КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

УДК 528.4 https://doi.org/10.5281/zenodo.10395932

Мирмахмудов Э.Р., Тошонов Б.Ш., Тлеумуратова Г.М., Тастемирова М.Г.

Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ НАКЛОНА ВОДОМЕРНОЙ РЕЙКИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ПОСТА “ЧИНАЗ”

Аннотация. *В статье описывается методика определения крена водомерной рейки гидрологического поста “Чиназ”. Излагается способ оценки точности определяемых величин и функций на основе теории математической статистики для уровенных постов. Приведены расчетные формулы для вычисления величины наклона рейки. Выполнены геодезические измерения с помощью оптико-электронного тахеометра Trimble M3DR5. Произведен анализ смещения рейки по значениям средних квадратических ошибок единицы веса. По результатам вычислены поправки к оси рейки относительно отвесной линии. Графически представлена дисперсия величин от математического ожидания. Доказана, что дисперсия дискретных точек находится в пределах допустимого, что говорит о корректности данных. Отмечается, что точное значение отклонения позволит более корректно вычислить объем запаса воды. Для исследования деформации предлагается производить систематические измерения с помощью высокоточных инструментов.*

Ключевые слова: *водомерная рейка, крен, точность, геодезические измерения, уровенный пост.*

Mirmakhmudov E.R., Toshonov B.Sh., Tleumuratova G.M., Tasnemirova M.G.

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

ANALYSIS OF THE WATER GAUGE ACCURACY HYDROLOGICAL POST “CHINAZ”

Abstract. *The method for determining the roll of a water gauge at the Chinaz hydrological station is given in this paper. A method for assessing the accuracy of the determined quantities and functions based on the theory of mathematical processing of geodetic measurements is given here. Formulas for calculating the displacement value of a water gauge are shown. Geodetic measurements were carried out using a Trimble M3DR5 optical-electronic total station. An analysis of the accuracy of the inclination of the water-measuring staff of the level post was carried. The root mean square errors of the unit weight of the displacement of the axis of the water rod are calculated based on the measurement results. Based on the results of measurements and calculations, corrections for the deviation of the rod axis relative to the plumb line were determined. The dispersion of the measured values from the mathematical expectation is graphically presented. It has been proven that the measurement accuracy is within acceptable limits, which indicates the correctness of the data. It is noted that an accurate determination of the roll will make it possible to more correctly calculate the volume of water reserves. To study deformation, it is proposed to carry out systematic geodetic measurements using high-precision instruments.*

Key words: *water gauge, roll, accuracy, geodetic measurements, level post.*

Введение и постановка проблемы. Водохозяйственный комплекс бассейна реки Сырдарья обеспечивает рациональное расходование водных ресурсов и представлен

гидротехническими сооружениями, обеспечивающими трансформацию стока воды в водохранилищах, подачу воды потребителям и выработку электроэнергии. Эффективность использования водного баланса зависит от мониторинга наблюдений уровня воды специальными устройствами (свайные рейки и самописцы). Эти средства установлены не только в прибрежной зоне, но и в местах, где происходит подача воды для мелиорации и ирригации. Если учесть, что ирригационная сеть охватывает те места, где сосредоточены населенные пункты, то становится очевидным учет и контроль расходования воды специальными устройствами. Особенно это важно для решения прикладных задач в области проектирования и строительства различных гидротехнических сооружений [8] и мониторинга экологического состояния речных бассейнов Узбекистана.



Рис. 1. Основной репер уровенного поста “ Чиназ”

Известно, что гидрологическая сеть состоит из реперных постов (рис.1) и регистраторов, предназначенных для контроля изменений уровня верхней поверхности реки. Изменение высоты уровня реки определяется на уровенных постах с помощью визуальных, механических и электронных инструментов. Однако существующая классическая сеть гидрологических станций требует полной модернизации и реконструкции, т.к. возросли требования к точности шкалы деления водомерной рейки. К уровенным постам предъявляются особые требования, как по установке, так и по точности [12]. Но в вопросах совершенствования методики определения высот реперов и пунктов остается ряд проблем. Прежде всего, низкая точность координат реперов и фиксации самописца уровня воды, работающих на пределе технической возможности. Основным индикатором изменения поверхности воды является водомерная рейка, на которую нанесена сантиметровая шкала. Незначительное смещение нуля пункта этой рейки по вертикали приводит к ошибке расчета высоты водной поверхности [7]. Плановые координаты представляют важную роль при мониторинге локальных смещений береговой линии.

