



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.3.06

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>



Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири

© Л.И. Аузина^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью исследования являлась разработка методики оперативного прогноза изменения гидродинамического режима грунтовых вод в результате барражного эффекта при строительстве сооружений с глубоким заложением фундаментов. Основным методом послужило создание аналитической модели в результате вариативных решений уравнения Лапласа. Решения разрабатывались в процессе исследований на территориях исторических центров Иркутска и других городов Восточной Сибири. В результате были построены прогнозные схемы глубин формирования уровня грунтовых вод и проведена оценка территорий по условиям подтопления. Разработана аналитическая модель для прогноза подпора подземных вод, представляющая собой простую и вполне универсальную структуру, которая может быть использована для прогнозных расчетов на территориях исторических городов, находящихся в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях. На основе анализа имеющегося материала сделан вывод о том, что значительную роль в формировании нового подпорного горизонта играют предварительная вертикальная планировка территории, правильный подход к выбору типа фундамента, а также сезонные колебания уровня подземных вод.

Ключевые слова: подпор, уровень грунтовых вод, аналитическая модель, прогноз, заглубленный фундамент

Для цитирования: Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 73–84. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>

Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities

© Larisa I. Auzina^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the research work is to develop a procedure for on-line prediction of the groundwater hydrodynamic mode change caused by the barrage effect of deep foundation structure construction. The main method used is the development of an analytical model as a result of variant solutions of the Laplace equation. The solutions have been elaborated in the course of studies conducted in historical centers of Irkutsk and other cities of Eastern Siberia. As a result, diagrams predicting the formation depth of groundwater level have been created, and the territories have been assessed according to their flooding conditions. An analytical model has been developed for backwater prediction. The model is rather simple, universal and can be applied for predictive calculations on the territories of historical cities located in similar geological and hydrogeological conditions. The available material analyzed, it is concluded that preliminary vertical planning of the territory, correct approach to foundation type selection as well as seasonal rise of underground water play a significant role in the formation of a new headwater elevation.

Keywords: backwater, groundwater level, analytical model, prediction, deep foundation

For citation: Auzina L.I. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):73–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>

Введение

Подтопление, вызванное различными причинами, отмечается во многих городах мира, в том числе в городах Соединенных Штатов Америки, Великобритании, Франции, Германии, Индии, Казахстана, Китая, Кореи и др. [1–

11]. В России подтапливаются многие населенные пункты в европейской части страны, на Урале, на Дальнем Востоке, в Сибири [12, 13]. Крайне сложная ситуация в этом смысле сложилась на застроенных территориях юга Восточной Сибири. Причины разнообразны:



катастрофические паводковые ситуации, утечки из старых подземных коммуникации, неработающая ливневая канализация, барражный эффект фундаментов глубокого заложения новых гражданских сооружений, часто имеющих подземные автостоянки [11, 14].

В 2002 г. Государственной думой Российской Федерации был принят закон «Об объектах культурного наследия народов России», в котором особо отмечается конституционная обязанность каждого гражданина Российской Федерации заботиться о сохранении исторического и культурного наследия страны. При этом только за период 2000–2010 гг. в России было уничтожено более 2500 памятников истории и культуры. Состояние половины памятников, находящихся под государственной охраной, неудовлетворительное, для большей части необходимо принятие срочных мер по спасению. По данным Министерства культуры, почти 65 % объектов культурно-исторического наследия в стране находится в предаварийном или аварийном состоянии¹. Большинство зданий, возраст которых составляет более 100 лет, подвергается негативному воздействию экологических факторов, в том числе подтоплению фундаментов. Для исторического города (или его исторической части) основным документом должен стать проект реконструкции города с выделением границ охранных зон, что позволит снять ряд градостроительных проблем, связанных с выделением земельных участков под новое строительство на территориях исторических центров. При этом должны учитываться риски подтопления исторических зданий при создании новых построек с глубоким заложением фундаментов.

В связи с актуальностью описанной выше проблемы целью исследования стала разработка методики оперативного прогноза изменения гидродинамического режима грунтовых вод в результате барражного эффекта, создаваемого сооружениями с фундаментами глубокого заложения, для принятия инженерных решений на начальных стадиях разработки архитектурно-строительных проектов.

Методы исследования

На территориях с незначительной глубиной положения уровня грунтовых вод (УГВ) строительство зданий, имеющих фундаменты глубокого заложения, в результате барражного эффекта приводит к повышению риска подтопления смежных участков с находящимися на них сооружениями. Барражный эффект – это подъем УГВ перед преградой по потоку и его снижение за ней вследствие перекрытия фильтрационного потока подземных вод (ПВ). В зависимости от гидрогеологических характеристик перекрытого водоносного горизонта и габаритов инженерного сооружения величина подпора может изменяться от нескольких сантиметров до метров и приводить к деформациям грунтового массива, подтоплению территории и расположенных рядом зданий и сооружений, а также другим неблагоприятным последствиям.

Как уже отмечалось, подтопление, связанное с барражным эффектом, широко развито на территориях современных городов, где застраиваются не только окраинные площади, но и историко-культурные зоны, от чего страдают фундаменты старых зданий и часто разрушаются исторические постройки. Проведенные автором исследования были направлены на выделение основных причин изменения гидрогеологических условий городских территорий, а также факторов, определяющих формирование гидродинамического режима.

