абсолютная высота не более 200 м [10, с. 6]. Так что здесь присутствует неучтённая методическая погрешность, составляющая не менее 20 м, которая превышает все другие.

На вершине горы – измерение понижения горизонта

Перейдём к следующему этапу измерений – на вершине горы. Первый вопрос: каким инструментом пользовался Бируни для измерения понижения горизонта? В «Геодезии» он пишет, что использовал армиллярную сферу с алидадой [3, с. 215]. Это противоречит его собственным словам о том, что армилла (как и астролябия) не позволяла фиксировать «...никакие доли градусов, кроме половин...» [5, с. 10].

Подсказку даёт фраза Бируни из описания процесса наблюдений. Он взял отсчёт понижения горизонта «немного меньше, чем на треть с четвертью градуса» [1, с. 431]. Сравним со значением широты Газни, которую Бируни определил с помощью так называемого Йаминиевого кольца в 1018–1019 гг., – «тридцать три с третью и четвертью градуса» [2, с. 13]. Он назвал этот инструмент в честь своего покровителя султана Махмуда Газнави, прозванного Йамин ад-Даул (Десница Государства). Иногда Бируни называет этот инструмент шахским кольцом. Его описание приведено в IV книге «Канона Масуда»: «Высоту определяют с помощью алидады с двумя диоптрами. ...Такие кольца необходимо делать возможно большими по размеру и наиболее массивными по своему телу, дабы можно было разделить их [шкалу] на возможно более точные деления» [1, с. 314]. Из контекста понятно, что кольцо у Бируни было разделено на 5-минутные деления, по-

сколько в качестве отсчёта можно было брать треть и четверть градуса, т. е. 20' и 15'. Каков был диаметр кольца? Учитывая походные условия, он вряд ли превосходил 1 м. В таком случае 5-минутные деления на лимбе располагались на расстоянии около 0,7 мм одно от другого. В то время только очень искусный мастер мог обеспечить такую точность нанесения делений. С соответствующей точностью должны быть обозначены и отвесная линия, и горизонт инструмента. Даже при установке (подвешивании) такого инструмента легко сместить отвесную линию. Добавим, что наблюдения через диоптры – два отверстия, разнесённые по краям алидады, – тоже были непросты. В дальнем диоптре, удалённом от первого на 1 м, нужно хорошо рассмотреть линию горизонта, которая сама по себе нечёткая. Если отверстие в диоптре составляло 5 мм, то на удалении 1 м оно соответствовало 1,8'. Линию горизонта необходимо позиционировать в центре этого отверстия. А ведь такому большому инструменту присуща также парусность и колебания во время измерений. Теперь читателю понятно, насколько технически сложным мог быть сам процесс наблюдения. В дошедших до нас трудах Бируни ни словом не обмолвился о перечисленных проблемах, как и о неровности горизонта. Ведь всего лишь 20-метровый бархан на расстоянии 70 км изменяет высоту горизонта на 1'.

В описанном выше методе речь шла о геометрическом понижении горизонта без учёта рефракции. Видимое понижение горизонта отличается от геометрического. Этот вопрос кратко рассматривается в учебниках по мореходной астрономии [7]. Имеются и более подробные исследования [6]. Упрощённая формула для угла понижения горизонта выглядит следующим образом:

$$\alpha = 1,760\sqrt{h},$$

угол α выражается в минутах дуги, а высота наблюдателя h в метрах, здесь принято усреднённое значение коэффициента рефракции 0,16. В нашем случае разность высот вершины горы и подстилающей поверхности составляет от 320 до 340 м, так что получим

понижение горизонта от 31,5' до 32,5'. Бируни должен был получить близкий к этим значениям отсчёт. И хотя он знал о существовании рефракции, но в данном случае не упоминает об этой проблеме. А его отсчёт 34' идеально соответствует результату, который он ожидал получить.

Ошибки определения радиуса Земли из наблюдений Бируни

Проанализируем формулу (1) с точки зрения ошибок измерений. Радиус Земли здесь – функция двух параметров: высоты горы h и измеренного угла α . То есть $R = F(h, \alpha)$. Обе величины отягощены ошибками измерений, так что каждая из них вносит свой вклад в результирующую функцию. Случайная ошибка функции двух величин может быть выражена следующим образом [4, с. 116]:

$$\Delta R = \frac{dR}{dh}\Delta h + \frac{dR}{d\alpha}\Delta\alpha,$$

где $\frac{dR}{dh}$ и $\frac{dR}{d\alpha}$ – производные функции $F(h, \alpha)$ по параметрам h и α ; Δh и $\Delta\alpha$ – ошибки соответствующих параметров.

