



УДК 551.4.012(470.41)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.3>

Сопоставление эффективности использования современных геодезических методов в изучении последствий бобровой деятельности на малых реках

О. А. Лаврова, А. Г. Шарифуллин, А. М. Гафуров, Р. В. Загретдинов*
Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Аннотация. Тема исследования обусловлена малоизученностью проблемы регулирования малых рек Восточно-Европейской равнины в связи с многократным увеличением численности популяции бобра и появлением большого количества бобровых плотин и прудов. Представлены результаты сопоставления данных трех современных геодезических методов: электронного тахеометра, спутникового позиционирования (ГНСС-оборудование) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Объект исследования – малая река Морквашинка, протекающая по северной оконечности Приволжской возвышенности. Отмечается, что измеренные ГНСС-приемником плановые и высотные отметки в целом хорошо согласуются с данными по тахеометрической съемке, расхождение по высоте составляет 0,5 см (стандартное отклонение – 0,07 см). Указывается, что основным недостатком электронного тахеометра, ограничивающим его использование для съемок днищ долин малых рек является отсутствие прямой видимости снимаемых объектов с прибора в связи с извилистостью реки и густой растительностью. Делается вывод, что по ортофотопланам и цифровым моделям местности, полученным с БПЛА, не всегда удастся точно определить границу береговой линии, а также абсолютные высоты плотины, террасы, урез воды, отметки русла (глубину пруда) из-за густой растительности, однако на них хорошо выделяются русло и пойма реки, бобровые плотины и пруды.

Ключевые слова: *Castor fiber* L., малые реки, геодезические методы, БПЛА, Среднее Поволжье, ГНСС-оборудование.

Благодарности. Авторы выражают благодарность М. Ю. Караванову за предоставленное геодезическое оборудование и консультации в проведении топографической съемки с помощью ГНСС-оборудования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10087, <https://rscf.ru/project/22-77-10087>

Для цитирования: Сопоставление эффективности использования современных геодезических методов в изучении последствий бобровой деятельности на малых реках / О. А. Лаврова, А. Г. Шарифуллин, А. М. Гафуров, Р. В. Загретдинов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 3–17. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.3>

Original article

Comparison of Modern Geodetic Methods in Studying the Impact of Beaver Activity on Small Rivers

О. А. Lavrova, А. G. Sharifullin, А. М. Gafurov, R. V. Zagretdinov*
Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

© Лаврова О. А., А. Г. Шарифуллин, А. М. Гафуров, Р. В. Загретдинов., 2024

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. Multiple increase in the beaver population on the East European Plain has led to the appearance of a large number of beaver dams and ponds on small rivers. At present, the problem of regulating small rivers in this region remains poorly studied due to the above circumstances. This study presents the results of a comparison of modern geodetic methods obtained using an electronic total station, GNSS equipment and UAVs. The small river Morkvashinka, flowing along the northern tip of the Volga Upland, was chosen as the object of the study. The spatial coordinates and altitudes measured by the GNSS receiver generally agree well with the tacheometric survey data. The height difference is 0.5 cm (standard deviation – 0.07). However, the main disadvantage of an electronic total station, which limits its use for surveying linearly elongated objects and small river valleys, is the lack of direct visibility of the objects being photographed from the device due to the highly dissected territory, the tortuosity of the river and dense vegetation. Using orthophoto and digital terrain models obtained from unmanned aerial vehicles, it is not always possible to accurately determine the border of the coastline, as well as the absolute heights of the dam, floodplain, terraces, water edge, channel marks (pond depth) due to dense vegetation. However, the river bed and floodplain, beaver dams and ponds are clearly visible on them.

Keywords: *Castor fiber* L., small rivers, geodetic methods, UAV, Middle Volga region, GNSS equipment.

For citation: Lavrova O.A., Sharifullin A.G., Gafurov A.M., Zagretidinov R.V. Comparison of Modern Geodetic Methods in Studying the Impact of Beaver Activity on Small Rivers. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 47, pp. 3-17. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.3> (in Russian)

Введение

Растущую тревогу по перспективам устойчивого развития наиболее населенной европейской части России вызывают неудовлетворительное состояние малых рек, особенно изменение водного режима, качества воды, усиление интенсивности и частоты засух и наводнений, спровоцированные изменением климата и продолжающимся негативным влиянием человека [Ткачев, Булатов, 2002]. Активное освоение бобром (*Castor fiber* L.) территории Восточно-Европейской равнины в последние десятилетия позволило противостоять последствиям изменения климата и антропогенного воздействия прежде всего на малых реках и повысить устойчивость пойменно-русловых ландшафтов в их долинах [Modeling intrinsic potential ... , 2018].

Основная строительная деятельность бобров заключается в сооружении плотин, жилищ и нор, троп, каналов, что оказывает влияние на гидрологические, геоморфологические и гидрохимические процессы, происходящие в руслах и на поймах рек. Строительство плотин приводит к созданию прудов и последующему регулированию водного режима малых рек. При этом пруды улавливают значительную часть наносов [Butler, Malanson, 2005], уменьшают развитие русловых деформаций [Ibid] и приводят к повышению уровня грунтовых вод [Westbrook, Cooper, Baker, 2006], а также к изменению растительности [The influence of ... , 2023]. Бобровые плотины способствуют изменению продольного профиля реки: образуется ступенчатый профиль с участками малого уклона (пруды) и перепадов (плотины) [Gurnell, 1998].

На берегу прудов бобры часто выкапывают норы, что приводит к перемещению значительного объема грунтового материала в реки [Spatio-temporal ... , 2014]. Со временем эти норы могут обрушиться, что повлечет за собой развитие боковой эрозии [Burrowing invasive ... , 2019]. Также бобры роют неглубокие каналы на широких поймах, чтобы легче

получать доступ к пище и строительным ресурсам [Can beaver impact ... , 2018]. Как и норы, эти каналы могут выступать дополнительным источником наносов в реках [Lamsodis, Ulevičius, 2012].