Основные причины изменения гидрогеологических условий разделяются на естественные и техногенные. Естественные причины – это в первую очередь сезонные колебания выпадения атмосферных осадков. К техногенным причинам можно отнести аварийные сбросы воды из водохранилищ Ангарского каскада, в том числе из Иркутского водохранилища, а также барраж, связанный со строительством и эксплуатацией проектируемого сооружений с глубоким заложением фундаментов.

Режимообразующие факторы подразделены на региональные и локальные. Региональные факторы включают подпор ПВ от

¹ III Парламентский форум «Историко-культурное наследие России» // Союз малых городов Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://smgrf.ru/3-parlamentskij-forum-istoriko-kul-turnoe-nasledie-rossii/> (07.12.2020).



каналов, рек и других водоемов, от утечек промышленных предприятий с большим потреблением воды, полей фильтрации, от инфильтрации утечек из крупных коллекторов и пр. К локальным факторам относятся подпор ПВ от эффекта барража подземных сооружений, от инфильтрации утечек из водонесущих коммуникаций и образование воронок депрессии от действия различных видов дренажей при строительстве и эксплуатации сооружений.

В данной работе акцент сделан на локальном техногенном факторе, обусловленном строительством современных зданий с подземными торговыми комплексами, подземными стоянками и другими объектами глубокого подземного заложения, вызывающими подпор ПВ за счет барражного эффекта.

Весьма сложная ситуация, связанная с подпором ПВ, сложилась в городах Восточной Сибири, в том числе в Иркутске, Черемхово, Усолье-Сибирском и других. Например, в Иркутске большая часть городского центра представлена зданиями конца XVIII – начала XIX в., уровень ПВ находится на глубине 1,2–5 м от поверхности земли [15]. Незначительная часть свободных от застроек площадей, как правило, предоставляется для сооружения крупных торговых комплексов или жилых домов с глубоким заложением фундаментов и подземными автостоянками, что сопровождается переформированием структуры фильтрационного потока ПВ.

Территория исследований находится в переходной зоне от платформенной равнины к Байкальской горной области. Рельеф территории умеренно расчленен долинами рек и распадками первого и второго порядков. Водораздельные пространства имеют плоские или округлые вершины с абсолютной отметкой 480–520 м, максимальная глубина расчленения достигает 160 м.

В гидрогеологическом отношении район приурочен к Иркутскому бассейну – наиболее крупной структуре Ангаро-Ленского артезианского бассейна первого порядка.

Основными водовмещающими отложениями являются породы четвертичного (гравийно-галечные, песчано-глинистые породы), юрского (песчаники, аргиллиты, алевролиты)

и кембрийского (доломиты, соленосные породы) возрастов. Осадочные отложения имеют блоковую структуру, унаследованную от кристаллического фундамента [16]. В пределах исследуемых территорий положение блоков горных пород обусловило формирование основных геоморфологических структур. В сочетании с системами тектонических разрывов и эрозионной сетью они оказали решающее влияние на формирование современных инженерно-гидрогеологических условий [15, 17, 18].

Типовой разрез центральной территории г. Иркутска имеет двухслойное строение: верхняя часть представлена рыхлыми отложениями четвертичного возраста, нижняя – скальными юрскими образованиями. При этом верхняя часть сложена гравийно-галечными и песчано-супесчаными отложениями четвертичного возраста, значительно отличающимися друг от друга не только строением, но и фильтрационными характеристиками. Первыми от поверхности залегают песчано-супесчаные породы с коэффициентом фильтрации K не более 5–6 м/сут., в этом слое и формируется зеркало грунтовых вод. Гравийно-галечные отложения имеют гораздо более высокие фильтрационные показатели K – до 100–300 м/сут. Уровень ПВ четвертичного водоносного горизонта расположен на глубине 1,2–5 м от поверхности земли. Горизонт подстилается песчаниками, алевролитами и углистыми сланцами юрского возраста, K которых в тектонически нарушенных зонах достигает 100 м/сут. при средних значениях 0,5–1,5 м/сут. Перекрыт водоносный горизонт верхнечетвертичных отложений техногенными грунтами средней мощностью 1,5 м [11, 13, 15].

Моделирование таких ситуаций в ряде городов Иркутского района с прогнозом подъема УГВ на сопредельных территориях осуществлялось неоднократно [11–13, 15, 17, 19], на основании чего была выведена эмпирическая зависимость.

Последовательность и методика работы представлены в данной статье на примере нескольких объектов, выбор которых обусловлен типичными для данной территории геологическим строением и гидрогеологическими условиями (рис. 1).

