

Научная статья

УДК 912.648(004.94):528.942

doi: 10.17223/25421379/27/9

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НАВОДНЕНИЙ РАВНИННЫХ РЕК НА КАРТЕ: ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЙМЕННОГО РЕЛЬЕФА КАК ОСНОВА КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ОБЬ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)



Анна Александровна Чекина¹, Вадим Валерьевич Хромых²

^{1,2} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ chekina.ann@gmail.com

² khromykh_vadim@mail.ru

Аннотация. Освещается вопрос идентификации зон затоплений на основе применения методов геоинформационного картографирования. Рассматривается построение цифровой модели рельефа на базе использования картографических данных и высокоточной съемки с беспилотного летательного аппарата. Приводятся результаты картографирования зон затопления для трёх населенных пунктов Шегарского района Томской области.

Ключевые слова: ГИС, дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, цифровая модель рельефа, пойма, наводнение

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90085.

Для цитирования: Чекина А.А., Хромых В.В. Визуализация наводнений равнинных рек на карте: цифровое моделирование пойменного рельефа как основа картографирования зон затоплений (на примере реки Обь в южной части Томской области) // Геосферные исследования. 2023. № 2. С. 123–141. doi: 10.17223/25421379/27/9

Original article

doi: 10.17223/25421379/27/9

VISUALIZATION OF FLOODS IN LOWLAND RIVERS ON A MAP: DIGITAL MODELLING OF FLOODPLAIN RELIEF AS A BASIS FOR MAPPING FLOOD ZONES (ON THE EXAMPLE OF THE OB RIVER IN THE SOUTHERN PART OF TOMSK REGION)

Anna A. Chekina¹, Vadim V. Khromykh²

^{1,2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ chekina.ann@gmail.com

² khromykh_vadim@mail.ru

Abstract. Nowadays, comprehensive research on water areas of large rivers is an urgent problem. Along with the use of natural resources for economic purposes, there is an increasing requirement for a quantitative assessment of their impact on people's activity and the ability to predict situations caused by floods. The intensity and duration of river floods depend on natural and anthropogenic factors. So, a variability of climatic indicators, a volume of runoff and ice phenomena are considered in the study. The aspects above are vulnerable to certain dynamics in modern conditions.

The purpose of the study is to identify flooding zones of the Ob River middle course (Tomsk region) using methods based on digital mapping and hydrological calculations of the recurrence.

The study area is located in the southeastern part of the West Siberian Plain, in the valley of the Ob River middle course, within the Shegarsky district of the Tomsk region. The floodplain reaches about 6 km in width here and is distinguished by a varied relief. During the spring snowmelt, long floods occur here, reaching dangerous levels of water rise.

The authors demonstrate the mapping of flood zones via remote sensing data (RSD) and hydrological calculations of flood recurrence. Thus, based on highly detailed surveys from an unmanned aerial vehicle (UAV) with a resolution of 0.04–0.05 m, digital terrain models (DTM) were obtained, and then were transformed into hydrologically conditioned digital elevation models (DEM). Flood zones were mapped in ArcGIS Spatial Analyst and 3D Analyst (ESRI Inc.), where vector isolines were created for each water level with a given recurrence (1, 3, 5, 10, 25 и 50 %).

According to the calculated recurrence, the inundation probability of the floodplain's central part is 50 % (74 m on the left bank and 75.5 m on the right). Therefore, every 2 years, closed depressions and hollows are submerged underwater. Inundation

of the near-terrace floodplain is possible when the water level rises to 77.5 m already in an average year in terms of water content.

Obtained results proved, that using large-scale digital elevation models is significantly improved the quality of mapping the predicted flood zones. During the process, the feasibility of using highly detailed data from UAVs to solve problems of flood identifying was confirmed. Currently, digital mapping materials are published on the Geoportal of the Tomsk region. For emergency notification of the population living on the risky territory, a special geodatabase is being created. It contains information about people, particularly vulnerable groups (children, elderly, disabled).

Keywords: *GIS, remote sensing, GIS mapping, digital elevation model, floodplain, flood*

Source of financing: The reported study was funded by RFBR, project number 20-35-90085.

For citation: Chekina A.A., Khromykh V.V. (2023) Visualization of floods in lowland rivers on a map: digital modelling of floodplain relief as a basis for mapping flood zones (on the example of the Ob River in the southern part of Tomsk region). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 123–141. doi: 10.17223/25421379/27/9

Введение

Всестороннее исследование акваторий крупных рек в настоящее время является актуальной проблемой, поскольку значение природных ресурсов в жизни человеческого общества стремительно растёт. Наравне с использованием ресурсов в экономических целях, увеличивается потребность в количественной оценке их влияния на жизнедеятельность людей и возможности прогнозирования ситуаций, обусловленных наводнениями.

Феномен наводнений застиг человечество врасплох еще в давние времена. В качестве ареала обитания люди старались выбирать, главным образом, пойменные территории речных бассейнов, которые имеют свойство периодически затопливаться. Изучение поймы в настоящей работе рассматривается прежде всего с позиции возможности обеспечить безопасную жизнедеятельность населения, поскольку часть населённых пунктов района исследований располагается непосредственно на территории пойменных массивов и подвергается затоплению в период половодья.

В разных уголках планеты наводнения характеризуются определенными генетическими типами и группируются в пределах ареалов со сравнительно устойчивыми границами [Добровольский, Истомина, 2006]; они различаются по времени возникновения и степени интенсивности. Несмотря на качественные отличительные черты этого явления, есть у него одна общая количественная особенность – причиняемый ущерб человеческому обществу и его материальным ценностям.