В полученных выражениях: $\frac{dR}{dh} = \frac{\cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$ и $\frac{dR}{d\alpha} = \frac{\sin \alpha}{(1 - \cos \alpha)^2}$ – ввиду малости угла α можно принять $\sin \alpha = \alpha$; $\cos \alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2}$. Тогда по-

сле преобразований получим производные:

$$\frac{dR}{dh} = \frac{2}{\alpha^2}; \quad \frac{dR}{d\alpha} = \frac{2}{\alpha}.$$

Оценим возможные ошибки Δh и $\Delta\alpha$. Ошибку в высоте мы уже обсуждали выше, она составляет не менее 20 м. Тогда её влияние на радиус Земли:

$$\Delta R = \Delta h \frac{dR}{dh} = \Delta h \frac{2}{\alpha^2} = 20 \frac{2}{0,01^2} = 4 \cdot 10^5 \text{ м} = 400 \text{ км}.$$

Таким образом, ошибка в 20 м при измерении высоты горы приводит к ошибке в радиусе Земли, равной 400 км! Проверить правильность этой оценки можно путём прямой подстановки разных значений высоты в формулу (1).

Примем ошибку измерения угла $\Delta\alpha$, с учётом перечисленных выше факторов, равной $2'$, т. е. $5,8 \cdot 10^{-4}$ рад. Соответствующая ошибка в радиусе Земли составит

$$\Delta\alpha \frac{dR}{d\alpha} = \Delta\alpha \frac{2}{\alpha} = 5,8 \cdot 10^{-4} \frac{2}{0,01} \approx 12 \cdot 10^{-2} = 0,12$$

радиуса Земли, т. е. около 760 км.

Таким образом, если измерение понижения горизонта проведено с точностью $2'$, то радиус Земли будет получен с ошибкой в 760 км! Убедиться в правильности этой оценки можно также путём прямой подстановки разных значений угла в формулу (1).

Мы видим, что ни о какой точности, выражаемой в трёх десятках километров [8, с. 30] речи быть не может. Реальная точность метода Бируни на порядок хуже, чем это было принято считать, и составляет сотни километров!

Имеется другой, более быстрый способ показать некорректность сверхточных результатов Бируни. Рассмотрим данную ситуацию с точки зрения значащих цифр. Правило действий с приближёнными числами гласит: «При умножении двух приближённых чисел в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеется в числе с наименьшим количеством значащих цифр [9, с. 11]. Исходные данные Бируни содержали всего лишь по две значащие цифры: и высота – 322 м (последняя цифра, как было показано выше, не является значащей), и измеренный угол – $34'$. Причём вторая цифра уже ненадёжна. Поэтому в результате, полученном для радиуса Земли по формуле (1), не может содержаться более двух значащих цифр. Кстати, это же правило распространяется и на определение размера Земли Эратосфеном. В его измерениях содержалось вообще по одной значащей цифре.

Заключение

Исходя из проведённого анализа, следует признать, что метод Бируни обладает большими методическими ошибками и очень чувствителен к погрешностям изме-

рений. Ни о какой высокой точности определения размеров Земли по наблюдениям Бируни речи быть не может. Предыдущие выводы базировались на не вполне корректном сопоставлении средневековых единиц длины с современными. Невозможно точно сказать, чему равен фарсах или миля, которыми пользовался Бируни. Таким образом, «высокоточное» определение размеров Земли Абу Рейханом аль-Бируни – это не что иное, как научный миф.

Кроме того, возникают сомнения в самом процессе измерений Бируни. Не учитывая влияние рефракции, которое в его случае составляло несколько угловых минут, он всё же получил нужное значение для понижения горизонта и таким образом выполнил свою задачу – подтвердил более ранние результаты астрономов аль-Мамуна (а именно длину градуса меридиана, равную 56 милям**). Это несколько не умаляет научный авторитет Бируни, поскольку подгонка результатов к нужному значению не являлась чем-то исключительным в истории астрономии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бируни Абу Рейхан*. Избранные произведения. Т. V, ч. 1. Канон Масуда (кн. I–V) / Ред. С. X. Сираждинов, Г. П. Матвиевская. – Ташкент : ФАН, 1973. – 647 с.
2. *Бируни Абу Рейхан*. Избранные произведения. Т. V, ч. 2. Канон Масуда (кн. VI–XI) / Ред. С. X. Сираждинов, Г. П. Матвиевская. – Ташкент : ФАН, 1976. – 634 с.
3. *Бируни Абу Рейхан*. Геодезия (Определение границ мест для уточнения расстояний между населёнными пунктами) / Исслед., пер. и примеч. П. Г. Булгакова // Избранные произведения. – Т. III. – Ташкент: ФАН, 1966. – 364 с. URL: http://www.astro-cabinet.ru/library/Biruni/Geodezia/Geodezia_Ogl.htm (дата обращения: 06.06.2019).
4. *Большаков В. Д., Гайдаев П. А.* Теория математической обработки геодезических измерений. – Изд. 2-е. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
5. *Булгаков П. Г.* Бируни и его «Геодезия» // В кн. Бируни Абу Рейхан. Геодезия (Определение границ мест для уточнения расстояний между населёнными пунктами). – Ташкент: ФАН, 1966. С.7–78.
6. *Казанский К. В.* Земная рефракция над обширными водными поверхностями. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 192 с.
7. *Красавцев Б. И.* Мореходная астрономия. Изд. 2-е. – М.: Транспорт, 1978. – 304 с.
8. *Нарходжаев К. Н.* Геодезические работы Бируни. – Ташкент: Узбекистан, 1977. – 112 с.
9. *Практикум по геодезии*: Под ред. Г. Г. Поклада. – М.: Академический проект, 2012. – 552 с.
10. *Gomez A. G.* Biruni's Measurement of the Earth. URL: http://www.academia.edu/8166456/Birunis_measurement_of_the_Earth (дата обращения: 06.06.2019).