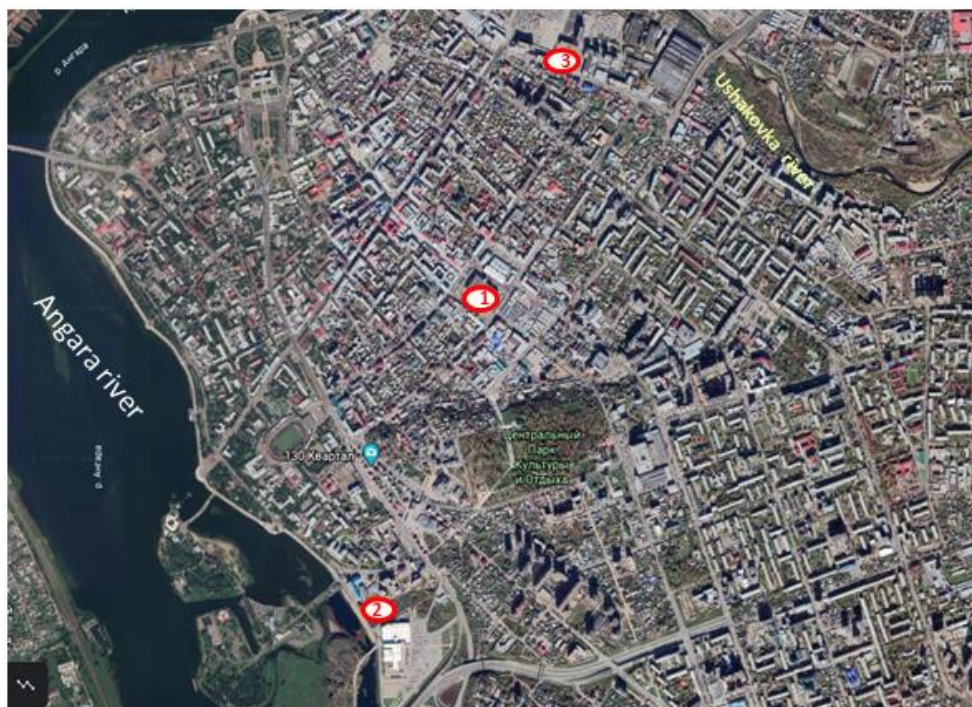


Рис. 1. Расположение ключевых (типовых) участков № 1, 2, 3, г. Иркутск
Fig. 1. Location of key (standard) sites no. 1, 2, 3 in Irkutsk

Участок № 1, расположенный в центральной зоне исторической застройки г. Иркутска, был предназначен для строительства 5–10-этажного здания с трехуровневой подземной автостоянкой и проектной глубиной заложения фундамента 8–12 м. По итогам анализа исходных материалов [10–13, 15, 17, 18, 20] была сформирована база данных, включающая 13 атрибутивных позиций по 96 точкам.

В результате схематизации природных условий, которая проводилась в соответствии с существующими российскими стандартами² и рекомендациями, разработанными в качестве приложений к ним³, была составлена гидродинамическая модель.

Вертикальное строение обводненной толщи аллювиальных отложений террасы принято двухслойным:

– верхняя часть разреза представлена плотным суглинком и супесью с незначительными прослоями песка суммарной средней мощностью 2,45 м и коэффициентом фильтрации $K = 1–5$ м/сут.;

– средняя и нижняя части разреза представлены гравийно-галечниковыми верхнечетвертичными отложениями мощностью от 2 до 5,1 м, являющимися основным коллектором ПВ и имеющими однородно-изотропное строение и $K = 84,5$ м/сут., при этом переформирование УГВ происходит в суглинисто-супесчаных породах верхней части разреза [17].

Гравийно-галечниковые породы практически на всей исследуемой территории подстилаются значительно менее проницаемыми элювиальными отложениями юрского возраста с $K = 0,5–1,5$ м/сут.

Гидравлический режим аллювиального горизонта рассматривается как безнапорный. При этом незначительная разница между появившимся и установившимся УГВ в ряде скважин, пробуренных на территории с 1966 по 2008 гг. (от 0,05 до 0,4 м), вероятнее всего, связана с влиянием напорных вод юрского водоносного горизонта, а также локальными линзами водоупорных пород в верхнечетвертичных отложениях.

² СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85 // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054204> (07.12.2020).

³ Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. Справочное пособие к СНиП 2.06.15-85 // Библиотека нормативной документации [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/2/2697/> (07.12.2020).



Таким образом, гидродинамическая модель территории представляется в виде схемы, изображенной на рис. 2.

Уклон зеркала ПВ / имеет различные значения и зависит от положения основной дрены (в данном случае это р. Ангара), а также ряда купольных структур, сформировавшихся на территории в результате утечек из подземных коммуникаций. Основное движение потока направлено с юго-востока на северо-запад, при этом уклон потока / возрастает с 0,016 до 0,027.

Пласт моделируется в виде неограниченной расчетной схемы. Инфильтрационное питание принято равномерным по всей площади, его влияние на изменение УГВ Δh на данном этапе моделирования не учитывается, поскольку инфильтрационное питание в однородных пластах не влияет на характер стационарного подпора [21, 22]. В данном случае задача рассматривается как стационарная, детерминированная, то есть в рамках выделенных стадий развития подпора основные элементы потока ПВ остаются неизменными. Прогноз стационарного процесса заключается в построении депрессионных кривых на завершающей стадии определенного временного интервала, отвечающего принятым граничным условиям [23, 24].

Распределение уровней в одномерном однородно-изотропном безнапорном пласте при решении стационарной задачи без учета инфильтрационного питания описывается модификацией уравнения Лапласа [21, 22]:

$$\frac{\partial^2 (\Delta h^2 / 2)}{\partial x^2} = 0.$$

На первом этапе строилась актуальная модель (современные условия), на втором – прогнозная модель (условия, сформировавшиеся в результате подпора) [13, 25].

Анализ актуальной модели с использованием программного комплекса Surfer 10 позволил представить общую картину существующих гидродинамических условий, детализировать направление движения потока, определить значения гидравлических уклонов зеркала ПВ на различных участках исследуемой территории, а также среднюю глубину формирования УГВ, которая в данном случае составила 2,5 м.

Прогнозное моделирование показало, что максимальный подъем уровня на участке составит около 0,5 м, минимальная глубина от уровня воды до поверхности земли после строительства сооружения – 1,7 м (рис. 3). Таким образом, в соответствии с существующими российскими нормативными документами территория в основном оценивается как умеренно подтопленная. Общее направление движения потока ПВ не изменилось, локальное переформирование УГВ произошло вокруг проектируемого сооружения, что связано с развитием подпора ПВ, и охватило значительную часть площади, занятой историческими зданиями (рис. 4).