Существует различие между потенциальной опасностью наводнений по гидрологическим причинам и риском наводнений для освоенной человеком территории. Потенциальная опасность наводнений по гидрологическим причинам, т.е. без учета социально-экономического фактора, определяется степенью неожиданности и высотой затопления местности. Чем реже случается наводнение, тем больше его

опасность [Бужин, 2008]. Интересные выводы о рисках наводнений приведены в [Добровольский, Истомина, 2006]. Авторы утверждают, что основной ущерб от наводнений принадлежит не имущественной сфере, а гуманитарной: за период с 1998 по 2002 г. в наводнениях потерял только каждый 250-й доллар ВВП мира, но при этом лично пострадал при эвакуации примерно каждый 50-й житель Земли. Помимо этого, по мнению авторов, более объективным показателем ущерба от наводнений служит количество эвакуированных людей.

Согласно генетической классификации наводнений [Добровольский, Истомина, 2006], все наводнения разделяются на две большие группы – наводнения на реках и озерах и наводнения на побережьях морей и океанов. Последние, в свою очередь подразделяются на природные, природно-антропогенные и антропогенные. В этой статье на примере среднего течения реки Обь (в пределах Томской области) будет рассмотрен один из наиболее распространённых генетических типов, обусловленных природным происхождением, – половодья в период снеготаяния.

Постановка проблемы

Интенсивность и длительность речных наводнений зависят от ряда природных и антропогенных факторов. В рамках территории Обского бассейна более подробно рассмотрены такие аспекты, как изменчивость климатических показателей, объём стока и ледовые явления, которые в современных условиях подвержены определенной динамике.

На территории России к одним из наиболее чувствительных районов к изменениям климата в части опасных наводнений на реках относится западносибирская область умеренного пояса, где сохраняется опасность заторных наводнений в половодье и наводнений при дождевых паводках, и высокогорная климатическая область умеренного пояса на юге Сибири с характерным увеличением частоты опасных наводнений при весеннем и весенне-летнем половодье,

летних дождевых паводках [Семенов и др., 2015]. Обе эти территории охватывают бассейн реки Оби.

В пределах Западной Сибири процесс глобальных климатических изменений прежде всего отражается в увеличении среднегодовых температур воздуха и динамике количества жидких и твердых осадков. Согласно исследованиям [Колмакова и др., 2012; Паромов и др., 2017], в последние десятилетия среднегодовые температуры воздуха в Западной Сибири повсеместно увеличились. Так, в пределах водосбора р. Обь наблюдается увеличение среднегодовой температуры воздуха на $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ за период с 1970 по 2015 г. (рис. 1) [Булавина, 2020] и отмечается переход среднезимних температур на $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше климатической нормы в части равнины, расположенной южнее 62° с.ш., за период 1986–2015 гг. При этом следует отметить, что для южной части Западно-Сибирской равнины характерен положительный тренд среднегодовых сумм осадков $9,5\text{ мм}/10\text{ лет}$, а на всей ее территории в целом происходит повсеместное увеличение осадков зимнего периода на 23% (за 1986–2015 гг.) по отношению к норме 1966–1985 гг. [Паромов и др., 2017]. В условиях повышения количества осадков в зимний период гидрологический режим территории претерпевает изменения.

На территории Обского бассейна межгодовая изменчивость объемов годового стока невелика,

наблюдается нечеткая цикличность и чередование периодов разной временной продолжительности и водности, а также незначительный рост годового стока воды. При этом если с 1962 по 2000 г. на юге Западно-Сибирской равнины прослеживалась тенденция снижения среднегодовых расходов воды на Оби, то начиная с конца 1990-х гг. наблюдается рост среднемесячных расходов воды. Из-за отсутствия измерений расходов воды в исследуемом районе (гидропост в пос. Победа) приведены данные с гидропоста в с. Дубровино. Пункт наблюдений в с. Дубровино расположен в близких гидролого-геоморфологических условиях и является ближайшим к району исследований, где проводились измерения гидрологических показателей (рис. 2, а, б).

Стабилизацию среднемесячных расходов воды после 1990 г. и даже некоторый рост в 2000-е гг. отмечают и другие исследователи [Магрицкий и др., 2019; Zemtsov et al., 2019].

Высота речных наводнений, вызываемых половодьями на равнинных реках, зависит от степени естественной зарегулированности их стока [Гинко, 1977]. Снижение уровня воды и максимального расхода паводковых вод оказало влияние на глубину и продолжительность затопления поймы в сторону уменьшения [Zemtsov et al., 2019].