Для оценки влияния деятельности бобра на изменчивость стока воды, наносов и связанных с ними загрязняющих веществ, а также трансформации пойменно-руслового комплекса малых рек необходимо прежде всего провести картографирование бобровых плотин и связанных с ними прудов вдоль малых рек и выявить связь с морфолого-морфологическими характеристиками этих комплексов. Поэтому на первом этапе выполняются геодезические работы, которые включают в себя крупномасштабную топографическую съемку естественного русла и бобровых прудов, занимающих нередко не только русло, но и часть пойм рек.

В последние десятилетия топографическая съемка природных объектов проводится с использованием высокоточных электронных тахеометров, которые позволяют в высоком разрешении получать данные о рельефе поверхности Земли (цифровая модель поверхности DEM). Данная методика используется для изучения эрозионно-аккумулятивных процессов [Сатдаров, 2016], горизонтальных и вертикальных деформаций русла [Myers, Rediske, McNair, 2019], береговых процессов [Assessment of shoreline ... , 2021] и т. д.

Не менее активно применяются высокоточные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), которые позволяют оперативно определять геодезические координаты объектов и высотные отметки. В последние годы данный метод совместно с эхолотом для батиметрической съемки прудов [Testing a novel ... , 2022] активно используется для получения координат бобровых поселений/хаток [Monitoring, modelling ... , 2022].

В настоящее время широко вовлекаются в данные исследования БПЛА, позволяющие оперативно получать 3D-модели снимаемого участка земной поверхности и составлять их ортофотопланы. Недавние исследования выявили возможности использования БПЛА (или дронов), оснащенных мобильными лазерными системами, в изучении сложнопроходимых водно-болотных угодий [Chabot, Bird, 2013], бобровых прудов [Aerial photography ... , 2015] и т. д. Такая технология может предложить эффективный с точки зрения затрат времени вариант съемки [Colomina, Molina, 2014], результатом которого являются цифровые модели рельефа (ЦММ).

Наличие густой растительности, повышение уровня грунтовых вод, подтопление поймы, накопление илистых и органических частиц затрудняют исследования малых рек, подверженных влиянию бобровой деятельности. Поэтому геодезическая съемка должна осуществляться не только традиционными методами, но и с использованием современных, прежде всего дистанционных. В настоящей работе впервые на примере малой реки лесостепной зоны Восточно-Европейской равнины представлены результаты сопоставления современных геодезических методов для оценки влияния бобровой деятельности, полученные с помощью электронного тахеометра, ГНСС-оборудования и БПЛА.

Территория исследования

Геодезические работы были проведены летом 2022 г. в верхней половине нижнего течения р. Морквашинки (правого притока р. Волги, координаты устья – $55^{\circ} 46' 52,9'' \text{N}$, $48^{\circ} 47' 32,5'' \text{E}$) (рис. 1). Выбор данной реки обусловлен тем, что она является типичной в геоморфологическом отношении для лесостепного севера Приволжской возвышенности Восточно-Европейской равнины [Средняя Волга, 1991]. Общая длина реки по данным ГНСС съемки – 16,2 км (вместе с временным водотоком в верховье – 16,6 км).

Для данной реки характерна хорошо выраженная асимметрия склонов долины. Правый склон на всем протяжении крутой и высокий, левый склон – пологий. В долине реки морфологически выражена небольшими фрагментами низкая (до 0,5–0,7 м) (рис. 2, А) и высокая (до 1,5 м) поймы (рис. 2, Б), более крупными фрагментами – первая надпойменная терраса (до 4–5 м) [Средняя Волга, 1991]. Бассейн р. Морквашинки располагается в зоне широколиственных лесов равнины. Коренная растительность представлена липово-дубовыми лесами с примесью клена, бука и вяза (40 % от общей площади водосбора) [Ландшафты Республики Татарстан, 2007]. Кроме коренного правого берега и верховьев реки территория сильно изменена человеком, что выражается в высокой распаханности. В настоящее время пойма реки в результате активной деятельности бобров (рис. 2, Г) сильно зарастает ивой, лишь отдельные участки используются как пастбище.

Методика исследования

Полевые работы

Цель проведения топографической съемки заключается в определении наиболее характерных точек, отображающих контуры исследуемых объектов, рельефа местности и дна водоемов. В геодезии существует несколько видов съемки местности. Выбор метода зависит от различных факторов: масштаба съемки, размера изучаемого участка, особенностей местности (залесенная, равнинная, холмистая), наличия оборудования, сроков выполнения работ и др. [Сатдаров, 2016]. В настоящее время при топографической съемке широкое применение находят электронные тахеометры. Это приборы, сочетающие в себе угломерное устройство (теодолит) со светодальномером. Отличающим их элементом является встроенная ЭВМ, позволяющая автоматизировать процесс измерений и вычислений по заложенным в ней программам. Предназначены эти приборы для измерения горизонтальных и вертикальных углов с ошибкой 1–5 угловые секунды и расстояний с погрешностью 1–10 мм. В комплект прибора входит отражатель (многие тахеометры могут работать и в безотражательном режиме).

Топографическая съемка бобрового пруда с целью определения положения береговой линии и глубин в русле р. Морквашинка была произведена тахеометром Trimble M3 DR 5". Данная модель является одной из самых компактных, имеет удобный сенсорный экран с простым и понятным интерфейсом.