Изученность проблемы. Определение высот реперов государственной геодезической сети и уровенного поста “Чиназ” производилось в конце прошлого века методами полигонометрии и нивелирования 4 класса [6, 9]. Эти данные зафиксированы в журналах и отчетах управления гидрометеорологической службы. С течением времени плановые и высотные координаты этих пунктов должны быть повторно измерены и вычислены. Однако эти работы не были выполнены из-за реформирования организации и ограниченности финансирования. Только в 2019 году начали производить некоторые экспериментальные измерения кафедрой геодезии и геоинформатики НУУз для научно-

исследовательских целей. Результаты вычислений были опубликованы в периодических журналах, на международных конференциях и научных семинарах по водным проблемам [14, 15]. Тем не менее, задача уточнения координат реперов и водомерных реек остается до конца не решенной.

Традиционно высотную привязку реперов к государственной нивелирной сети осуществляют методом геометрического или тригонометрического нивелирования. Для этого используют оптико-электронные нивелиры и тахеометры. Но самым быстрым и оперативным способом является тригонометрическое нивелирование (рис. 2), при котором высота вычисляется по формуле [3]. При вычислении по этому методу появляются некоторые погрешности в тригонометрических функциях и ошибки определения угла с помощью вертикального круга, которые представлены с следующих формулах:

$$\begin{aligned} H_{lp} &= H_0 + \Delta h, \\ \Delta h &= d \cdot tg\nu + i - l \end{aligned} \qquad (1)$$



Рис. 2. Тригонометрическое нивелирование уровенного поста “ Чиназ”

С течением времени должна быть уточнена геодезическая основа гидрологических станций. Одним из основных звеньев улучшения является повышение точности координат реперов, закрепленных в прибрежной зоне. Определение высоты уровня реки определяется регистратором и водомерной рейкой [11]. По этим результатам можно определить метрические характеристики водной поверхности и вычислить объем воды на определенном интервале времени. Основным средством регистрации является рейка с сантиметровой шкалой, которая жестко установлена на берегу реки. С течением времени и в результате осадки, просадки и влияния боковой силы потока воды основные и рабочие репера испытывают деформацию. Смещение рейки по вертикали приводит к определенному крену, который может быть определен различными способами: визирования (с применением теодолитов); координирования; определения углов или направлений. Однако перед началом полевых работ необходимо выполнить предварительную оценку точности изменения на основе статистического анализа.

Цель и задачи исследований. Целью работы является определение крена рейки гидрологического поста “Чиназ” и величины этого смещения методами математической статистики и дисперсионного анализа. При этом возникает задача линейно-угловых измерений с помощью геодезических приборов.

Материалы и методы. Для оценки отклонений применяют классические методы теории ошибок с коррелированными и некоррелированными аргументами, где нужно определить средние квадратические ошибки (СКО) функции [1]. В этих случаях ошибку функции можно получить как разность между величиной функции, вычисленной с

известными значениями аргументов, и ее теоретической величиной. При этом следует придерживаться принципа, что работы выполняются в одинаковых условиях и одним инструментом. Так как ошибки измерений малы по сравнению с самими величинами, то классическое выражение условного уравнения, приведенное в [4], можно разложить на ряд Тейлора, сохраняя частные производные первого порядка. Значения производных по соответствующим аргументам практически остаются постоянными и могут быть вычислены по приближенным значениям аргументов, в качестве которых можно взять любые результаты. В итоге получается выражение

$$\Delta_F = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \Delta_x + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta_y + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0 \Delta_z + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_0 \Delta_u + R, \quad (2)$$

где R в уравнении (2) есть остаточный член разложения, равный сумме всех нелинейных членов ряда Тейлора.