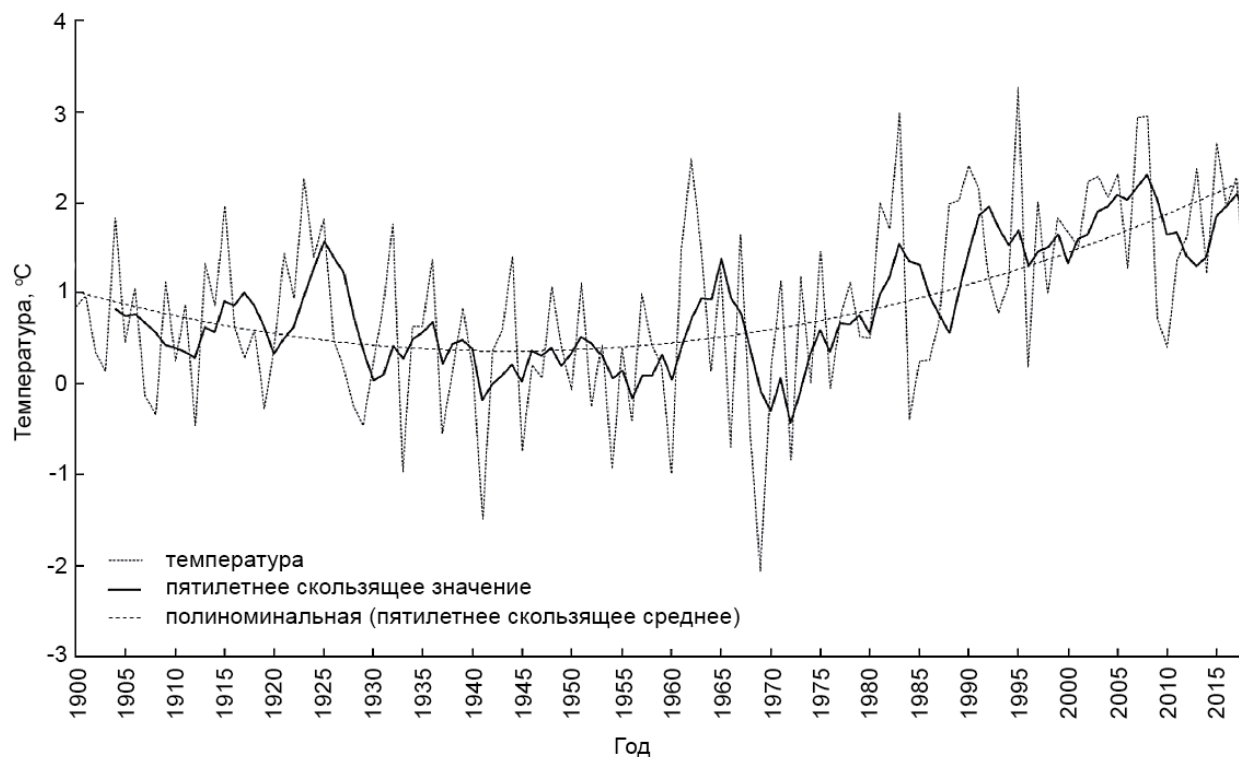
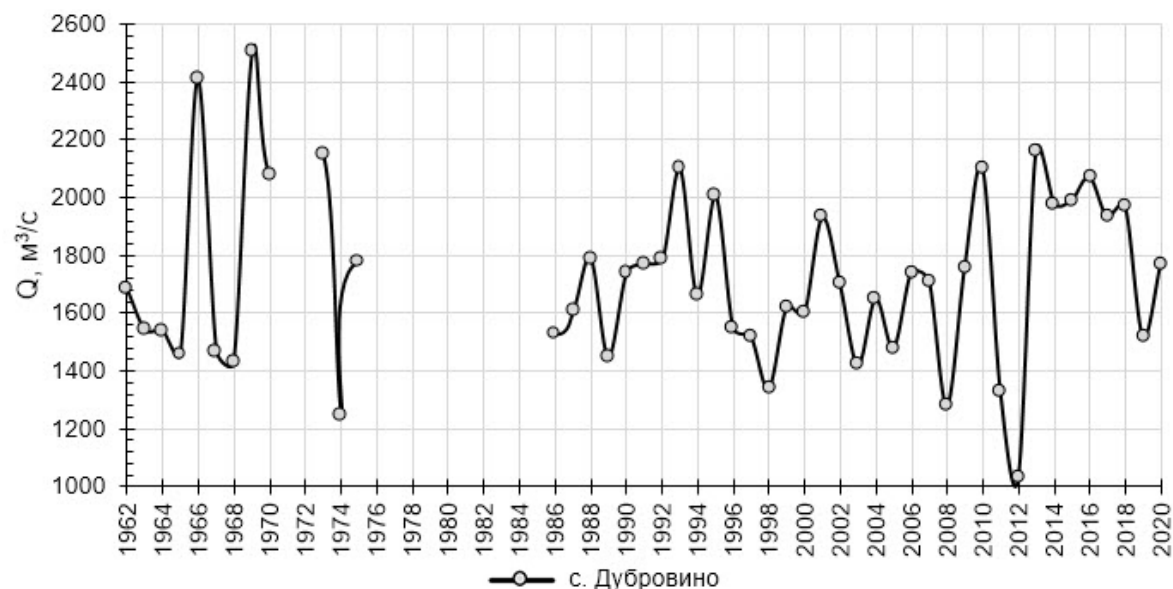
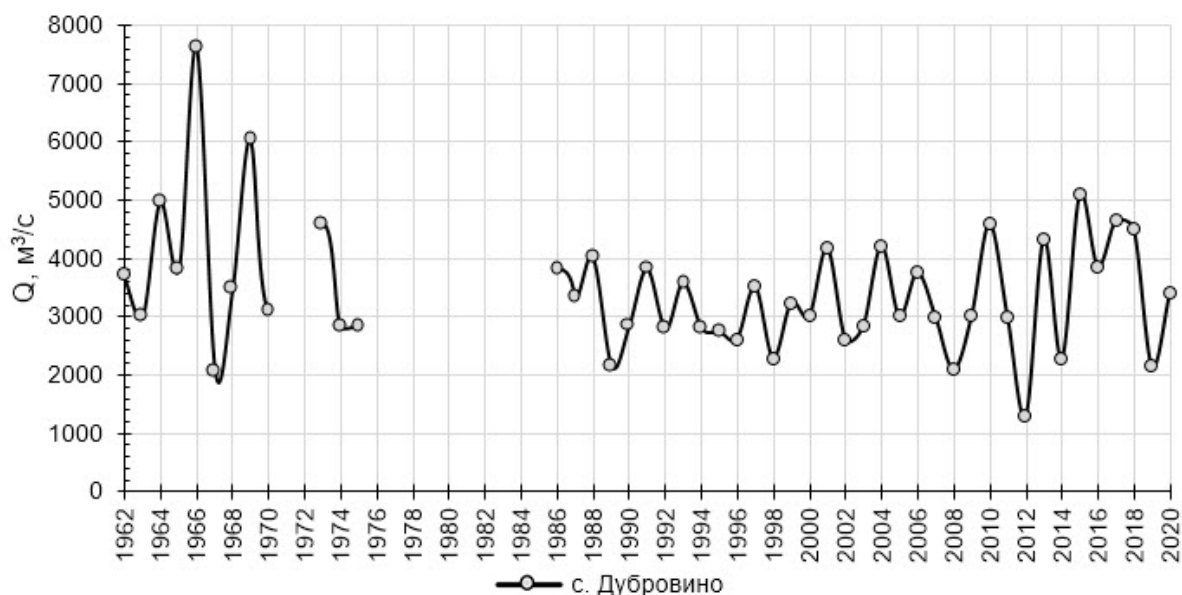


