

## ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 556;551.4

*ПОКРОВСКИЙ ВИТАЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ, аспирант,  
vdp@sibmail.com*

*ДУТОВА ЕКАТЕРИНА МАТВЕЕВНА, докт. геол.-мин. наук, профессор,  
dutova@sibmail.com*

*КУЗЕВАНОВ КОНСТАНТИН ИВАНОВИЧ, канд. геог.-мин. наук, доцент,  
vdp@sibmail.com*

*Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

*ПОКРОВСКИЙ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ, докт. геол.-мин. наук,  
профессор,  
vdp@sibmail.com*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

### **ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ПОДТОПЛЯЕМОСТИ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ТОМСКА**

Рассмотрена возможность использования ГИС-технологий для разработки информационно-поисковой системы, позволяющей оперативно производить анализ пространственно-временных изменений геологической среды для оценки степени развития процессов подтопления городской территории. Результаты работы могут быть востребованы ведомствами и службами для контроля и оперативного управления состоянием геологической среды, оценки вероятности возникновения, масштабов и интенсивности нежелательных последствий антропогенного воздействия, обоснования управленческих и инженерных решений по обеспечению комфортной экологически безопасной обстановки, оценки стоимости земель городской территории и пр.

**Ключевые слова:** техногенное подтопление; ГИС-технологии; уровень грунтовых вод; урбанизированные территории.

*VITALY D. POKROVSKIY, Research Assistant,  
vdp@sibmail.com*

*EKATERINA M. DUTOVA, DSc, Professor,  
dutova@sibmail.com*

*KONSTANTIN I. KUZEVANOV, PhD, A/Professor,  
Tomsk Polytechnic University,*

*30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

*DMITRII S. POKROVSKII, DSc, Professor,*

*Tomsk State University of Architecture and Building,*

*2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM OF UNDERFLOODING ESTIMATION IN TOMSK-CITY**

The article considers the development of the information retrieval system based on GIS-technologies, that allows the efficient analysis of spatial and temporal changes of the geological environment and retrieval of all necessary information about hydrogeological conditions. The results can be used by agencies and services for the geological environment control and operation management, and the estimation of the probability, potential, and intensity of adverse effects of human activity, justification of managerial and engineering solutions to provide the ecologically-friendly environment, etc.

**Keywords:** anthropogenic underflooding; GIS-technology; groundwater level; urbanized terrain.

Особенностью урбанизации в условиях Томска является ведение строительства в чрезвычайно сложных условиях, которые определяются малыми размерами рабочих площадок, их близостью к существующей (в том числе исторической) застройке, наличием сети подземных инженерных коммуникаций, а также воздействием поверхностных и грунтовых вод. Таким образом, на застройщика ложится ответственность за то, как повлияет его деятельность на состояние окружающей среды и насколько экономически эффективными окажутся проектные решения, которые он намеревается использовать.

Для Томска, как и многих других городов мира, характерны опасные геологические процессы, одним из которых является техногенное подтопление, вызывающее сложности в эксплуатации подземных коммуникаций, резко ухудшающее экологическую обстановку и создающее угрозу для зданий и сооружений.

Изучение процессов подтопления на территории г. Томска начато специалистами-гидрогеологами в 70–80-е гг. прошлого столетия и продолжается в настоящее время, однако оперативное использование имеющейся информации в значительной мере сдерживается традиционной формой представления картографических материалов на бумажных носителях. В этой связи нами предпринята попытка актуализации результатов гидрогеологических исследований с использованием ГИС-технологий.

Современные методы обработки картографической информации позволяют по-новому представить элементы геологического строения и гидрогеологических условий в виде фрагментов многослойной электронной карты и существенно расширить сферу применения накопленного фактического материала. Это обстоятельство и предопределяет актуальность работы. В практическом отношении актуальность исследований процессов подтопления городских территорий определяется необходимостью использования существующих

ющих закономерностей при разработке защитных мероприятий и принятии проектных решений экологической направленности.

В основу работы положены материалы, собранные в ходе исследований сотрудниками Томского политехнического университета, Томского государственного архитектурно-строительного университета, ТомскГИСИЗа, Института проблем жилищно-коммунального хозяйства, и материалы натурных исследований, проводившихся для уточнения закономерностей и эволюции процессов подтопления на некоторых участках города [1–3].