*Результат Бируни $55^{\circ}53'15''$, или 55,9 мили, близок к значению, полученному астрономами аль-Мамуна.

Biruni's Measurement of the Earth

Maslikov S. Yu.

Novosibirsk Astronomical Society
630114, Russia, Novosibirsk, Kluch-Kamyshejskoje Plato st., 1/1
s.maslikov@mail.ru

A thousand years ago, one of the greatest scholars of the medieval Islamic era Iranian scientist-encyclopedist Abu Rayhan al-Biruni measured the Earth globe. He described the measurement process in several of his treatises. Many of the more recent comments say that he received a very precise result, unrivaled until the New Time. The article provides a detailed analysis of the Biruni's measurement method, as well as an assessment of possible errors accompanying these measurements. Step by step the measurement process is reinstated; binding is made to specific places of observation, technical parameters of the instruments used are discussed. A parallactic method and instrument for measuring elevations proposed by Biruni is considered, which could only be put into practice in the 20th century. As a result of the research it was shown that Biruni's method is not as accurate as was believed. In addition, it is difficult to compare the unit of measure of the length of Biruni's time with modern units.

Astrolabe, astronomical measurements in antiquity, Biruni (Beruni), cubit, dip of the horizon, Earth' radius, history of geodesy, measurement errors, refraction.

For citations: Maslikov S. Yu. (2019) Kak Biruni izmeril Zemlyu [Biruni's Measurement of the Earth]. Geodesy and Cartography = Geodezija i kartografija, 80, 7, pp. 0–0 (In Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2019-949-7-0-0

REFERENCES

1. Abu Rayhan Al-Biruni. Izbrannye proizvedenija. Tom V, chast 1. Kanon Masuda (knigi I–V). Redaktory S. Kh. Sirazhdinov, G. P. Matvievskaia. Tashkent: FAN, 1973, 647 p. (In Russian).
2. Abu Rayhan Al-Biruni. Izbrannye proizvedenija. Tom V, chast 2. Kanon Masuda (knigi VI–XI). Redaktory S. Kh. Sirazhdinov, G. P. Matvievskaia. Tashkent: FAN, 1976, 634 p. (In Russian).
3. Abu Rayhan Al-Biruni. Geodezija (Opređenje granic mest dlja utochnenija rasstojanij mezhdru naselennymi punktami). Issledovanija, perevod i primechanija P. G. Bulgakova. Izbrannye proizvedenija. Tom III. Tashkent: FAN, 1966, 364 p. (In Russian).
4. Bol'shakov V. D., Gajdaev P. A. Teoriya matematicheskoi obrabotki geodezicheskikh izmerenij. Izdanie 2-e. Moskva: Nedra, 1977, 367 p. (In Russian).
5. Bulgakov P. G. Biruni i ego «Geodeziya». V knige Biruni Abu Rayhan. Geodezija (Opređenje granic mest dlja utochnenija rasstojanij mezhdru naselennymi punktami). Tashkent: FAN, 1966, pp. 7–78 (In Russian).
6. Kazanskij K. V. Zemnaya refrakziya nad obshirnymi vodny'mi poverkhnostyami. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 192 p. (In Russian).
7. Krasavtzev B. I. Morekhodnaya astronomiya. Izdanie 2-e. Moskva: Transport, 1978, 304 p. (In Russian).
8. Narkhodjaev K. N. Geodezicheskie raboty Beruni. Tashkent: Uzbekistan, 1977, 112 p. (In Russian).
9. Praktikum po geodezii. Pod redakciej G. G. Poklada. Moskva: Akademicheskij proekt, 2012, 552 p. (In Russian).
10. Gomez A. G. Biruni's Measurement of the Earth. URL: http://www.academia.edu/8166456/Birunis_measurement_of_the_Earth (accessed 06.06.2019).