Рис. 1. Средняя годовая температура на водосборе р. Обь и ее пятилетнее скользящее среднее [Булавина, 2020]

Fig. 1. Annual average temperature at the Ob River catchment area and its 5-year moving average [Bulavina, 2020]



а



б

Рис. 2. Динамика расходов воды Q на Оби (гидропост с. Дубровино):

а – среднегодовых за период 1962–2020 гг., б – среднемесячных в мае за период 1962–2020 гг.

Fig. 2. Dynamics of water discharge Q on the Ob (gauging station Dubrovino):

а – average annual for the period 1962–2020, б – average monthly in May for the period 1962–2020

Связь между объемом стока и высотой половодья прямая, но на локальных участках (в местах впадения крупных притоков, обладающих иной ритмикой водного режима, чем р. Обь, или в связи с заторами льда) может происходить затопление высоких поверхностей поймы даже в годы, которые по гидрологическим характеристикам оцениваются как средневодные и маловодные [Адам и др., 1996].

На реках Западно-Сибирского региона случаются значительные наводнения в период весеннего половодья, которые обусловлены большими расходами воды и образованием мощных ледяных заторов, формирующихся у поворотов русла и в узлах разветвлений [Чалов, Плескевич, 2001; Бузин, Копалиани, 2007]. На формирование заторов оказывают влияние гидрометеорологические (переменные) и мор-

фологические (постоянные) факторы. К первым относятся интенсивность весеннего половодья, распределение толщины льда, прочность льда, уровень и ледовый режим предшествующих осеннего паводка и зимней межени [Донченко, 1987]; ко вторым – наличие островов в русле реки, рукава, излучины, сужения и т.п., способствующие усилению процесса заторообразования.

Наибольшее влияние на частоту возникновения ледяных заторов в районе исследования оказывает прежде всего разделение речного потока (русловая многорукавность – доминирующий здесь тип русла), затем плановые русловые деформации и глубина речного потока [Кулешов, Козлов, 2017; Козлов, Кулешов, 2019]. На исследуемом участке Оби наблюдаются крупные заторы, повторяемость которых составляет от 60–80 %, и заторные подъемы уровня достигают 3–5 м [Бузин, 2004]. Наблюдается и существенная трансформация ледового режима рек юга Западно-

Сибирской равнины. Так, на протяжении последних десятилетий происходит увеличение повторяемости и масштаба заторных наводнений с общим сокращением продолжительности ледостава и увеличением продолжительности ледохода (рис. 3).

Сокращение продолжительности ледостава и периода с ледовыми явлениями прежде всего происходит за счет смещения сроков появления льда и весеннего вскрытия реки [Магрицкий и др., 2019]. Смещение дат окончания фазы замерзания на более поздние сроки обусловлено увеличением водности осенней межени на реках Западной Сибири [Земцов и др., 2000; Паромов, 2000; Паромов, Шантыкова, 2003]. Причиной сдвига сроков весеннего вскрытия реки на более ранние является изменение даты перехода среднесуточной температуры через 0 °С весной и осенью, а также сумм отрицательных температур воздуха [Беркович и др., 2015], что также влечет уменьшение толщины льда [Магрицкий и др., 2019].