При оценке точности остаточным членом R в рядах Тейлора пренебрегают [5]. Тогда СКО функции коррелированных аргументов будет равна

$$m_F^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0^2 m_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0^2 m_z^2 + \cdots \left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_0^2 m_u^2 + 2\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 r_{xy} m_x m_y. \quad (3)$$

Для практического использования коэффициенты корреляции должны быть определены из специальных исследований. Если же рассматривать некоррелированные величины, то коэффициенты корреляции в (3) будут равны нулю, тогда как частный случай можно записать СКО функции следующим образом

$$m_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0^2 m_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0^2 m_z^2 + \cdots \left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_0^2 m_u^2}. \quad (4)$$

Иногда искомую величину нельзя определить непосредственно, но можно найти ее значение косвенным путем, измерив одну или несколько величин, связанных с определяемой функциональной зависимостью.

В геодезической практике измерения выполняются несколькими приборами или одним прибором, но двумя наблюдателями. В таких случаях, оценка точности производится по разностям двойных равноточных измерений [2], т.е. массив не содержит систематических изменений. Тогда средняя квадратическая ошибка будет иметь следующее выражение

$$m_i = \pm\sqrt{\frac{[d'^2]}{2(n-1)}}, \quad (5)$$

а ошибку из парных наблюдений можно представить формулой

$$m_i = \pm\frac{1}{2}\sqrt{\frac{[d'^2]}{(n-1)}}. \quad (6)$$

Результаты и обсуждение. На основе вышеизложенных теоретических интерпретаций был произведен расчет СКО функций и определяемых величин. Для этой цели произведено измерение длины отвесной линии от верхней части свайной рейки до уровенной поверхности воды на территории гидрологической станции электронно-оптическим тахеометром Trimble M3DR5 и лазерным дальномером. Трудность заключается в том, что отметка нуля рейки была ниже верхнего уровня реки Сырдарья

(рис. 3). Тем не менее, произведен расчет смещения относительно вертикали (рис. 4).



Рис. 3. Водомерная рейка

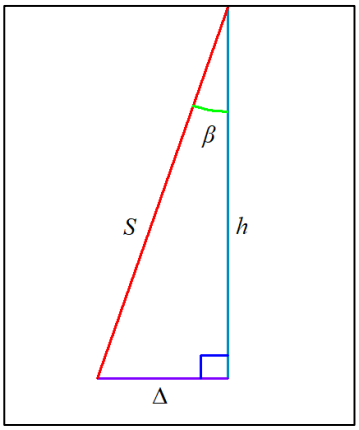


Рис. 4. Схема смещения рейки

Графическая схема свайной рейки, которая представлена на рисунке 4, показывает, что угловое отклонение может быть продифференцировано по известным параметрам, где S – длина свайной рейки, $\boldsymbol{\Delta}$ – линейное отклонение свайной рейки. После несложных преобразований получена предварительная формула СКО для отклонения угла и линейного смещения:

$$m_{\Delta}^2 = (\cos\beta)^2 m_{\beta}^2 S^2 + m_S^2 (\sin\beta)^2 \quad (7)$$

$$m_{\beta}^2 = \frac{m_{\Delta}^2 - m_S^2 (\sin\beta)^2}{(\cos\beta)^2 S^2} \quad (8)$$

В результате погрешность составила ± 0,26″, а для длины свайной рейки ± 0,2см. Поскольку смещение незначительное, то ошибка составила ± 0,01 см. Можно получить экспериментальную точность по линейно-угловым отклонениям свайной рейки, которые получены с помощью электронно-оптического тахеометра. При этом было допущено условие, что измерения выполнены в одинаковых условиях и одним прибором. По методу наименьших квадратов было вычислено математическое ожидание и произведена оценка точности (табл. 1).