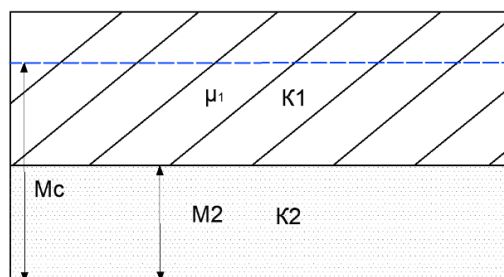


Рис. 2. Гидродинамическая модель участка исследований:

M_c – мощность потока грунтовых вод (среднее значение – 5,02 м); μ_1 – коэффициент водонасыщения верхнего слоя (0,92); K_1 – коэффициент фильтрации верхнего слоя (1–5 м/сут.); K_2 – коэффициент фильтрации нижнего слоя (84,5 м/сут.); M_2 – средняя мощность нижнего слоя (4,07 м)

В обобщенной гидродинамической модели использованы усредненные значения параметров

Fig. 2. Hydrodynamic model of the site under investigation:

M_c – groundwater flow rate (average value is 5.02 m); μ_1 – water saturation ratio of the upper layer (0.92); K_1 – filtration coefficient of the upper layer (1–5 m/day); K_2 – filtration coefficient of the lower layer (84.5 m/day); M_2 – average flow rate of the lower layer (4.07 m)

The generalized hydrogeological model uses average parameter values

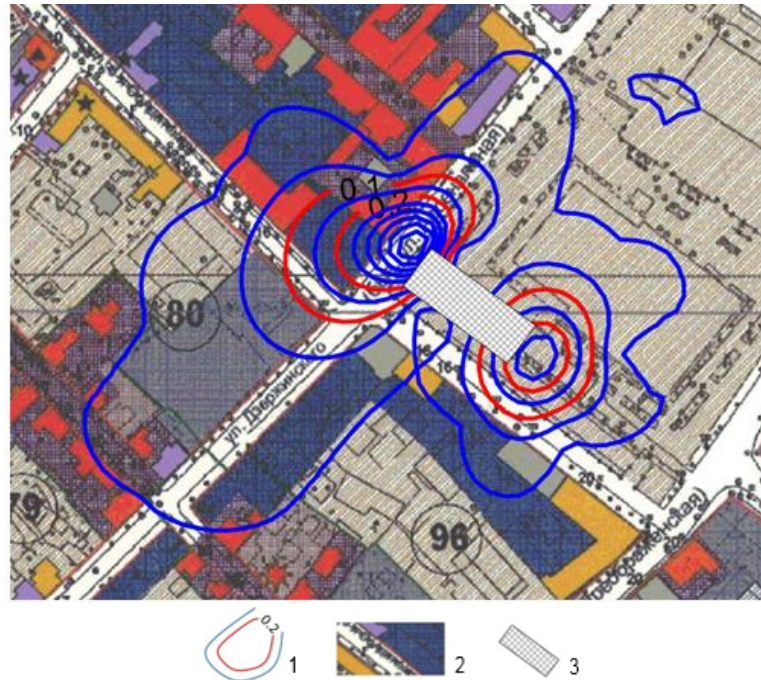


Рис. 3. Изолинии величины подъема уровня грунтовых вод Δh :

1 – изолинии величины подъема уровня грунтовых вод в результате подпора, шаг – 0,05 м; 2 – подложка со схемой расположения объектов историко-культурного наследия; 3 – проектируемое сооружение

Fig. 3. Isolines of the groundwater level rise Δh :

1 – isolines of the groundwater level rise due to backwater, iteration 0.05 m; 2 – underlay with the location diagram of historical and cultural heritage objects; 3 – project structure

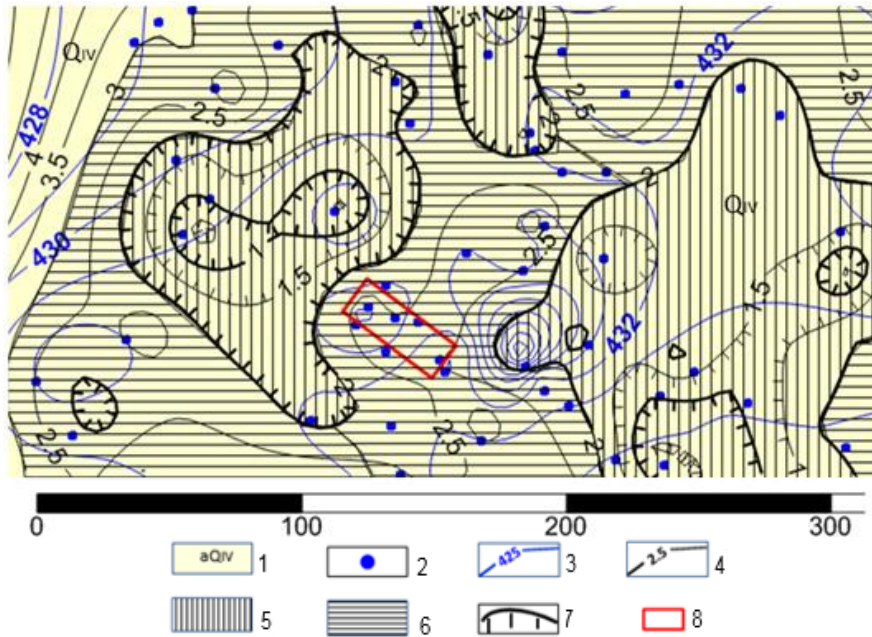


Рис. 4. Схема районирования территории участка № 1 по степени подтопления:

1 – аллювиальные отложения четвертичного возраста; 2 – горные выработки (скважины, колодцы, подвалы);
 3 – абсолютная отметка уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения);
 4 – глубина формирования уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м;
 5 – умеренно подтопленная территория; 6 – слабо подтопленная территория;
 7 – граница умеренно подтопленной территории; 8 – проектное сооружение

Fig. 4. Zoning scheme of the site no. 1 by the degree of water logging:

1 – quarternary alluvial sediments; 2 – mine openings (wells, shafts, pits); 3 – absolute mark of the underground water level after the groundwater rise (construction); 4 – depth of the underground water level formation after the groundwater rise (construction), m; 5 – moderately waterlogged territory; 6 – weakly waterlogged territory; 7 – boundary of the moderately waterlogged territory; 8 – project structure



Описанный алгоритм применялся и на других исследуемых участках, где ситуация складывалась аналогичным образом и территория характеризовалась как подтопленная с различным процентным соотношением подзона сильного, умеренного и слабого подтопления.

Участок № 2 расположен в центральной части г. Иркутска, в русловой части р. Ангары. Здесь проектируется строительство жилого массива с заложением фундамента более 6 м. Подземная часть строения будет использоваться для парковки автомобилей. Свайный фундамент частично перекрывает поток грунтовых вод как по площади, так и в разрезе. Проектом предусмотрена вертикальная планировка территории путем грунтовой отсыпки мощностью более 2 м. В совокупности использование свайного фундамента и вертикальной планировки территории позволит избежать массового подтопления территории несмотря на подъем УГВ до 0,3 м (рис. 5).

Участок № 3 находится также в центре г. Иркутска, в русловой части р. Ушаковки, правого притока р. Ангары. Глубина заложения ленточного фундамента проектируемого здесь административно-делового центра составляет 4,5 м. Вертикальной планировки территории не предусмотрено. В результате при незначительном подъеме уровня ПВ до 0,2 м значительная часть территории окажется в подтопленном состоянии (рис. 6).

Полученные результаты показали, что наименьшее подтопление соответствует территории, на которой предусматривается предварительная планировка в виде отсыпки техногенным грунтом и использование свайного фундамента.

Результаты исследования и их анализ

В результате проведенных исследований, направленных на прогноз изменения гидрогеологических условий, были выделены основные причины этого процесса и режимобразующие факторы.

В представленной работе наиболее детально рассмотрен вопрос прогноза локального техногенного фактора, обусловленного строительством современных зданий с подземными сооружениями глубокого заложения, вызывающими подпор ПВ за счет барражного эффекта.

Моделирование развития подпора на ряде участков Иркутска и других городов Иркутского района, а также результаты вариативного аналитического решения уравнения Лапласа для принятой расчетной схемы (см. рис. 1), включающего решение системы уравнений в частных производных параболического типа при заданных начальных и граничных условиях, показали, что наибольшее влияние на подпор имеют гидравлический уклон потока и ширина проектируемого сооружения (см. рис. 3). Сделанные выводы позволили составить и использовать следующее аналитическое решение для оценки повышения УГВ Δh [17]:

$$\Delta h = \frac{l \cdot B}{1,78},$$

где l – уклон зеркала ПВ; B – ширина подпорной стенки (барража), м; 1,78 – коэффициент, полученный аналитическим путем.

Взятые для расчета значения градиентов соответствуют реально существующим в грунтовом потоке верхнего водоносного горизонта на исследуемых территориях. Расчетные значения ширины здания составили 15, 25, 50, 80, 110, 170, 200 м, что вполне отвечает размерам проектируемых в настоящее время зданий при глубине заложения фундаментов до 8 м (рис. 7).

Необходимо отметить ограничения при применении данной формулы:

- условно-однородная фильтрационная толща;
- перпендикулярность здания и потока;
- совершенный врез здания;
- постоянство или отсутствие инфильтрационного питания.

Переход к расчету подпора от несовершенного вреза проектируемых сооружений может быть осуществлен путем пересчета эмпирического коэффициента 1,78 в приведенной выше формуле в процентном соотношении с глубиной вреза, как это было сделано для объектов № 2 и 3.

Обсуждение полученных результатов

Уровенная поверхность грунтовых вод принадлежит к числу весьма динамичных показателей. Так, за период 1984–1997 гг. среднегодовой уровень по ряду наблюдательных

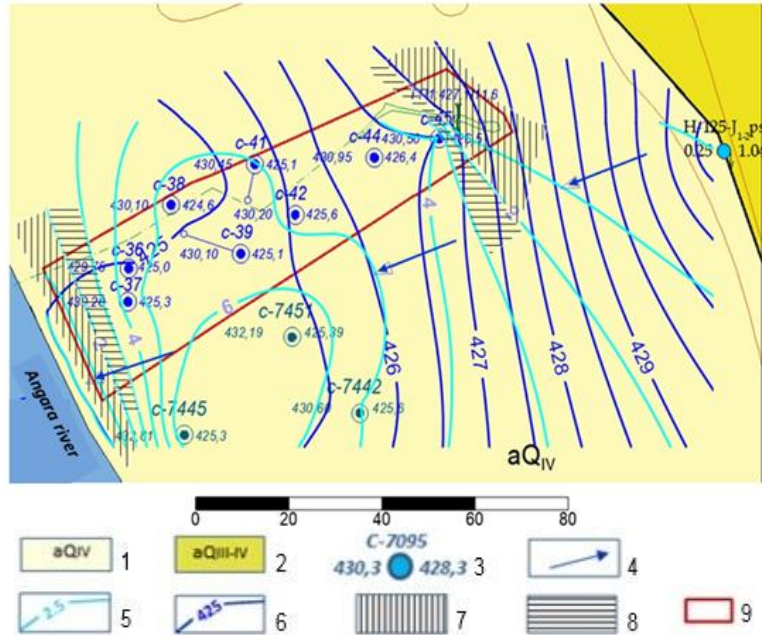


Рис. 5. Схема районирования территории участка № 2 по степени подтопления:

1, 2 – аллювиальные отложения четвертичного возраста; 3 – скважина: сверху – номер, слева – абсолютная отметка поверхности земли, справа – абсолютная отметка уровня подземных вод, м; 4 – направление движения потока подземных вод; 5 – глубина формирования уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м; 6 – абсолютная отметка уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м; 7 – умеренно подтопленная территория;

8 – слабо подтопленная территория; 9 – проектное сооружение

Fig. 5. Zoning scheme of the site no. 2 by the degree of water logging:

1, 2 – quaternary alluvial sediments; 3 – well: at the top – number, on the left – absolute mark of the earth surface, on the right – absolute mark of the underground water level, m; 4 – underground water flow direction;

5 – depth of the underground water level formation after the groundwater rise (construction), m; 6 – absolute mark of the underground water level after the groundwater rise (construction), m; 7 – moderately waterlogged territory;

8 – weakly waterlogged territory; 9 – project structure

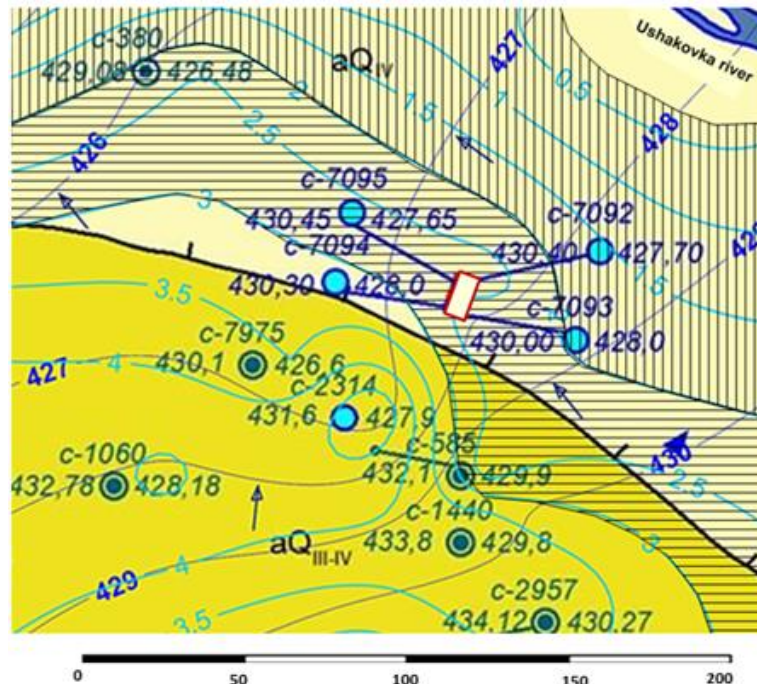


Рис. 6. Схема районирования территории участка № 3 по степени подтопления

Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. Zoning scheme of the site no. 3 by the degree of water logging

See the legend on Fig. 5

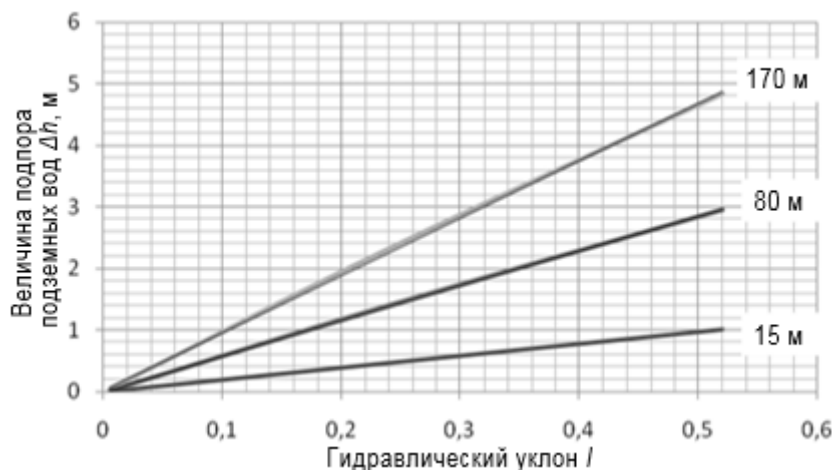


Рис. 7. Величина подпора подземных вод Δh при различных значениях гидравлического уклона I и ширине здания B , м
Fig. 7. Backwater value Δh for different values of the hydraulic gradient I and the building's width B , m

скважин, расположенных в центральной части г. Иркутска, изменился на 0,8–1 м. Ввиду данного факта при разработке технологических схем следует учитывать, что прогнозное положение УГВ может достичь значений 0,9–1,4 м от поверхности земли. В этом случае значительная часть территории будет классифицироваться как умеренно подтопленная [12]. Особенно такой прогноз важен для центральных частей городов, где кроме современных построек подтапливаются архитектурные памятники, большая часть которых является национальным достоянием и находится в аварийном состоянии из-за быстро развивающихся деформаций подземных частей. В настоящее время для защиты фундаментов исторических зданий используется обмазочная гидроизоляция, лишь в незначительной степени защищающая их от разрушительного воздействия ПВ. При этом наиболее актуальными для городской среды являются предупредительные мероприятия в виде инженерной подготовки территорий, а также защитные дренажи, которые применяются в настоящее время в процессе строительства и эксплуатации сооружений, в том числе вертикальная планировка, то есть искусственное повышение планировочных отметок территории застройки, гидронамыв, пристенные дренажи и пр. [25–27].