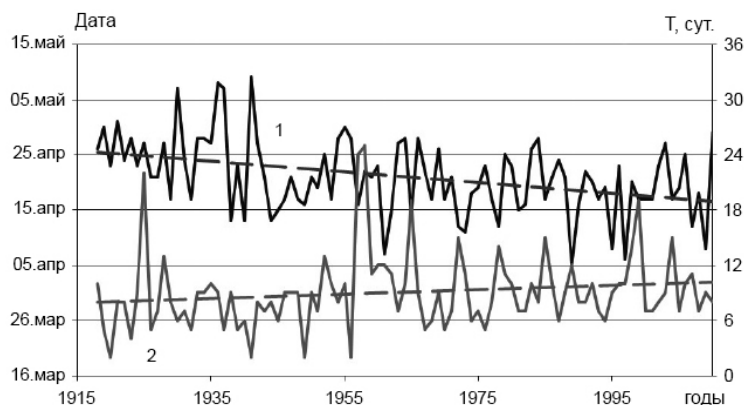


Рис. 3. Изменение дат вскрытия (1) и продолжительности ледохода (2) на р. Томи в районе г. Томска за период 1918–2010 гг. [Беркович и др., 2015]

Fig. 3. Changes in river opening dates (1) and duration of ice drift (2) on the Tom River in the Tomsk region for the period 1918–2010 [Berkovich et al., 2015]

Все перечисленные аспекты напрямую оказывают влияние на морфологический облик поймы. Например, воздействие ледяных заторов на рельеф проявляется в переформировании конфигурации русла и образовании специфических форм рельефа на пойме – длинных рытвин [Евсеева, 2009]. В период затопления поймы, во время взаимодействия пойменного и руслового потоков, в разные фазы гидрологического режима происходит образование поводного рельефа преимущественно аккумулятивного генезиса [Чалов, 2015].

В свою очередь, данные о рельефе земной поверхности (в нашем случае – пойменном рельефе) необходимы при анализе и прогнозировании послед-

ствий половодий и паводков, поскольку позволяют достаточно точно определить границы области затопления [Глотов, 2013]. Формы рельефа отражают результаты всех прошедших наводнений, которые ускорили процессы эрозионного расчленения, оказали влияние на перенос и отложение вещества и на протяжении длительных периодов времени формировали геоморфологический облик территории [Manfreda et al., 2018].

Район исследования

Территория исследования располагается в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины, в до-

лине р. Обь в среднем течении, в пределах Шегарского района Томской области (рис. 4). В геоморфологическом отношении участок расположен в пределах Обь-Тымской низменности, сложенной аллювиальными отложениями. Русло Оби в исследуемом районе характеризуется русловой многорукавностью с относительной устойчивостью, последняя определяет скорость размыва берегов 4–5 м/год [Чернов, 1983; Лыготин, 2003]. Отличительной особенностью данного участка является преобладание плеса сопряженных русловых разветвлений. Пойма реки на данном участке отличается большой шириной, непрерывностью и преимущественно двухсторонним распространением. Средняя ширина поймы – около 6 км. Геоморфологический тип поймы здесь – ложбинно-островной, в рельефе береговых участков которого сочетаются широкие (900–1 500 м) плосковершинные гряды и разделяющие их узкие (10–15 м) и относительно глубокие ложбины (2–4 м) [Чалов, Плескевич, 2001]. В соответствии с разнообразием форм рельефа и их расположением были выделены геоморфологические разновидности поймы: прирусловая, наложенная прирусловая, центральная гривистая, центральная выровненная, притеррасная. Функционирование пойменных ландшафтов типично для долин рек Западно-Сибирской равнины: характерно динамическое равновесие основных параметров структуры ландшафтов, и они испытывают лишь периодические колебания [Khromykh, Khromykh, 2016].

В гидрологическом отношении изучаемый участок р. Оби до впадения р. Томи является практически бесприточным. Среднегодовой расход воды здесь составляет 1 630 м³/с, максимальный – 9 670 м³/с (в условиях регулирования стока Новосибирским гидроузлом), а средний годовой сток данного отрезка реки составляет 60 км³ [Чалов, Плескевич, 2001]. В отношении стока взвешенных наносов на исследуемом участке наблюдается тенденция к его уменьшению (во все месяцы). В половодье (май, июнь) сокращению стока наносов способствует снижение среднемесячных расходов воды и, как следствие, снижение размывающей способности потока, что способствует уменьшению мутности. Снижение стока наносов в летне-осеннюю межень (июль–октябрь) обусловлено уменьшением мутности воды при относительно стабильных и несколько повышенных расходах воды [Мельникова, Вершинин, 2017]. Ежегодный слой осадка здесь составляет 0,53 мм [Попов, 1962]. Закономерного изменения среднего диаметра аллювия вниз по течению и в связи с изменением уклонов не отмечается [Чалов, Плескевич, 2001]. В процессе транспортировки наносов в половодье происходит их осаждение в русле и на поверхности поймы в виде генетически

различных фаций, в результате чего формируются пойменный рельеф и характерные аллювиальные почвы [Khromykh et al., 2018].

Основной фазой водного режима является весенне-летнее половодье, наблюдающееся с апреля по июль. В период половодья на р. Оби проходит до 70 % годового стока. В многоводные годы доля стока половодья возрастает до 80 %, в маловодные снижается до 50 % [Ресурсы..., 1972]. В современный период наблюдений (после 1959 г.) тенденции к понижению максимальных уровней воды в среднем течении р. Оби обуславливают некоторое сокращение площади, глубины и продолжительности затопления поймы [Zemtsov et al., 2019]. По воздействию половодья Шегарский отрезок поймы относится к участку, где его воздействие сказывается лишь на низких поверхностях [Адам, 1996].

Наводнения на Оби классифицируются как длительные, которые проходят на равнинных реках с незначительными уклонами пойменно-руслового комплекса и в условиях затяжных половодий [Гинко, 1977]. Так, средний продольный уклон долины Оби составляет 0,085 ‰ (согласно расчёту по средним уровням воды Оби у пос. Победа и с. Никольское) [Савичев и др., 2013], а продолжительность половодья может достигать 120–150 дней. Продолжительность подъема уровней воды на Оби достигает 30–35 дней, средняя интенсивность подъема – 30–35 см/сут [Болотнов, 2007].