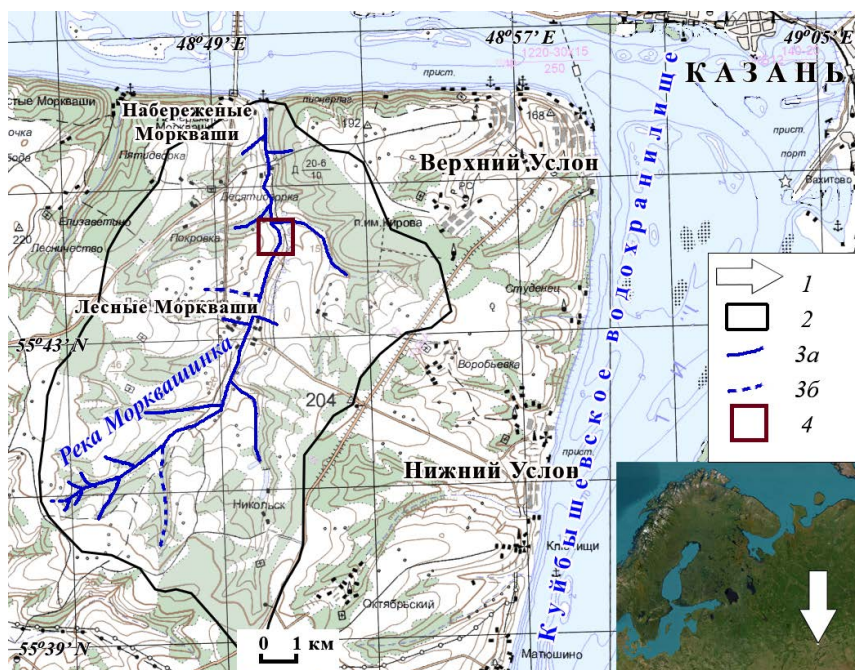


Рис. 1. Бассейн р. Морквашинки: 1 – положение р. Морквашинки, 2 – граница бассейна р. Морквашинки, 3 – водотоки (а – постоянные, б – временные), 4 – участок детальной съемки (топографической и с БПЛА)



Рис. 2. Вид на русло р. Морквашинки:
 А и Б – плотины в русле реки, В – сухой участок русла с плотинной,
 Г – сухой участок русла без плотин

Стандартная точность измерения расстояний (по призме) составляет $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км})$ при возможной дальности наведения на призму до 3000 м. Перед началом съемки определялись координаты положения тахеометра [Красноперов, Сидоров, Соловьёв, 2015]. Для быстрого получения координат базисных станций использовался ГНСС-приемник Emlid Reach RS+ (ошибка в плане $\pm 7 \text{ мм}$, по высоте – $\pm 14 \text{ мм}$), установленный и отцентрированный на штативе. К сожалению, наличие высокой и густой растительности сильно затрудняет использование электронного тахеометра, в связи с чем были установлены четыре временных базиса. Сама съемка проводилась очень медленно из-за частого отсутствия прямой видимости на снимаемые пикеты, поэтому прибор использовался для съемки только одного бобрового пруда, при котором отмечались такие элементы рельефа как положение русла, поймы, береговой линии и уреза воды.

Для ускорения процесса использовался метод спутникового позиционирования (ГНСС-приемник). Основными преимуществами спутникового позиционирования являются всепогодность, глобальность, оперативность, точность и эффективность. Однако в местах с высокой густой растительностью качество ГНСС-измерений зачастую существенно ухудшается из-за проблемы «многолучевости» и частого прерывания сигнала от навигационного спутника до антенны ГНСС-приемника. Для данного типа съемки было выбрано оборудование нового поколения Trimble R12i. Главной особенностью данного прибора является инерциальная система компенсации наклона, которая позволяет принять за точку отсчета наконечник вехи, что позволяет получить координаты труднодоступных, опасных или частично закрытых объектов. Становится необязательным условие выставлять приемник по уровню, что повышает скорость и производительность полевых работ. Кроме того, современное аппаратное и микропрограммное обеспечение этого приемника (технология ProPoint) позволяет получать высокоточные положения в сложных условиях, присущих и для малых рек.

Съемка долины реки проводилась в режиме кинематики реального времени (RTK) с передачей поправок по радио или каналу мобильного интернета, при хорошем качестве которого использовался один ровер (мобильный приемник), связывающийся для приема поправок с базовой ГНСС-станцией KZN2¹. Однако на большей части своей длины, реки были отсняты в режиме Radio RTK, главной особенностью которого является использование двух приемников, один из которых – Trimble R10 – «базовая станция», а второй – Trimble 12 – «ровер». Базовая станция во время съемки использовалась как стационарное устройство для непрерывного обеспечения мобильного ровера информацией об измерениях и коррекции для постобработки и высокоточного позиционирования в реальном времени. В начале работы, на открытой площадке рядом с местом проведения работ, базовый приемник Trimble R10 устанавливается на штативе, а мобильный приемник Trimble R12 крепится на вехе. В программе Trimble Access контроллера Trimble TSC5 создается

¹ Международный сервис ГНСС. URL: <https://igs.org/imaps/station.php?id=KZN200RUS> (дата обращения: 18.10.2023).

задание с указанием параметров съемки, радиосвязи и системы координат проекта. Поправки передаются по радиоканалу частотой 433 МГц (по умолчанию). Встроенные в базовые приемники радиомодемы зачастую имеют мощность до 4–5 Вт и оснащены компактными (до 30 см) антеннами для работы на коротких расстояниях (до 2 км). Для увеличения дальности съемки в режиме RTK-radio применяют внешние радиомодемы мощностью до 35–40 Вт с отдельным блоком питания и более крупными антеннами (до нескольких метров). При работе в радиорежиме при удалении от базовой станции не более 2 км стандартное отклонение полученных координат составило в среднем до 15 мм в плане и до 20 мм по высоте. ГНСС-приемником были определены плановые и высотные отметки элементов долины реки нескольких бобровых прудов.

Проведение работ по крупномасштабному картографированию и созданию цифровой модели высот для территории исследования проводилось с помощью детальной аэрофотосъемки с использованием БПЛА. Основные недостатки метода: влияние растительности на корректность цифровой модели рельефа, необходимость определения точных координат с помощью ГНСС-съемки [Кедич, Голосов, Харченко, 2022].