Перечисленные аспекты определяют необходимость оперативного и при этом до-

стоверного прогноза изменения УГВ при строительстве сооружений с последующей инженерной подготовкой городской территории и разработкой действенных защитных мероприятий, что представляется крайне актуальной и важной проблемой, решение которой необходимо для сохранения историко-культурного наследия старинных городов Сибири.

Заключение

Результаты представленных исследований и их анализ показали, что наиболее значительное влияние на величину подпора ПВ оказывают гидравлический уклон потока ПВ I и ширина проектируемого сооружения B . Вариативные решения позволили выбрать аналитическую модель для прогноза подпора ПВ. Следует отметить, что представленная аналитическая модель носит вполне универсальный характер и может использоваться для прогноза подпора ПВ на территориях многих исторических городов, находящихся в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях.

Значительную роль в формировании нового подпорного горизонта играет предварительная вертикальная планировка территории, а также использование свайного фундамента. Кроме того, при оценке глубины формирования уровня ПВ и последующей разработке профилактических и защитных мероприятий необходимо учитывать сезонные подъемы УГВ.

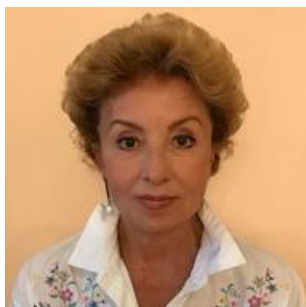
**Список литературы**

1. Davies J.A. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation // *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1987. Vol. 1. P. 139–144.
2. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control: case study // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1989. Vol. 115. Iss. 4. P. 588–607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(588))
3. Whitaker D. Groundwater control for the Stratford CTRL station box // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering*. 2004. Vol. 157. Iss. 4. P. 183–191. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.183>
4. Preene M., Loots E. Optimisation of dewatering systems // *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. P. 2841–2846.
5. Preene M., Roberts T.O.L. Groundwater control for construction in the Lambeth Group // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering*. 2002. Vol. 155. Iss. 4. P. 221–227. <https://doi.org/10.1680/geng.2002.155.4.221>
6. Davis G.M., Horswill P. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England // *Engineering Geology*. 2002. Vol. 66. Iss. 1-2. P. 1–18.
7. Long M., Murphy M., Roberts T.O.L., O'Brien J., Clancy N. Deep excavations in water-bearing gravels in Cork // *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2015. Vol. 48. Iss. 2. P. 79–93.
8. Preene M., Fisher S. Impacts from groundwater control in urban areas // *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. P. 2847–2852.
9. Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E., Nikitenkov A., Nazarov A. Degree of areal drainage assessment using digital elevation models // *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2014. Vol. 21. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/21/1/012018>
10. Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // *География и природные ресурсы*. 2011. № 2. С. 54–62.
11. Лоншаков Г.С., Аузина Л.И. Оценка ведущих факторов эволюции подземной гидросферы урбанизированных территории (на примере г. Иркутска) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 11. С. 50–59.
12. Lonshakov G.S., Auzina L.I. Method of integral geoeological evaluation of the underground hydrosphere sustainability within the territory of Irkutsk city // *Environmental and Engineering Aspects for Sustainable Living: International Symposium*. Hannover: EWG e.V, 2017. P. 18–20.
13. Auzina L.I. Engineering geology and hydrogeology in an urban environment of East Siberia, Russia // *8th International IAEG Congress*. 2000. Vol. 6. P. 4521–4525.
14. Куранов Н.П., Муфтахов А.Ж. Проблема подтопления грунтовыми водами территории больших городов. М.: Промышленное строительство, 1986. 27 с.
15. Аузина Л.И., Серова Г.Е. Влияние техногенного подтопления на устойчивость грунтовых оснований и сооружений г. Иркутска // *Город: прошлое, настоящее, будущее*. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 124–128.
16. Лобацкая Р.М., Стрельченко И.П. Информационные технологии в оценке разломно-блоковых структур урбанизированных территорий (на примере г. Иркутска) // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 11. С. 76–88.
17. Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод при освоении застроенных территорий с использованием аналитических зависимостей // *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. 2013. Т. 1. № 1. С. 57–63.
18. Кламер М., Дружинина И.Е., Глебова Н.М. Особенности расположения реки Ушаковки в Иркутске и ее природный потенциал // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2017. Т. 7. № 2. С. 117–125.
19. Auzina L.I., Parshin A.V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 33. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
20. Большаков А., Суродина А., Максимова Э. Принцип ландшафтосообразности в градостроительном планировании // *Проект Байкал*. 2016. Т. 13. № 49. С. 54–59. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.49.1050>
21. Гавич И.К., Зекцер И.С., Ковалевский В.С., Язвин Л.С., Пиннекер Е.В., Бондаренко С.С. [и др.]. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1984. 242 с.
22. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. М. Недра, 1976. 408 с.
23. Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.
24. Бондаренко С.С., Боровский Л.В., Гавич И.К., Дзюба А.А., Зекцер И.С., Ковалевский В.С. [и др.]. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 242 с.
25. Абрамов С.К., Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С., Донской Г.В., Муфтахов А.В. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве. М.: Стройиздат, 1978. 177 с.
26. Белов А.А., Кирюшин А.В., Маскайкин В.Н. Инженерная подготовка городской территории при подтоплении // *Научное обозрение. Международный научно-практический журнал*. 2017. № 1. С. 1–10.
27. Сологаев В.И. Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. 416 с.