Исследование проведено на базе теоретических представлений о механизмах развития процессов подтопления, изучения естественно-природных и техногенных факторов их формирования, компьютерных технологий анализа пространственно-временных изменений параметров геологической среды и взаимообусловленности разнонаправленных процессов. Использован весь цикл необходимых методических приемов, начиная с комплексного анализа и актуализации материалов проведенных ранее инженерных изысканий, натурального обследования, построения картографических моделей с использованием ГИС-технологий.

Актуализация материалов ранее проведенных исследований заключалась в оцифровке созданных ранее карт и оценке степени подтопления точечных объектов на основе глубин залегания уровня подземных вод.

В качестве топографической основы, на которую производились привязки, использованы покрытия электронной карты города [4]: изолинии абсолютных отметок рельефа и кварталы застройки с адресной привязкой. Оцифрованная геолого-гидрогеологическая информация представлена семейством линий (изолинии уровней грунтовых вод, верховодки) и замкнутых полигонов (контуры территорий развития верховодки и различных типов фильтрационных разрезов, участки с различной интенсивностью водопотребления) (рис.1).

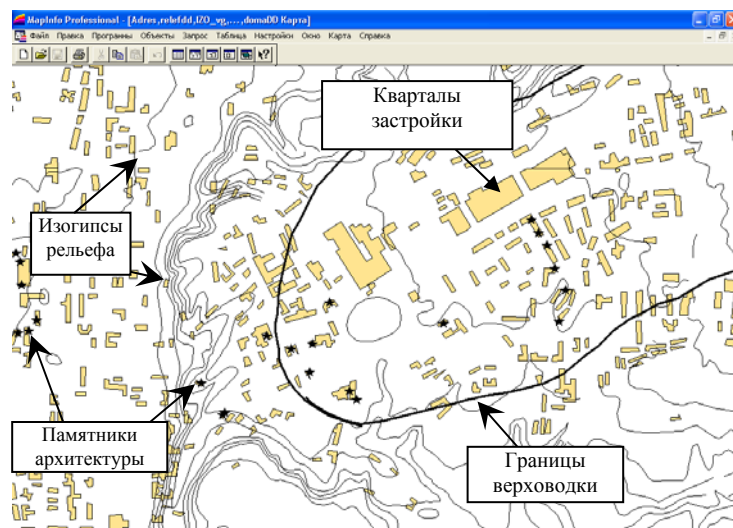


Рис. 1. Результат оцифровки растрового изображения фрагмента схематической гидрогеологической карты. На фоне горизонталей рельефа и кварталов городской застройки показаны границы верховодки

Для оперативной оценки степени подтопляемости территории г. Томска использовались возможности электронной среды ArcGis.

На основе цифровой модели рельефа и уровней подземных вод, полученной из линейных объектов горизонталей (рис. 2), созданы GRID-представления этих поверхностей с непрерывным распределением по площади проинтерполированных значений абсолютных отметок рельефа и уровней подземных вод (верховодки и первого от поверхности грунтового водоносно-горизонта) [5, 6].

В итоге мы имеем группу слоев, привязанных к координатной сетке.

Далее выяснялись роль и взаимосвязь факторов подтопления, определялась их количественная оценка, производилось построение новых электронных карт специализированной гидрогеологической информации (цифровой модели рельефа и на ее основе карты порядков речных долин, уклонов поверхности рельефа, дренированности территорий), разрабатывалась возможность оценки степени подтопления в любой точке территории города.