Для съемки использовался БПЛА DJI Phantom 4 PRO V2, оснащенный камерой DJI FC6310S с фокусным расстоянием 8,8 мм и модифицированный многочастотным ГНСС-приемником. Площадь съемки составила 0,3 км². Полет производился полностью в автоматизированном режиме, для чего в полетный контроллер приемника загружалось полетное задание. План полета определяет высоту, скорость и направление движения БПЛА во время съемки, территорию, подлежащую обследованию, и устанавливает путевые точки для БПЛА, чтобы обеспечить полный охват. План полета был спроектирован таким образом, чтобы учитывать любые препятствия, такие, как крутой обрывистый берег или деревья, которые могут помешать полету. Скорость полета составила 15 м/с, производился он путем последовательного полета по галсам с продольным и поперечным перекрытием соседних снимков равным соответственно 70 и 50 %. Средняя высота полета составила 134 м над поверхностью, таким образом разрешение съемки на местности составило ~3,5 см/пиксель. Для составления полетного задания использовалось мобильное программное обеспечение DroneDeploy.

Камеральная обработка

Обработка данных, полученных с помощью электронного тахеометра, проводилась в программе Кредо Дат: импорт данных из текстовых файлов, предварительная обработка измерений, уравнивание координат пунктов планово-высотного обоснования.

Полевые измерения (вектора RTK и файлы статики на базовых станциях), полученные с помощью ГНСС-оборудования в ходе топографической съемки, были загружены в ПО Trimble Business Center (ТВС), где проводилась их обработка (редактирование, привязка временных базовых станций к опорному пункту KZN2, уравнивание, определение плановых координат и высотных отметок пикетов). При этом средняя погрешность определения

координат после уравнивания составила 2 см в плане и 3 см по высоте (табл. 1). ТВС позволяет представлять результаты съемок в разных системах координат таких, как UTM (широко используемая в научных проектах или в местных системах координат (МСК)). Координаты опорных пунктов проекта для последующего сравнения съемок, выполненных в разные периоды времени, необходимо привязывать или к единой глобальной геоцентрической системе координат (в нашем случае ITRF 2014), или к государственной геодезической сети. Привязка к ITRF легко выполняется при помощи бесплатного сервиса Trimble-RTX PP². Для этого достаточно через указанный сайт загрузить файл статических ГНСС измерений продолжительностью не менее часа или выполнить эту процедуру в ПО ТВС. В процессе обработки ГНСС-измерений рекомендуется переходить от системы геодезических высот (относительно глобального эллипсоида) к системе ортометрических высот (относительно поверхности геоида). В нашем случае для такого перехода использовалась глобальная модель геоида EGM2008.

Таблица 1

Средние квадратические ошибки (СКО) разных видов съемок

Вид съемки	СКО* в плане, м	СКО по высоте, м
Тахеометрическая	0,015	0,009
С использованием ГНСС	0,020	0,030
С БПЛА	0,004	0,008

Примечание: * – вычисляется по формуле Бесселя $\sqrt{\frac{|\Delta^2|}{(n-1)}}$, где Δ – случайная ошибка измерений, м; n – количество измерений.

Для обеспечения требуемой точности БПЛА-съемки проводилось определение координат центров проекций фотографирования методом кинематики с постобработкой от базовой станции KZN2. Уточненные координаты центров фотографирования использовались при обработке материалов полета в программном обеспечении Agisoft Metashape. В результате обработки материалов с БПЛА были получены цифровая модель высот (ЦММ) с разрешением 27 см/пиксель, а также ортофотоплан с разрешением 10 см/пиксель. Средняя погрешность уравнивания по разным методам съемки представлена в табл. 1.

В пакете статистики XLSTAT была проведена обработка высотных отметок, полученных в результате съемки с помощью электронного тахеометра и ГНСС-оборудования: проверка на нормальное распределение (определение критерия Шапиро – Уилка (W), его значимости (p) и объема выборки (N)), надежности двух методов (вычисление среднего значения смещения (M), стандартного отклонения (SD), доверительного интервала (CI) для двух методов и построение графика Бланда – Альтмана) и определение выбросов в наборе данных (определение критерия Граббса (G) и его значимости (p)). В

² Сервис для постобработки данных с ГНСС. URL: <https://www.trimblertx.com/> (дата обращения: 18.10.2023).

ПО QGIS для каждой отснятой в полевых условиях отметки русла/уреза воды, плотины, определялось расстояние от устья исследуемых рек, длина плотины площади прудов и рассчитывались уклоны русла, высота и ширина плотины, глубина и объем воды.

Результаты и их обсуждение

На ортофотопланах, полученных с БПЛА, хорошо выделяются русло р. Морквашинка (светло-синий/серый тон), пойма (прилегающий к руслу участок с густой растительностью), плотины (линейные формы поперек русла/поймы) и пруды (светло-синий/серый тон на пойме) (рис. 3). Несомненным преимуществом использования БПЛА-оборудования является широкий территориальный охват [Кедич, Голосов, Харченко, 2022]. Однако свисающая травянисто-кустарниковая растительность на пойме реки вызывает трудности в определении границы береговой линии, высоты плотины, поймы, террасы, урез воды, отметки русла (глубину пруда). Так, высоты, полученные по результатам съемки с БПЛА (табл. 2), на несколько метров выше, особенно на участке сухого русла и поймы. На террасе и склонах долины, где практически отсутствует древостой, высотные отметки практически не отличаются. LIDAR и воздушная лазерная батиметрия, которые широко применяются в последние годы, в том числе для исследований рек [Kinzel, Legleiter, 2019] и др., могли бы минимизировать влияние растительности. Однако прозрачность воды и отражательная способность дна (особенно бобровых прудов) могут ограничить применение данных методов [Evaluating the capabilities ... , 2016].