References

1. Davies JA. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation. *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1987;1:139–144.
2. Abu-Rizaiza OS, Sarikaya HZ, Ali Khan MZ. Urban groundwater rise control: case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1989;115(4):588–607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(588))
3. Whitaker D. Groundwater control for the Stratford CTRL station box. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering*. 2004;157(4):183–191. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.183>
4. Preene M, Loots E. Optimisation of dewatering systems. *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015: 2841–2846.
5. Preene M, Roberts TOL. Groundwater control for construction in the Lambeth Group. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering*. 2002;155(4):221–227. <https://doi.org/10.1680/geng.2002.155.4.221>
6. Davis GM, Horswill P. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England. *Engineering Geology*. 2002;66(1-2):1–18.
7. Long M, Murphy M, Roberts TOL, O'Brien J, Clancy N. Deep excavations in water-bearing gravels in Cork. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2015;48(2):79–93.
8. Preene M, Fisher S. Impacts from groundwater control in urban areas. *Proceedings of the 16th ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015:2847–2852.
9. Pokrovsky V, Pokrovsky D, Dutova E, Nikitenkov A, Nazarov A. Degree of areal drainage assessment using digital elevation models. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2014;21:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/21/1/012018>
10. Shenkman BM, Sholokhov PA, Shenkman IB. Underflooding of Irkutsk caused by phreatic rise. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2011;2:54–62. (In Russ.)
11. Lonshakov GS, Auzina LI. Evaluation of determining factors of underground hydrosphere evolution within urban areas (on the example of Irkutsk). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(11):50–59. (In Russ.)
12. Lonshakov GS, Auzina LI. Method of integral geoeological evaluation of the underground hydrosphere sustainability within the territory of Irkutsk city. *Environmental and Engineering Aspects for Sustainable Living: International Symposium*. Hannover: EWG e.V; 2017. p.18–20.
13. Auzina LI. Engineering geology and hydrogeology in an urban environment of East Siberia, Russia. *8th International IAEG Congress*. 2000;6:4521–4525.
14. Kuranov NP, Muftakhov AZh. *The problem of big cities underflooding by ground waters*. Moscow: Promyshlennoe stroitel'stvo; 1986. 27 p. (In Russ.)
15. Auzina LI, Serova GE. Influence of technogenic underflooding on stability of Irkutsk ground base and structures. In: *Gorod: proshloe, nastoyashchee, budushchee = City: past, present, future*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000. p.124–128. (In Russ.)
16. Lobatskaya RM, Strelchenko IP. Gis-based analysis of fault patterns in urban areas (a case study of Irkutsk city). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;11:76–88. (In Russ.)
17. Auzina LI. Analytic forecast of groundwater hydrostatic upthrust in built-up areas development. *Sovremennye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya*. 2013;1(1):57–63. (In Russ.)
18. Klamer M, Druzhinina IE, Glebova NM. Arrangement peculiarities of Ushakovka river in Irkutsk and its natural potential. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2017;7(2):117–125. (In Russ.)
19. Auzina LI, Parshin AV. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33: 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
20. Bolshakov A, Surodina A, Maksimova E. The landscape congruity principle in urban planning. *Proekt Baikal*. 2016;13(49):54–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.49.1050>
21. Gavich IK, Zektser IS, Kovalevskii VS, Yazvin LS, Pinneker EV, Bondarenko SS, et al. *Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 242 p. (In Russ.)
22. Lukner L, Shestakov VM. *Geofiltration modeling*. Moscow: Nedra; 1976. 408 p. (In Russ.)
23. Lomize GM. *Filtration in fractured rocks*. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat; 1951. 127 p. (In Russ.)
24. Bondarenko SS, Borevskii LV, Gavich IK, Dzyuba AA, Zektser IS, Kovalevskii VS, et al. *Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics*. Novosibirsk: Nauka; 1983. 242 p. (In Russ.)
25. Abramov SK, Degtyarev BM, Dzekter ES, Donskoi GV, Muftakhov AV. *Prediction and prevention of territory underflooding by ground water in construction*. Moscow: Stroizdat; 1978. 177 s. (In Russ.)
26. Belov AA, Kiryushin AV, Maskaikin VN. Engineering preparation of urban area under flooding. *Nauchnoe obozrenie. Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskii zhurnal*. 2017;1:1–10. (In Russ.)
27. Sologaev VI. *Filtration calculations and computer modeling for protection against underflooding in urban construction*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University; 2002. 416 p. (In Russ.)

**Сведения об авторе / Information about the author****Аузина Лариса Ивановна,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: lauzina@mail.ru

Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics, and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: lauzina@mail.ru

Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

*Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 09.12.2020; одобрена после рецензирования 12.01.2021; принята к публикации 10.02.2021.

The article was submitted 09.12.2020; approved after reviewing 12.01.2021; accepted for publication 10.02.2021.