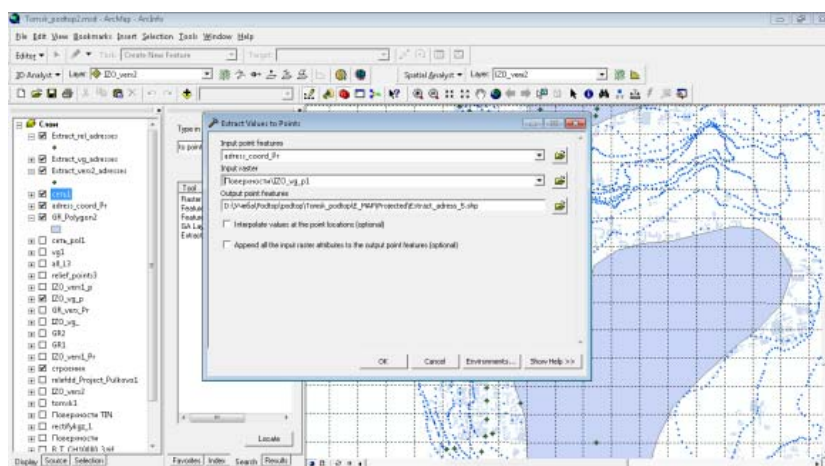


Рис. 2. Функция «Extract values to points». Преобразование линий в точки

Подтопление формируется под действием природных и техногенных факторов, наибольшее значение среди которых имеют геологическое строение, интенсивность дополнительного питания подземных вод и дренированность территории, характеризующая скорость и объем оттока гравитационных вод.

Эта информация является одним из ключевых критериев для оценки степени подтопления территории (объекта).

Ниже остановимся на исследовании роли этих отдельных факторов. Для оценки геологического строения городской территории с точки зрения возможности формирования процессов подтопления ранее она была проработана по типам фильтрационного разреза. В основу выделения типов было положено соотношение легкопроницаемых слоев и слоев, которые могут рассматриваться в качестве относительных водоупоров. Выделены одно-, двух- и трехслойные типы разрезов, среди которых наиболее склонны к формированию верховодки и процессов подтопления двух- и трехслойные разрезы, обо-

значенные индексами Ф-II-I и Ф-III-I. Эти разрезы представлены грунтами с высокими фильтрационными свойствами мощностью от 2 до 10–12 м, подстилающимися слабопроницаемыми и водоупорными разностями. Карта типов фильтрационных разрезов оцифрована в программном комплексе ArcGis. Полигональными объектами были выделены различные типы фильтрационных разрезов. Определены наиболее интересующие нас потенциально подтопляемые участки, относящиеся к Ф-II-1, Ф-III-1 по типу фильтрационного разреза. Нарушение водного баланса данных территорий при техногенном воздействии приводит к формированию верховодки и развитию процессов подтопления. Их площадь составляет 55 % территории Томска.

Дренированность территории, наряду с типом фильтрационного разреза и интенсивностью источников обводнения, предопределяет степень потенциальной подтопляемости. Как показатель, качественно характеризующий условия разгрузки подземных вод, дренированность зависит от гипсометрических взаимоотношений областей питания и дренирования, расчлененности рельефа, особенностей литологического строения региона и наличия благоприятных условий для разгрузки [7].

По нашему мнению, главными факторами, обуславливающими дренированность территории, являются: уклон дневной поверхности, расчлененность рельефа, водопроницаемость и литологический состав пород. Для формализации степени дренированности территории целесообразно ввести «коэффициент дренированности» с пределами изменения от 0 (недренируемая территория) до 1 (территория со 100%-й дренированностью). За дренированность принято произведение значений плотности эрозионной сети и уклонов дневной поверхности, выраженное в условных единицах. Выделены 4 группы:

- хорошо дренируемые (>30 у. е.);
- умеренно дренируемые (20–30 у. е.);
- слабо дренируемые (10–20 у. е.);
- недренируемые (<10 у. е.).

В соответствии с критериями, характеризующими степень дренированности территории, для составления карты дренированности нами проводились подготовительные картографические построения на основе цифровой модели рельефа. Эти построения включали составление карты эрозионного расчленения рельефа, карты плотности эрозионной сети и карты уклонов дневной поверхности рельефа. Последние две использовались непосредственно для построения карты дренированности территории.

Конфигурация полученных полей соответствующих градаций хорошо коррелирует с конфигурацией потенциально подтопляемых территорий, показанных на ранее составленных в бумажном варианте картах, что свидетельствует о принципиальной правильности выбранных подходов к оценке дренированности.

Степень потенциальной подтопляемости застраиваемых территорий определяется суммарным воздействием природных и техногенных факторов.

Поскольку система многофакторная, с многочисленными прямыми и обратными связями, необходимо, используя принципы системного подхода, определиться с параметрами ее целого и отдельных составляющих.

Уровень залегания подземных вод непосредственно определяет, подтопляется ли исследуемая территория. Территория Томска представлена преимущественно селитебной застройкой. С учетом этого факта нами были приняты четыре категории, характеризующие глубину залегания подземных вод: приповерхностное (0–2 м), неглубокое (2–5 м), среднее (5–10 м), глубокое (10–15 м).