Таблица 2

Данные геодезической съемки, полученные по ГНСС и БПЛА

Элементы рельефа речной долины	$h_{\text{ГНСС}}$, м	$h_{\text{БПЛА}}$, м
Русло	66,6	70,1
Пойма	67,9	69,7
Надпойменная терраса	70,4	70,7
Склон долины	71,4	71,4

Достаточно точные координаты и высотные отметки элементов рельефа и характеристик пруда можно получить в ходе ГНСС и тахеометрической съемки. Тест Шапиро – Уилка подтверждает нормальное распределение высотных отметок русла, полученных с использованием электронного тахеометра ($N = 41$, $W = 0,97$, $p = 0,55$) и ГНСС-оборудования ($N = 41$, $W = 0,98$, $p = 0,79$). Рисунок 4, А отображает незначительные систематические смещения абсолютных высот. График Бланда – Альтмана (рис. 4, Б) подтверждает хорошее соответствие данных между двумя методами ($M = 0,005$ (0,5 см), $SD = 0,07$, $CI = 0,13$). Тест Граббса доказывает отсутствие выбросов в различиях парных измерений высотных отметок русла ($G = 2,27$, $p = 0,77$).

Однако основным недостатком электронного тахеометра, который ограничивает его использование для съемок линейно вытянутых (на десятки километров) объектов, долин малых рек, является отсутствие прямой видимо-

сти снимаемых объектов с прибора в связи с высокой расчлененностью территории, извилистостью реки и густой растительности. Поэтому совместное применение ГНСС-оборудования и съемки с БПЛА позволяет составить более полное представление о влиянии бобровой деятельности на малые реки.

Применение геодезических методов позволило выявить в русле нижнего течения р. Морквашинка длиной 1,04 км восемь бобровых плотин. Протяженность запруженной бобровыми плотинами части русла реки составляет 839 м (81 %), русла в естественном состоянии – 201 м (19 %). На продольном профиле исследуемой части реки уклоны в среднем не превышают 8 м/км или 0,8 % (см. табл. 2), что соответствует уклонам русла для нижней части реки [Channel Gradient..., 2023].

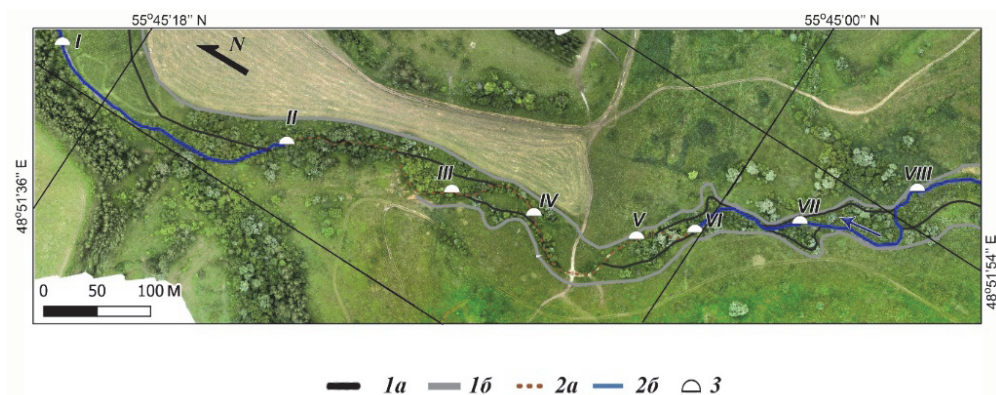


Рис. 3. Часть долины р. Морквашинка на ортофотоплане ее нижнего течения: 1 – элементы рельефа (а – тыловой шов между поймой и первой террасой реки, б – бровка 1-й террасы), 2 – русло реки (а – сухой участок, б – водный участок), 3 – бобровые плотины

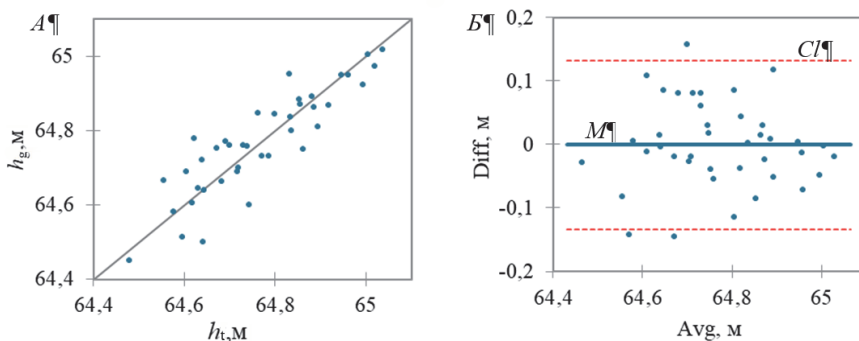


Рис. 4. Статистический анализ данных геодезической съемки бобрового пруда № 1: А – сравнение абсолютных высот по данным ГНСС съемки (h_g) и тахеометрической съемки (h_t). Б – график распределения смещения между двумя методами (результаты теста Бланда – Алтмана) (M – среднее значение смещения, CI – доверительный интервал, $Diff = h_g - h_t$, $Avg = (h_g + h_t)/2$)

Средняя длина прудов составляет 105 м. Высота бобровых плотин не превышает 1,2 м, длина изменяется в широких пределах от 4 до 26 м, составляя в среднем 8,7 м. Такая высота и длина бобровой плотины типична для рек США [Influence of topographic ... , 2020], Центральной Европы [Żurowski, 1992] и лесной зоны европейской части России [Завьялов, 2013]. К тому же дамбы являются важными структурными элементами русла, создающими ступенчатость его продольного профиля [Gurnell, 1998].