Таблица 1

Обработка результатов измерений

№	β_i	ϑ_i	$\vartheta_i\vartheta_i$	№	β_i	ϑ_i	$\vartheta_i\vartheta_i$
1	$2^0\,51'\,04.8''$	0.6	0.36	11	$2^0\,51'\,04.4''$	0.2	0.04
2	$2^0\,51'\,03.9''$	-0.3	0.09	12	$2^0\,51'\,04.5''$	0.3	0.09
3	$2^0\,51'\,04.0''$	-0.2	0.04	13	$2^0\,51'\,04.6''$	0.4	0.16
4	$2^0\,51'\,04.1''$	-0.1	0.01	14	$2^0\,51'\,04.0''$	-0.2	0.04
5	$2^0\,51'\,03.9''$	-0.3	0.09	15	$2^0\,51'\,04.1''$	-0.1	0.01
6	$2^0\,51'\,04.4''$	0.2	0.04	16	$2^0\,51'\,04.3''$	0.1	0.01
7	$2^0\,51'\,04.2''$	0.0	0.00	17	$2^0\,51'\,03.8''$	-0.3	0.09
8	$2^0\,51'\,04.0''$	-0.2	0.04	18	$2^0\,51'\,04.2''$	0.0	0.00
9	$2^0\,51'\,04.3''$	0.1	0.01	19	$2^0\,51'\,04.1''$	-0.1	0.01
10	$2^0\,51'\,03.9''$	-0.3	0.09	20	$2^0\,51'\,04.3''$	0.1	0.01

Так как величины имеют одинаковые значения угловых градусов и минут, то для

эффективности обработки результатов измерений можно взять только значения секунд. При окончательном формировании следует полностью привести значения углов, минут, секунд и их СКО. Обработка результатов, которые приведены в таблице 1, показала, что погрешность составила $\pm 0.26^{"}$. Эта величина совпадает с результатом предварительного расчета точности изменения водомерной рейки. Можно построить график дисперсии по всему массиву данных, вычисляя разности между величинами отклонения угла оси свайной рейки и значением математического ожидания (рис. 5). Такой же график можно построить и для линейного смещения вертикальной оси рейки. При этом возникает вопрос о количестве данных для надежности и достоверности полученных величин. Экспериментально доказано, что количество измерений должно быть минимум 20. Тогда формула Бесселя для оценки качества измерений будет выглядеть таким образом:

$$m_i = \pm\sqrt{\frac{[\vartheta_i^2]}{(n-1)}}. \qquad (9)$$

Если же количество дискретных точек больше 50, то применяется формула Гаусса. Также производится расчет СКО среднего значения или математического ожидания. Применение же закона больших чисел к массиву данных не всегда приводит к улучшению точности вычисления. Это зависит от исходных данных и инструментальных постоянных, которые определяются лабораторным путем или на метрологическом полигоне. Поэтому в качестве эксперимента были использованы 20 угловых величин, для которых на рисунке 5 представлен график изменения значения угла между свайной рейкой и отвесом в зависимости от количества угловых данных. Следует отметить, что отсчет производилось при одном положении электронно-оптического тахеометра Trimble M3DR5. Конечно же, здесь присутствует коллимационная ошибка инструмента, которая не влияет на результаты измерений и ее можно считать постоянной. Также измерение производилось с помощью рулетки и линейки для проверки надежности вычислений, а также доказательства о существовании крена водомерной рейки, хотя невооруженным глазом видно, что имеется явное отклонение рейки от вертикальной оси. Экспериментальные расчеты помогут произвести аналогичные работы для других гидрологических постов.