В городе из водопроводно-канализационных сетей может теряться не менее 30–40 % от подаваемого расхода, т. е. до 60–80 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Распределение потерь по площади можно считать пропорциональным водопотреблению, которое для Томска, практически не имеющего предприятий с резко повышенным водопотреблением, для целей ранжирования дополнительного питания может быть разбито на следующие категории: менее 50; 50–100; 100–200; более 200 м<sup>3</sup>/сут на 1 га территории.

Наличие связи между интенсивностью развития подтопления и важнейшими факторами показывает, что каждый из них обладает относительной самостоятельностью и собственными особенностями воздействия на геологическую среду. Взаимодействие факторов дает начало цепи причинно-следственных явлений, которые приводят к развитию (или блокировке) процессов подтопления (таблица).

#### Сводные показатели степени потенциальной подтопляемости

Степень потенциальной подтопляемости территории	Тип фильтрационного разреза	Дренажность, у. е.	Удельное водопотребление, м <sup>3</sup> /сут·га	Глубина залегания подземных вод, м
Неподтопляемая (развитие процессов подтопления маловероятно)	Ф-I-I	>30	50	>15
Низкая (территории не склонны к развитию процессов подтопления и формирования верховодки)	Ф-I-2; Ф-II-2; Ф-III-2	20-30	50–00	10-15
Умеренная (развиваются процессы заболачивания и локальные зоны переувлажненных грунтов)	Ф-I-2; Ф-II-2; Ф-III-2	10-30	100–200	5-10
Высокая (формируются верховодка и процессы подтопления)	Ф-II-I; Ф-III-I	10-20	>200	2-5
Подтопленная (существующее подтопление)	Ф-I-I; Ф-I-2; Ф-II-I; Ф-II-2; Ф-III-I; Ф-III-2	<10	>200	0-2

Сказанное позволяет расположить основные факторы, контролирующие подтопление, в определенной соподчиненности (рис. 3).

Подтопление не связано непосредственно ни с интенсивностью питания, ни со степенью дренированности территории, хотя каждый из этих факторов оказывает определенное влияние на геологическую среду, но характер этого влияния проявляется через такие параметры, как глубина залегания подземных вод, удельное водопотребление на территории, характер строительной инфраструктуры. Например, строительство с использованием свайных оснований затрудняет отток подземных вод, т. е. искусственно изменяет степень дренированности территории, и в то же время сказывается на фильтрационных параметрах водоносного горизонта.

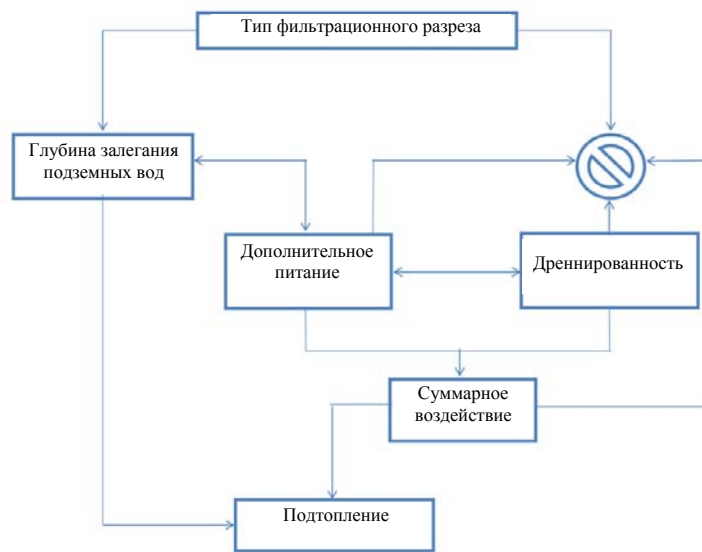


Рис. 3. Соподчиненность факторов, определяющих подтопление

Понятно, что степень воздействия основных факторов неравномерна и может резко отличаться на тех или иных участках территории, поэтому основные факторы целесообразно не только ранжировать по величине характеризующих их параметров, но и привести к системе однотипных единиц, в данном случае – к балльной системе. Значение всех факторов можно разбить на пять градаций (по количеству степеней интенсивности развития процессов подтопления, обозначенных ранее), совокупное влияние всех основных факторов будет в этом случае выражено суммой балльных оценок отдельных факторов. Доля воздействия этих факторов учитывается в этом случае шириной интервалов градации конкретных факторов. Такой подход позволяет ввести в структуру информационно-поисковой модели слой, содержащий результирующие интегральные сведения, интересующие потребителя.