Скорость течения реки Обь на участке Новосибирская ГЭС – устье реки Томь в период половодья составляет 1,4–1,6 м/с (5,0–5,6 км/ч), в межень – 0,75–0,8 м/с (2,7–3,0 км/ч) [Карта..., 1987], в то время как допустимые неразмывающие скорости для отложений, слагающих берега, варьируют от 0,17 до 0,75 м/с, следовательно, трансформация современного рельефа долины прежде всего происходит под воздействием речной эрозии, боковой и донной в частности [Чернов, 1983]. К еще одному экзогенному процессу, который развивается благодаря затоплениям территорий, относится заболачивание. В настоящее время происходит интенсивное заболачивание изучаемого региона, характеризующееся вертикальным приростом торфяной залежи около 1 мм/год и приростом болот в плане – до десятков тысяч га/год [Савичев, Паромов, 2014].

Помимо природных факторов, существенное воздействие на гидрологический режим Оби и ее геоморфологический облик оказывает антропогенная нагрузка. В пределах рассматриваемого участка степень антропогенной нагрузки определяется эксплуатацией Новосибирской ГЭС.

Наибольшее влияние на гидрологический режим оказывает сезонное регулирование стока, которое про-

является в заполнении водохранилища весной и в его сработке в межень. В зависимости от водности года объемы притока и сбросов в мае–июне могут изменять-

ся в широких пределах: приток – от $22,4 \text{ км}^3$ в многоводный и до $8,6 \text{ км}^3$ в маловодный год, сбросы, соответственно, от $18,6$ до $5,8 \text{ км}^3$ в год [Многолетняя..., 2014].



Рис. 4. Обзорная карта исследуемого района

Томская область, Шегарский район, д. Оськино, пос. Победа, д. Старая Шегарка

Fig. 4. Overview map of the study area

Tomsk region, Shegarsky district, Oskino village, Pobeda village, Staraya Shegarka village

Изменение ледового режима Оби после создания водохранилища прежде всего связано с тем, что поступающая из водохранилища вода в зимнее время имеет температуру выше 0°C , а зимние расходы воды в нижнем бьефе стали больше. Сдвинулись сроки появления ледовых явлений, несколько уменьшилась толщина льда, снизилась интенсивность осеннего и весеннего ледоходов [Атавин и др., 2014].

Воздействие водохранилища на режим половодья проявилось в снижении повторяемости расходов воды (более $3000 \text{ м}^3/\text{с}$) с 24 до 16 %; доля экстремальных расходов (более $6000 \text{ м}^3/\text{с}$) снизилась более чем в 2 раза. Коэффициент внутригодовой неравномерности стока уменьшился в среднем по водности году с 0,75 до 0,65, что в свою очередь, повлекло изменение величины и обеспеченности руслоформирующего расхода воды, которая в пределах исследуемого района равна 11,9 % до выхода на пойму [Чалов, Плескевич, 2001].

Длительное воздействие на русло расходов воды высокой межени и низких половодий (от 500 до

$3000 \text{ м}^3/\text{с}$) послужило причиной отмирания отдельных рукавов и снижения их водности; развития излучин, новых островов и осередков в основных рукавах; формирования молодой поймы на месте прирусловых отмелей, уменьшения контрастности руслового рельефа [Чалов, 2015]. При постоянном регулировании стока природные комплексы поймы претерпевают трансформации, приспосабливаясь к изменившимся гидрологическому и русловому режимам. На ставших незатопляемыми массивах деградируют старичные и болотные ландшафты; вместе с тем на низких поймах в старичных понижениях кустарниковая растительность сменяется болотной.

Материалы и методы

Объем ущерба, причиняемого наводнениями, зависит от многих факторов, один из которых – своевременное прогнозирование.

Научно-методической основой прогнозирования наводнений является анализ количественных связей

между факторами, которые определяют их возникновение (жидкие осадки, температура воздуха и т.д.), и гидравлическими параметрами половодного потока [Алабян и др., 2016]. Следовательно, для создания систем мониторинга и прогнозирования наводнений требуется существенное количество данных о той или иной территории. К одной из проблем прогнозирования наводнений в России относится недостаточное количество гидрологических постов, осуществляющих регулярный мониторинг гидрологической обстановки на реках и предоставляющих актуальную информацию об уровнях воды. Так, на реке Обь в Томской области на настоящий момент действует всего лишь шесть гидропостов, а число подверженных затоплению населенных пунктов более 40. Вопрос об изученности районов паводкового риска в ряде других стран мира пока, к сожалению, тоже остается открытым. Несмотря на наличие пробелов в необходимых для прогнозирования сведениях, осуществить прогноз рассматриваемого опасного явления возможно при помощи методов компьютерного моделирования с использованием геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Авторами [Калинин, Пьянков, 2010; Борщ и др., 2015; Фролов и др., 2016; Бураков и др., 2017; Новиковский, Пермяков, 2019] разработан ряд методик, направленных на выполнение задач геоинформационного картографирования, моделирования и прогнозирования затоплений. Данные методики разработаны преимущественно на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли (спутниковые снимки, ЦМР SRTM и др.), различных гидрологических и математических моделей, сведений о гидрометеорологических параметрах, информации о рельефе территорий, классификации данных и т.д.

В качестве примера эффективного использования ДДЗ для целей мониторинга, прогнозирования и оценки наводнений в России можно привести Геопортал Роскосмоса; автоматизированный комплекс «Мониторинг паводковой обстановки» на базе спутниковых ДДЗ, разработанный в НИЦ «Планета» [Асмус, 2017]; информационную систему «ГИС-Гидрология» и др.