По результатам детальной тахеометрической съемки пруда I (рис. 5), средние глубины составили 0,54 м, диапазон изменения глубин – 0,1–1,0 м. Наибольшие глубины характерны для нижней половины пруда. Этот же участок характеризуется довольно крутыми (35–40°) берегами и подводным береговым склоном. В верхней половине пруда отмечаются малые глубины (до 0,6 м) и пологие берега (5–10°). Схожая картина наблюдается и на других исследуемых прудах. Наибольшие глубины (до 1,0–1,5 м) характерны для приплотинной части пруда, а также в плесовых участках подпруженного русла; наименьшие глубины отмечены в верхних частях пруда и на затопленных участках поймы реки – 0,2–0,3 м.

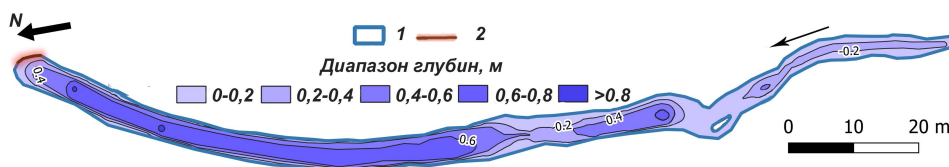


Рис. 5. Фрагмент батиметрической карты пруда I р. Морквашилки (см. рис. 3):
1 – береговая линия, 2 – бобровая плотина

Площадь прудов (табл. 3) на исследуемой части реки в целом соответствует площади прудов на малых реках Бельгии – 169–345 м² [Spatio-temporal ... , 2014], и Северной и Южной Америке – 2327 м² [Rapid surface-water ... , 2017]. Объем воды в прудах колеблется от 457 до 1169 м³, что примерно сопоставимо с объемом воды в прудах Северной и Южной Америки [Rapid surface-water ... , 2017] и несколько ниже объема в Англии [Sediment and nutrient ... , 2018].

Таблица 3

Количественные характеристики исследованных бобровых прудов (см. рис. 3)

Номер на карте (см. рис. 3)	Уклоны русла, м/км	Высота плотины, м	Ширина плотины, м	Длина плотины, м	Длина пруда, м	Площадь зеркала, м ²	Средняя глубина, м	Объем воды, м ³
I	5,1	1,11	0,8	5,8	180	928	0,54	501
II	6,8	1,01	0,63	6,2	140	523*	–	–
III	5,1	0,97	0,65	4,45	81	352*	–	–
IV	6,5	1,20	0,7	4,2	80	239*	–	–
V	12,7	0,75	0,75	4,4	42	225*	–	–
VI	6,9	1,46	1,5	6,5	124	609	0,75	457
VII	3,0	1,3	2,0	12,4	140	1245	0,62	772
VIII	13,7	1,37	2,5	25,6	52	1253	0,71	1169

Примечание: * - восстановлена по высоте плотины

Заключение

Представленные результаты демонстрируют успешную применимость современных геодезических методов для оценки малых рек, трансформированных бобровой деятельностью. ГНСС и тахеометрическая съемка позволяют получить достаточно точные плановые и высотные отметки русла, поймы, плотин и характеристик пруда, что подтверждается различными статистическими тестами. Несомненным преимуществом применения съемки с БПЛА является широкий территориальный охват, который позволяет за короткий промежуток времени получить местоположение плотин, прудов, русла и поймы реки прежде всего в труднодоступных условиях съемки. Данные методы могут быть использованы для мониторинга пойменно-русловых ландшафтов малых рек, подверженных влиянию бобровой деятельности. Полученные результаты носят предварительный характер и в перспективе планируется расширение исследований применимости изложенных методов в контексте общей оценки влияния бобровой деятельности на малые реки в разных природных зонах европейской части России.

Список литературы

- Завьялов Н. А.* Бобры (*Castor fiber*, *C. canadensis*)-средообразователи и фитофаги // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133, № 5. С. 502–528.
- Кедич А. И., Голосов В. Н., Харченко С. В.* Экзогенные процессы в прогляциальных зонах гор: количественные оценки и их точность // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2022. Т. 164, № 1. С. 109–134.
- Красноперов Р. И., Сидоров Р. В., Соловьёв А. А.* Современные геодезические методы высокоточной привязки геофизических съемок на примере магниторазведки // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С. 568–568.
- Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ / О. П. Ермолаев, М. Е. Игонин, А. Ю. Бубнов, С. В. Павлова. Казань : Слово, 2007. 411 с.
- Сатдаров А. З.* Методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2016. Т. 158, № 2. С. 277–292.
- Средняя Волга. Геоморфологический путеводитель / под ред. А.П. Дедкова. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1991. 148 с.
- Ткачев Б.П., Булатов В.И.* Малые реки: современное состояние и экологические проблемы. Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2002. 114 с.
- Aerial photography collected with a multicopter drone reveals impact of Eurasian beaver reintroduction on ecosystem structure / A. K. Puttock, A. M. Cunliffe, K. Anderson, R. E. Brazier // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2015. Vol. 3. P. 123–130.
- Assessment of shoreline transformation rates and landslide monitoring on the bank of Kuibyshev reservoir (Russia) using multi-source data / O. Yermolaev, B. Usmanov, A. Gafurov [et al.] // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. P. 4214.
- Burrowing invasive species: An unquantified erosion risk at the aquatic-terrestrial Interface / G. L. Harvey, A.J. Henshaw, J. Brasington, J. England // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. P. 1018–1036.
- Butler D. R., Malanson G. P.* The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams // Geomorphology. 2005. Vol. 71. P. 48–60.
- Can beaver impact promote river renaturalization? The example of the Raba River, southern Poland / E. Gorczyca, K. Krzemień, M. Sobucki, K. Jarzyna // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 615. P. 1048–1060.
- Chabot D., Bird D. M.* Small unmanned aircraft: precise and convenient new tools for surveying wetlands // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2013. Vol. 1. P. 15–24.

Channel Gradient as a Factor in the Distribution of Beaver Dams and Ponds on Small Rivers: A Case Study in the Northern Extremity of the Volga Upland, the East European Plain / A. G. Sharifullin, A. V. Gusarov, O. A. Lavrova, A. A. Beylich // *Water*. 2023. Vol. 15. P. 2491.

Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79-97.

Evaluating the capabilities of the CASI hyperspectral imaging system and Aquarius bathymetric LiDAR for measuring channel morphology in two distinct river environments / C. J. Legleiter, B. T. Overstreet, C. L. Glennie [et al.] // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2016. Vol. 41. P. 344–363.

Gurnell A. M. The hydrogeomorphological effects of beaver dam-building activity // *Progress in Physical Geography*. 1998. Vol. 22. P. 167–189.

Influence of topographic, geomorphic, and hydrologic variables on beaver dam height and persistence in the intermountain western United States / K. C. Hafen, J. M. Wheaton, B. B. Roper [et al.] // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020. Vol. 11. P. 2664–2674.

Kinzel P. J., Legleiter C. J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. P. 2317.

Lamsodis R., Ulevičius A. Geomorphological effects of beaver activities in lowland drainage ditches // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 2012. Vol. 56. P. 435–458.

Modeling intrinsic potential for beaver (*Castor canadensis*) habitat to inform restoration and climate change adaptation / B. J. Dittbrenner, M. M. Pollock, J. W. Schilling [et al.] // *PLoS One*. 2018 Vol. 13. P. 1–15.

Monitoring, modelling and managing beaver (*Castor fiber*) populations in the River Otter catchment, Great Britain / H. A. Graham, A. Puttock, J. Chant [et al.] // *Ecological Solutions and Evidence*. 2022. Vol. 3. P. e12168.

Myers D. T., Rediske R. R., McNair J. N. Measuring streambank erosion: A comparison of erosion pins, total station, and terrestrial laser scanner // *Water*. 2019. Vol. 11. P. 1846.

Rapid surface-water volume estimations in beaver ponds / D. J. Karran, C. J. Westbrook, J. M. Wheaton [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 21. P. 1039–1050.

Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland / A. Puttock, H. A. Graham, D. Carless, R. E. Brazier // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. Vol. 43. P. 2358-2370.

Spatio-temporal sedimentation patterns in beaver ponds along the Chevral river, Ardennes, Belgium / M. De Visscher, J. Nyssen, J. Pontzele [et al.] // *Hydrological Processes*. 2014. Vol. 28. P. 1602–1615.

Testing a novel sonar-based approach for measuring water depth and monitoring sediment storage in beaver ponds / G. Bradbury, A. Puttock, G. Coxon [et al.] // *River Research and Applications*. 2022. Vol. 39. P. 266–273.

The influence of Eurasian beaver (*Castor fiber* L.) activity on the transformation and functioning of riparian phytocoenoses in the southern boreal zone (European Russia) / N. G. Nazarov, V. E. Prokhorov, A. G. Sharifullin [et al.] // *Earth*. 2023. Vol. 4. P. 384–397.

Westbrook C. J., Cooper D. J., Baker B.W. Beaver dams and overbank floods influence groundwater–surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area // *Water Resources Research*. 2006. Vol. 42. P. 1–12.

Żurowski W. Building activity of beavers // *Acta Theriologica*. 1992. Vol. 37. P. 403–411.

References

Zavyalov N.A. Bobry (*Castor fiber*, *C. sanadensis*)-sredoobrazovateli i fitofagi [Beavers (*Castor fiber* and *Castor canadensis*), the founders of habitats and phytophages]. *Uspekhi sovremennoy biologii* [Biology Bulletin Reviews], 2014, vol. 4, no. 2, pp. 157-180. (in Russian)

Kedich A.I., Golosov V.N., Kharchenko S.V. Ekzogenyye protsessy v proglyatsialnykh zonakh gor: kolichestvennyye otsenki i ikh tochnost [Surface processes in mountainous proglacial areas: Quantitative assessments and their accuracy]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences], 2022, vol. 164, no. 1, pp. 109-134. (in Russian)

Krasnoperov R.I., Sidorov R.V., Soloviev A.A. Sovremennyye geodezicheskiye metody vysokotchnoy privyazki geofizicheskikh s"yemok na primere magnitorazvedki [Modern geodetic methods for high-accuracy survey coordination on the example of magnetic exploration]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2015, vol. 55, pp. 547-554.