Информационно-поисковая система базируется на анализе факторов, взаимосвязь которых описана ранее, и позволяет определить степень потенциальной подтопляемости. Система является многофакторной. При её работе

в определенном порядке происходит анализ разнородных электронных картографических материалов, отражающих дренированность территории, выраженную в условных единицах, глубину залегания подземных вод, типы фильтрационных разрезов, удельное водопотребление, по анализу которого можно определить интенсивность дополнительного питания и пр.

Каждый из факторов разбит на градации в порядке от наименее до наиболее благоприятствующих развитию процессов подтопления. Такой подход по формальному признаку позволяет использовать балльную систему оценки комплексного воздействия факторов. Однако чисто формальный подход в данной ситуации неприемлем, т. к. факторы, во-первых, имеют различный удельный вес, а, во-вторых, отсутствие или малое значение вклада некоторых из них (например, отсутствие дополнительного инфильтрационного питания при неизменном уровне дренированности) может полностью исключить возможность подтопления. В связи с этим система учета факторов дополнена логическими связями, учитывающими соподчиненность и возможный вклад отдельных из них. Например, однослойные разрезы Ф-I-I и Ф-I-II, представленные песками или глинами, мы объединили в одну категорию и при обработке участкам, попадающим в сферу влияния однослойных разрезов, автоматически присваивается низкая опасность развития процессов подтопления, а если известно, что глубина залегания уровней подземных вод менее 2 м (в нашей информационно-поисковой системе это категория 1), то этот участок находится в зоне уже существующего подтопления. Имеются и другие допущения. В целом итоговая характеристика степени подтопляемости была представлена в виде логических функций, описывающих соподчиненность факторов и вес каждого из них, а реализованные логические связи, характеризующие степень потенциальной подтопляемости (низкая, умеренная, высокая, существующее подтопление), имеют вид:

(ЕСЛИ(И(СУММ(A2:D2) < 12; СУММ(A2:D2) > 10) – низкая;

(ЕСЛИ(И(СУММ(A2:D2) > 7; СУММ(A2:D2) <= 10) – умеренная;

(ЕСЛИ(И(СУММ(A2:D2) <= 7; СУММ(A2:D2) > 4) – высокая;

(ЕСЛИ(И(СУММ(A2:D2) <= 4; СУММ(A2:D2) > 0) – существующее

подтопление,

где А – глубина залегания подземных вод; В – дренированность территории; С – тип фильтрационного разреза; D – удельное водопотребление.

Кроме того, с учетом логического допущения степень потенциальной подтопляемости принята низкой при В2, С2 и D2, равных четырем, а существующее подтопление возникает при А2=1.

Данные, уже имеющиеся в наличии, могут дополняться, соответствуя временным изменениям динамических параметров многофакторной системы (уровни, удельное водопотребление и пр.). Возможно формирование разнообразных поисковых условий, например, обычному пользователю интересно общее заключение о возможной опасности развития подтопления, тогда как специалиста-гидрогеолога может заинтересовать более подробная информация об исследуемом участке. Пользователю будет удобно находить любую интересующую его информацию, формируя поисковые условия и перемещая курсор по карте.



Таким образом, созданная геоинформационная система, базирующаяся на основе электронного представления карт гидрогеологического содержания (районирования застроенной территории по типу фильтрационного геологического разреза, интенсивности дополнительного инфильтрационного питания, дренированности, уровня подземных вод), позволяет оперативно производить оценку степени потенциальной подтопляемости участков городской застройки. Эффективность использования предлагаемой системы обеспечивается расширением доступности гидрогеологических узкоспециальных материалов для практического использования широким кругом заинтересованных лиц за счет применения алгоритма предварительной обработки большого объема специальной информации и представления её в удобном для принятия управленческого решения виде.