Значительный объем информации о процессе затопления территории можно получить на основе геоморфологических характеристик речной долины. В настоящей работе характеристика геоморфологического строения поймы р. Оби с целью картографирования затоплений была дана на основе крупномасштабных цифровых моделей рельефа (ЦМР), а также материалов полевых исследований.

Для создания ЦМР долины Оби в пределах Шегарского района Томской области были использова-

ны 13 листов топографической карты масштаба 1 : 25 000. Привязка растров топографической карты осуществлялась на основе регулярной сетки координат в проекции Гаусса–Крюгера (эллипсоид Красовского) с помощью программного комплекса Easy Trace 8.65 (EasyTrace Group). Далее в Easy Trace были проведены операции бинаризации и чистки растров. Векторизация горизонталей проводилась в полуавтоматическом режиме, а высотных отметок и гидросети – в ручном. Полученные векторные примитивы (точки, линии, полигоны) были экспортированы в шейп-файлы и в дальнейшем преобразованы в классы пространственных объектов базы геоданных ArcGIS (ESRI Inc.). Это было сделано для соблюдения топологической корректности данных, так как формат шейп-файлов не поддерживает топологию. ЦМР создавалась с помощью модуля ArcGIS 3D Analyst (ESRI Inc.) методом триангуляции Делоне. При этом в качестве исходных данных использовались оцифрованные горизонталы (всего 941 линия) и высотные отметки, включая урезы воды (всего 989 точек). В качестве дополнительных данных использовались полигональные и линейные объекты гидросети (всего 220 линий и 103 полигона), а также контуры озёр с известным урезом воды (всего 61). Горизонталы использовались при расчёте ЦМР как линии неявного перегиба рельефа, объекты гидросети – как линии явного перегиба рельефа (рёбра треугольников), а полигоны озёр с известным урезом воды – как плоские поверхности замещения одной высотой, согласно методике, описанной ранее [Khromykh, Khromykh, 2016].

Для цифрового моделирования пойменного рельефа вблизи населённых пунктов использовались материалы съёмок ЗАО «Томскипрозем» с БПЛА самолётного типа «ГЕОСКАН 201», оборудованного бортовым приемником глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) Topcon B 110. Съёмки проводились с пространственным разрешением 0,04–0,05 м/пиксел. Плановым и высотным обоснованием для аэрофотосъёмки послужили пункты государственной геодезической сети (ГГС) и референц-станции ГНСС г. Томск. С применением ГНСС оборудования Trimble 5700 были созданы базовые станции для привязки аэрофотоснимков. Обработка и уравнивание ГНСС-измерений от пунктов ГГС и референц-станции г. Томска выполнялись в программном обеспечении (ПО) Topcon Tools, результаты уравнивания не превысили по среднеквадратичному отклонению 0,1 м. В процессе аэрофотосъёмки определение позиций снимков происходило по бортовому ГНСС-приемнику БПЛА Topcon B 110. После завершения процесса аэрофотосъёмки данные с приемника скачивались и поступали в обработку.

Обработка материалов аэрофотосъемки выполнялась в ПО Agisoft Photoscan (Geoscan) по следующим этапам:

- совмещение снимков по меньшему числу точек (накидной монтаж);
- выравнивание положения камер;
- построение плотного облака точек;
- классификация плотного облака точек;
- построение карты высот по классу «земля»;
- построение ортофотоплана по полученной карте высот;
- экспорт ортофотоплана в формате GeoTIFF;
- экспорт карты высот (ЦММ) в формате GeoTIFF.

В результате фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с помощью Agisoft PhotoScan были созданы цифровые модели местности (ЦММ) с разрешением 0,15–0,5 м. Для получения гидрологически корректной матрицы высот из ЦММ была проведена маскировка домов и лесных массивов на ортофотопланах с использованием инструментов ArcGIS «Con», «Растровый домен», «Append». Ортофотопланы были также использованы для векторизации гидрографических объектов. Сотрудниками кафедры гидрологии ТГУ были разработаны алгоритмы расчета максимальных уровней воды разной процентной обеспеченности в населенных пунктах как с гидростатами, так и без них.

Определение зон затопления для каждого населенного пункта основывалось на гидрологических расчетах и ЦМР, полученных в результате съёмок с БПЛА. Такой подход позволяет очень точно определить границы затапливаемой области, а небольшой размер исследуемых территорий (несколько квадратных километров) и равнинный характер реки позволяют пренебречь падением уровня воды в продольном профиле русла. Для более протяженных участков речных долин необходимо получение цифровой модели относительных высот от уреза воды, что, например, возможно при работе с модулем Vertical Distance to Channel Network в открытом ПО SAGA [Готов, 2013].

Результаты

Построенная ЦМР всей поймы Оби в пределах Шегарского района Томской области являет собой нерегулярную триангуляционную сеть (модель TIN) из более чем 187 тыс. треугольников. На основе ЦМР в ArcGIS была построена серия тематических карт важнейших морфометрических показателей: гипсометрическая карта (рис. 5), карты крутизны склонов и экспозиций. В ArcScene ArcGIS (ESRI Inc.) была построена трёхмерная модель долины с наложенными домами населённых пунктов (рис. 6).