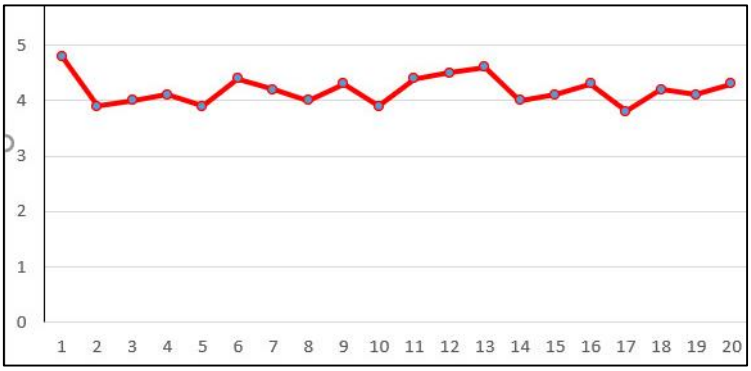


Рис. 5. График изменения угла между рейкой и отвесом

Выводы. Таким образом, оценка точности определяемых величин и функций на основе теории математической обработки является необходимой процедурой при выполнении многократных геодезических измерений. Это позволяет установить предельные значения отклонения от среднего арифметического и, тем самым, выявить грубые ошибки, которые влияют на окончательный результат вычисленных величин. Если эти величины малы, то становится очевидным, что необходимо со всей тщательностью производить измерения и вычисления, потому что это влияет на водный баланс прибрежной зоны. Следовательно, незначительное изменение вертикальной оси

свайной рейки влияет на отсчет по шкале водомерной рейки.

Внедрение современных электронно-оптических и глобальных спутниковых навигационных систем [10] позволяет более точно вычислить метрические характеристики реки и, тем самым, выявить места, где происходит минимальный и максимальный расход воды. Особенно, это важно при постройке каналов и дренажных систем. Горизонтальное смещение приводит к изменению площади водной поверхности и границы прибрежной зоны. В будущем необходимо произвести полную автоматизацию всего процесса измерений и вычислений, привлекая современные цифровые технологии и геоинформационные системы [13]. Постоянный мониторинг турбулентности верхней части реки с помощью комплекса технических средств дает основание к точному исследованию морфометрических и гидрологических характеристик.

Использованная литература:

1. Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. Москва: Недра,1977. 368 с.

2. Бурмистров Г.А. Задачник по способу наименьших квадратов. Москва: Геодезиздат, 1960. 348 с.

3. Гиршберг М.А. Геодезия. Москва: Недра, 1967. 384 с.

4. Гнедин Б.В., Хинчин А.Я. Введение в теорию вероятностей. Москва: Наука, 1982. 158 с.

5. Гнурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. Москва: Высшая школа, 1979. 400 с.

6. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Москва: Недра. 1974. 158 с.

7. Кадыров А.Г., Ражабова Д.Р. Геометрическая интерпретация крена водомерной рейки уровенного поста «Чиназ» (Узбекистан) // Материалы XIII научно-практической конференции «Наука и образование в современном мире. Вызовы 21века. Науки о Земле». Астана, 2023. С. 7-10.

8. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9, ч. 1. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. 313 с.

9. Основные положения о построении государственной геодезической сети СССР. Москва: Геодезиздат, 1961. 29 с.

10. Остроумов В.З., Шануров Г.А., Масленников А.В. Повышение точности определения высот уровенных постов // Геодезия и картография. 2003. № 11. С. 25-29.

11. Руководящий технический материал. Высотная привязка уровенных постов (ГКИНП 03 215 88). Москва: ЦНИИГАиК, 1988. С. 41.

12. Успенский М.С. Условия устойчивости геодезических центров и реперов. Москва: Геодезиздат, 1955. 94 с.

13. Шануров Г.А., Епишин В.И., Остроумов В.З. Определение высот уровенных постов спутниковым методом // Геопрофи, 2004. № 4. С. 11-17.

14. Mirmakhmudov E., Adenbaev B., Rakhmonov D., Nazirova D. (2019), GNSS network of level posts, *Science and Education in the modern world: Challenges of the XXI century*, Nur-Sultan, pp. 47-50.

15. Mirmakhmudov E., Niyazov V., Tleumuratova G., Toshonov B. (2021), GNSS in Uzbekistan for hydrology, *COORDINATES*, vol. XVII, No. 6, pp. 12-15.

References:

1. Bolshakov V.D., Gaidaev P.A. (1977), *Theory of mathematical processing of geodetic measurements*, Moscow, 368 p. (in Russ.).