Результаты исследований могут быть использованы при инженерно-геологических изысканиях и востребованы различными ведомствами и службами, обеспечивающими жизнедеятельность города, а именно:

- для контроля и оперативного управления состоянием геологической среды;
- оценки вероятности возникновения, масштабов и интенсивности нежелательных последствий антропогенного воздействия;
- обоснования управленческих и инженерных решений, принимаемых на различных уровнях, от разработки генерального плана до природоохранных мероприятий на конкретных участках городской территории;
- оценки стоимости земель городской территории;
- оптимизации планирования выделения финансовых средств для проведения реставрационных работ в исторически значимой части г. Томска;
- совершенствования туристического бизнеса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покровский, Д.С. Гидрогеологические условия и процессы подтопления территории г. Томска / Д.С. Покровский, К.И. Кузеванов // Подземные воды юга Западной Сибири. – Новосибирск : Наука, 1987. – С. 146–53.
2. Pokrovsky, D.S. The impact of urbanisation on the hydrogeological conditions of Tomsk, Russia / D.S. Pokrovsky, G.M. Rogov, K.I. Kuzevanov // Groundwater in the Urban Environment. Proceedings of XXVIIth Congress IAH. – Nottingham, UK, 1998. – V. 2. – P. 217–223.
3. Покровский, Д.С. Применение геоинформационных технологий для оценки гидрогео-экологических условий застраиваемых территорий / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 3 (591). – С. 107–112.
4. Геоинформационная система по исторической территории Томска / А.С. Авсейков, Е.А. Нейфельд, А.И. Рюмкин, Е.С. Тябаев // Геоинформатика. Теория и практика. Вып. 1. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1998. – С. 273–283.
5. Pokrovskiy, V.D. Anthropogenic underflooding as a rational restoration planning factor of Tomsk architecture monuments / V.D. Pokrovskiy // Труды XII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – С. 919–920.
6. The Research Underflooding Processes of Architecture Monuments On The Territory of Tomsk With Using GIS- technology / V. Pokrovskiy, D. Pokrovskiy, E. Dutova, A. Nikitenkov // Science and technologies in geology, exploration and mining. 14th international multi-

disciplinary scientific geoconference SGEM2014. – Albena, Bulgaria, 2014. – V. 2. – P. 935–941.

7. *Degree of Areal Drainage Assessment Using Digital Elevation Models* / V. Pokrovsky, D. Pokrovsky, E. Dutova, A. Nikitenkov, A. Nazarov // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 21 012018 doi:10.1088/1755-1315/21/1/012018. – V. 21. – 2014.

#### REFERENCES

1. *Pokrovsky, D.S. & K.I. Kuzevanov*, 1987. Hidrogeologicheskie uslovija i processy podtoplenija territorii g. Tomska [Hydrogeological conditions and underflooding processes in Tomsk]. In *Podzemnye vody yuga Zapadnoi Sibiri*, Novosibirsk : Nauka Publ., Pp. 146–153. (rus)
2. *Pokrovsky D.S., Rogov G.M., Kuzevanov K.I.* The impact of urbanisation on the hydrogeological conditions of Tomsk, Russia. Groundwater in the Urban Environment. *Proc. 27<sup>th</sup> Cong. IAH*. Nottingham, UK, 1998. V. 2. Pp. 217–223.
3. *Pokrovskiy D.S., Dutova E.M., Kuzevanov K.I.* Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologii dlya otsenki gidrogeoeologicheskikh uslovii zastraivaemykh territorii [Application of geoinformation technologies for estimation of hydrogeoeology conditions of developed territories]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2008. No. 3. Pp. 107–112. (rus)
4. *Avseikov A.S., Neifeld E.A., Ryumkin A.I., Tyabaev E.S.* Geoinformacionnaja sistema po istoricheskoj territorii Tomska [Geoinformation system in historical part of Tomsk]. *Geoinformatika. Teoriya i praktika*. TSU Publ., 1998. No. 1 Pp. 273–283. (rus)
5. *Pokrovskiy V.D.* Antropogenic underflooding as a rational restoration planning factor of `Tom architecture monuments. *Proc. Int. Sci. Symp. 'Problems of Geology and Subsurface Development'*, Tomsk : TPU Publ., 2008. Pp. 919–920.
6. *Pokrovskiy V., Pokrovskiy D., Dutova E., Nikitenkov A.* The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using GIS- technology. *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Sci. Conf. 'Science and technologies in geology, exploration and mining'*. 2014. V. 2. P. 935–941.
7. *Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E., Nikitenkov A., Nazarov A.* Degree of areal drainage assessment using digital elevation models. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* V. 21. 2014.