- Ermolaev O.P., Igonin M.E., Bubnov A.Yu., Pavlova S.V. *Landshafty Respubliki Tatarstan. Regional'nyy landshaftno-ekologicheskyy analiz*. [Landscapes of the Republic of Tatarstan. Regional landscape-ecological analysis]. Kazan, Slovo, 2007, 411 p. (in Russian)
- Satdarov A.Z. Metody issledovaniya regressivnogo rosta ovragov: dostoinstva i nedostatki [Methods for research of the regressive growth in gullies: advantages and disadvantages]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences], 2016, vol. 158, no. 2, pp. 277-292. (in Russian)
- Srednyaya Volga. Geomorfologicheskyy putevoditel* [Middle Volga. Geomorphological guide] (Ed. by A.P. Dedkov). Kazan, Kazan University Publ., 1991, 148 p. (in Russian)
- Tkachev B.P., Bulatov V.I. *Malye reki: sovremennoye sostoyaniye i ekologicheskyye problemy* [Small rivers: current state and environmental problems]. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library SB RAS, 2002, 114 p. (in Russian)
- Puttock A.K., Cunliffe A.M., Anderson K., Brazier R.E. Aerial photography collected with a multirotor drone reveals impact of Eurasian beaver reintroduction on ecosystem structure. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2015, vol. 3, pp. 123-130.
- Yermolaev O., Usmanov B., Gafurov A. et al. Assessment of shoreline transformation rates and landslide monitoring on the bank of Kuibyshev reservoir (Russia) using multi-source data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, pp. 4214.
- Harvey G.L., Henshaw A.J., Brasington J., England J. Burrowing invasive species: An unquantified erosion risk at the aquatic-terrestrial interface *Reviews of Geophysics*, 2019, vol. 57, pp. 1018-1036.
- Butler D.R., Malanson G.P. The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams. *Geomorphology*, 2005, vol. 71, pp. 48-60.
- Gorczyca E., Krzemiń K., Sobucki M., Jarzyna K. Can beaver impact promote river renaturation? The example of the Raba River, southern Poland. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 615, pp. 1048-1060.
- Chabot D., Bird D.M. Small unmanned aircraft: precise and convenient new tools for surveying wetlands. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2013, vol. 1, pp. 15-24.
- Sharifullin A.G., Gusarov A.V., Lavrova O.A., Beylich A.A. Channel Gradient as a Factor in the Distribution of Beaver Dams and Ponds on Small Rivers: A Case Study in the Northern Extremity of the Volga Upland, the East European Plain. *Water*, 2023, vol. 15, pp. 2491.
- Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 2014, vol. 92, pp. 79-97.
- Legleiter C.J., Overstreet B.T., Glennie C.L. et al. Evaluating the capabilities of the CASI hyperspectral imaging system and Aquarius bathymetric LiDAR for measuring channel morphology in two distinct river environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, vol. 41, pp. 344-363.
- Gurnell A.M. The hydrogeomorphological effects of beaver dam-building activity. *Progress in Physical Geography*, 1998, vol. 22, pp. 167-189.
- Hafen K.C.; Wheaton J.M., Roper B.B. et al. Influence of topographic, geomorphic, and hydrologic variables on beaver dam height and persistence in the intermountain western United States. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, vol. 11, pp. 2664-2674.
- Kinzel P.J., Legleiter C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, pp. 2317.
- Lamsodis R., Ulevičius A. Geomorphological effects of beaver activities in lowland drainage ditches. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2012, vol. 56, pp. 435-458.
- Dittbrenner B.J., Pollock M.M., Schilling J.W. et al. Modeling intrinsic potential for beaver (*Castor canadensis*) habitat to inform restoration and climate change adaptation. *PLoS One*, 2018 vol. 13, pp. 1-15.
- Graham H.A., Puttock A., Chant J. et al. Monitoring, modelling and managing beaver (*Castor fiber*) populations in the River Otter catchment, Great Britain. *Ecological Solutions and Evidence*, 2022, vol. 3, pp. e12168.
- Myers D.T., Rediske R.R., McNair J.N. Measuring streambank erosion: A comparison of erosion pins, total station, and terrestrial laser scanner. *Water*, 2019, vol. 11, pp. 1846.
- Karran D.J., Westbrook C.J., Wheaton J.M. et al. Rapid surface-water volume estimations in beaver ponds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 1039-1050.
- Puttock A., Graham H.A., Carless D., Brazier R.E. Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, vol. 43, pp. 2358-2370.

De Visscher M., Nyssen J., Pontzele J. et al. Spatio-temporal sedimentation patterns in beaver ponds along the Cheval river, Ardennes, Belgium. *Hydrological Processes*, 2014, vol. 28, pp. 1602-1615.

Bradbury G., Puttock A., Coxon G. et al. Testing a novel sonar-based approach for measuring water depth and monitoring sediment storage in beaver ponds. *River Research and Applications*, 2023, vol. 39, pp. 266-273.

Nazarov N.G., Prokhorov V.E., Sharifullin A.G. et al. The influence of Eurasian beaver (*Castor fiber L.*) activity on the transformation and functioning of riparian phytocoenoses in the southern boreal zone (European Russia). *Earth*, 2023, vol. 4, pp. 384-397.

Westbrook C.J., Cooper D.J., Baker B.W. Beaver dams and overbank floods influence groundwater-surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area. *Water Resources Research*, 2006, vol. 42, pp. 1-12.

Zurowski W. Building activity of beavers. *Acta Theriologica*, 1992, vol. 37, pp. 403-411.

Сведения об авторах

Лаврова Ольга Александровна

инженер лаборатории «Баланс С»,

Институт экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный

университет

Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

e-mail: lavrovaolya-2011@mail.ru

Шарифуллин Айдар Гамисович

кандидат географических наук,

доцент кафедры ландшафтной экологии,

Институт экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный

университет

Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

e-mail: AGSharifullin@kpfu.ru

Гафуров Артур Маратович

кандидат географических наук,

старший научный сотрудник

Научно-исследовательского центра Центр

превосходства киберфизических систем,

IoT и IoE, Институт физики

Казанский (Приволжский) федеральный

университет

Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

e-mail: AMGafurov@kpfu.ru

Загреддинов Ренат Вагизович

кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры астрономии и космической

геодезии, Институт физики

Казанский (Приволжский) федеральный

университет

Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

e-mail: Renat.Zagretdinov@kpfu.ru

Information about the authors

Lavrova Olga Alexandrovna

Engineer of the Laboratory "Balance C",

Institute of Environmental Science

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008,

Russian Federation

e-mail: lavrovaolya-2011@mail.ru

Sharifullin Aidar Gamisovich

Candidate of Science (Geography),

Associate Professor of the Department of

Landscape Ecology, Institute of Environmental

Science

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008,

Russian Federation

e-mail: AGSharifullin@kpfu.ru

Gafurov Artur Maratovich

Candidate of Science (Geography),

Senior Researcher Research Center Center for

Excellence in Cyber-Physical Systems, IoT and

IoE, Institute of Physics

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008,

Russian Federation

e-mail: AMGafurov@kpfu.ru

Zagretdinov Renat Vagizovich

Candidate of Science (Physics and

Mathematics), Associate Professor of the

Department of the Astronomy and Cosmic

Geodesy, Institute of Physics

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008,

Russian Federation

e-mail: Renat.Zagretdinov@kpfu.ru

Код научной специальности: 1.6.19

Статья поступила в редакцию 21.11.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 11.03.2024

The article was submitted November, 21, 2023; approved after reviewing February, 20, 2024; accepted for publication March, 11, 2024