2. Burmistrov G.A. (1960), *Problem book using the method of least squares*, Moscow, 348 p. (in Russ.).

3. Girshberg M.A. (1967), *Geodesy*, Moscow, 384 p. (In Russ.).

4. Gnedin B.V., Khinchin A.Ya. (1982), *Introduction to probability theory*, Moscow, 158 p. (in Russ.).

5. Gnurman V.E. (1979), *A guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics*, Moscow, 400 p. (in Russ.).

6. *Instructions for leveling I, II, III and IV classes* (1974), Moscow. 158 p. (in Russ)

7. Kadyrov A.G., Razhabova D.R. (2023), Geometric interpretation of the roll of the water gauge at the Chinaz level post, *Materials of the XIII scientific and practical conference "Science and education in the modern world. Challenges of the 21st century. Earth Sciences"*, Astana, pp. 7-10. (in Russ.).

8. *Instructions for hydrometeorological stations and posts* (1984), vol. 9, part 1, Leningrad, 313 p. (in Russ.).

9. *Basic provisions on the construction of the state geodetic network of the USSR* (1961), Moscow, 29 p. (in Russ.).

10. Ostroumov V.3., Shanurov G.A., Maslennikov A.V. (2003), Increasing the accuracy of determining the heights of level posts, *Geodesy and cartography*, No. 11, pp. 25-29. (in Russ.).

11. *Guiding technical material. Altitude reference of level posts (GKINP 03 215 88)* (1988), Moscow, p. 41. (in Russ.).

12. Uspensky M.S. (1955), *Conditions for the stability of geodetic centers and benchmarks*, Moscow, 94 p. (in Russ.).

13. Shanurov G.A., Epishin V.I., Ostroumov V.Z. (2004), Determination of the heights of level posts using the satellite method, *Geoprofi*, No. 4, pp. 11-17. (in Russ.).

16. 14. Mirmakhmudov E., Adenbaev B., Rakhmonov D., Nazirova D. (2019), GNSS network of level posts, *Science and Education in the modern world: Challenges of the XXI century*, Nur-Sultan, pp. 47-50.

17. Mirmakhmudov E., Niyazov V., Tleumuratova G., Toshonov B. (2021), GNSS in Uzbekistan for hydrology, *COORDINATES*, vol. XVII, No. 6, pp. 12-15.

Сведения об авторах:

Мирмахмудов Эркин Рахимжанович – Национальный университет Узбекистана (Ташкент, Узбекистан), доцент кафедры геодезии и геоинформатики, кандидат физико-математических наук. E-mail: erkin_mir@mail.ru.

Тошонов Бекзод Шермамат угли – Национальный университет Узбекистана (Ташкент, Узбекистан), преподаватель кафедры геодезии и геоинформатики. E-mail: toshonovbek@gmail.com

Тлеумуратова Гулсара Мырзабаевна – Национальный университет Узбекистана (Ташкент, Узбекистан), базовый докторант кафедры геодезии и геоинформатики. E-mail: gulinka_22@mail.ru

Тастемирова Мунира Галиевна – Национальный университет Узбекистана (Ташкент, Узбекистан), магистрант кафедры геодезии и геоинформатики. E-mail: muniragaliyevna@gmail.com

Information about authors:

Erkin Mirmakhmudov – National University of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan), Associate Professor of the Department of Geodesy and Geoinformatics, Candidate of Physical and Mathematical Sciences. E-mail: erkin_mir@mail.ru

Bekzod Toshonov – National University of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan), teacher of the Department of Geodesy and Geoinformatics. E-mail: toshonovbek@gmail.com

Gulsara Tleumuratova – National University of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan), postgraduate of the Department of Geodesy and Geoinformatics. E-mail: gulinka_22@mail.ru

Munira Tastemirova – National University of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan), master of the Department of Geodesy and Geoinformatics. E-mail: muniragaliyevna@gmail.com

Для цитирования:

Мирмахмудов Э.Р., Тошонов Б.Ш., Тлеумуратова Г.М., Тастемирова М.Г. Анализ точности наклона водомерной рейки гидрологического поста «Чиназ» // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2023. № 3-4. С. 133-141.

For citation:

Mirmakhmudov E.R., Toshonov B.Sh., Tleumuratova G.M., Tastemirova M.G. (2023), Analysis of the water gauge accuracy hydrological post “Chinaz”, *Central Asian Journal of Geographical Researches*, No. 3-4, pp. 133-141. (In Russ.).