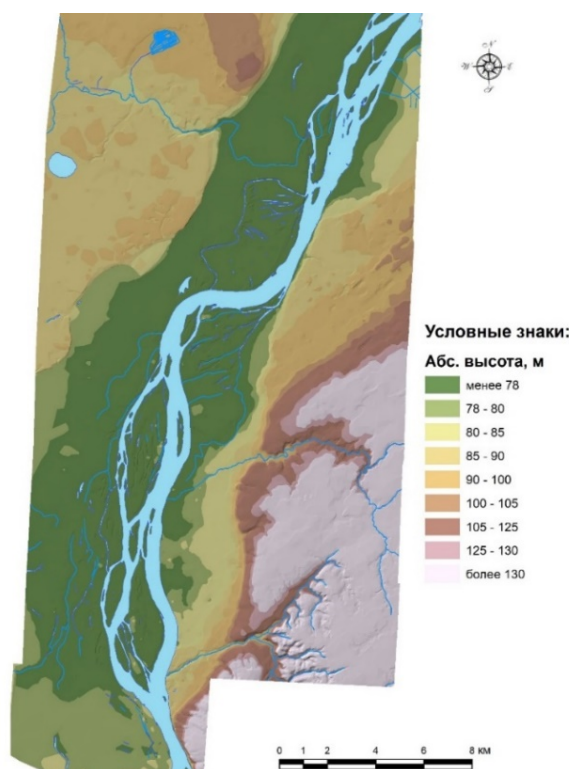


Рис. 5. Гипсометрическая карта (фрагмент) долины р. Оби в южной части Томской области

Fig. 5. Hypsometric map (fragment) of the Ob River valley in the southern part of the Tomsk region



Рис. 6. Трёхмерная модель (фрагмент) долины р. Оби в южной части Томской области

Fig. 6. 3D-model (fragment) of the Ob River valley in the southern part of the Tomsk region

С учётом полученной детальной информации об абсолютных высотах, материалов полевых исследований и геоморфологического районирования поймы [Хромых, 1975] была составлена карта пойменных разновидностей р. Оби в Шегарском районе Томской области (рис. 7). Проведенный крупномасштабный гидролого-геоморфологический анализ поймы лёг в основу картографирования зон затопления территории при максимальных уровнях воды разной обеспеченности. При этом для картографирования зон затопления в пределах населённых пунктов использовались высокдетальные ЦММ и ЦМР, полученные в результате фотограмметрической обработки материалов съёмки с БПЛА (см. рис. 8).

Построение границ зон затопления производилось с помощью функциональных возможностей модулей ArcGIS Spatial Analyst и 3D Analyst (ESRI Inc.). Для каждого участка были выделены шесть зон затопления, обозначенные в виде линейных объектов в соответствии с расчетным уровнем половодья, при помощи команды ArcToolBox «Поверхность → Изолинии по значениям». Далее происходила трансформация линейных объектов в полигональные при помощи команды ArcToolBox «Управление данными → Пространственные объекты → Линию в полигон». Использовались также инструменты генерализации ArcGIS.

Для картографирования зон затоплений были выбраны характерные уровни воды 1-, 3-, 5-, 10-, 25- и 50 %-й обеспеченности, что соответствует затоплению территории один раз в 100 лет, в 33 года, в 20 лет, в 10 лет, в 4 года, в 2 года соответственно. Для населенных пунктов исследуемого района использовались максимальные уровни воды разной обеспеченности, рассчитанные сотрудниками ка-

федры гидрологии ТГУ с помощью ПО «HYDROCALK» «ГИДРОРАСЧЕТЫ» (Государственный гидрологический институт).

Согласно графику (см. рис. 9), выход воды на участки притеррасной поймы возможен при подъеме уровня до/свыше 590 см и при расходе воды 4 520 м³/с (средний по водности год). Полное затопление поймы вероятно при подъеме уровня воды до/свыше 800 см относительно «0» поста. Чередование пиков и спадов кривых на графике обусловлено 2–3 слабовыраженными волнами половодья. При этом согласно расчетным показателям обеспеченности затопления, вероятность уровня затопления центральной поймы (74 м – на левобережье и 75,5 м – на правобережье) составляет 50 %, следовательно, каждые 2 года происходит погружение под воду замкнутых депрессий и ложбин с застоем воды. Вследствие этого образование пойменных озер, формирование новых и оживление старых протоков приводят к наложению прируслового режима на центрально-пойменные и притеррасные участки, а также к дальнейшему заболачиванию местности.

Связь особенностей пойменного рельефа и характера затоплений проявляется в поёмности территории, т.е. в затоплении ее водой в половодье. Для пойм крупных рек характерно наличие нескольких поверхностей разного уровня, которые по отношению к урезу реки называются «высотными уровнями поёмности». В пойме р. Оби, в границах исследуемого района выделены четыре высотных уровня поёмности [Огородников и др., 1997]. *Исключительно долгопоёмный высотный уровень* охватывает наиболее низкие участки поймы, и продолжительность их затопления достигает от 65 до 75 дней. *К долгопоёмному высотному уровню* принадлежат в основном низкие

приусловые валы и гривы, а также присклоновые низины, продолжительность затопления которых варьирует от 40 до 65 дней. Среднепоёмный высотный уровень занимает средневысотные приусловые валы и гривы центральной поймы, и продолжительность затопления данной поверхности составляет в среднем

20–35 дней. К краткопоёмному высотному уровню относятся высокие гривы центральной поймы. В соответствии с этими уровнями на территории изучаемого участка более детально выделены элементы рельефа по длительности и высоте затопления [Огородников и др., 1997] (таблица).

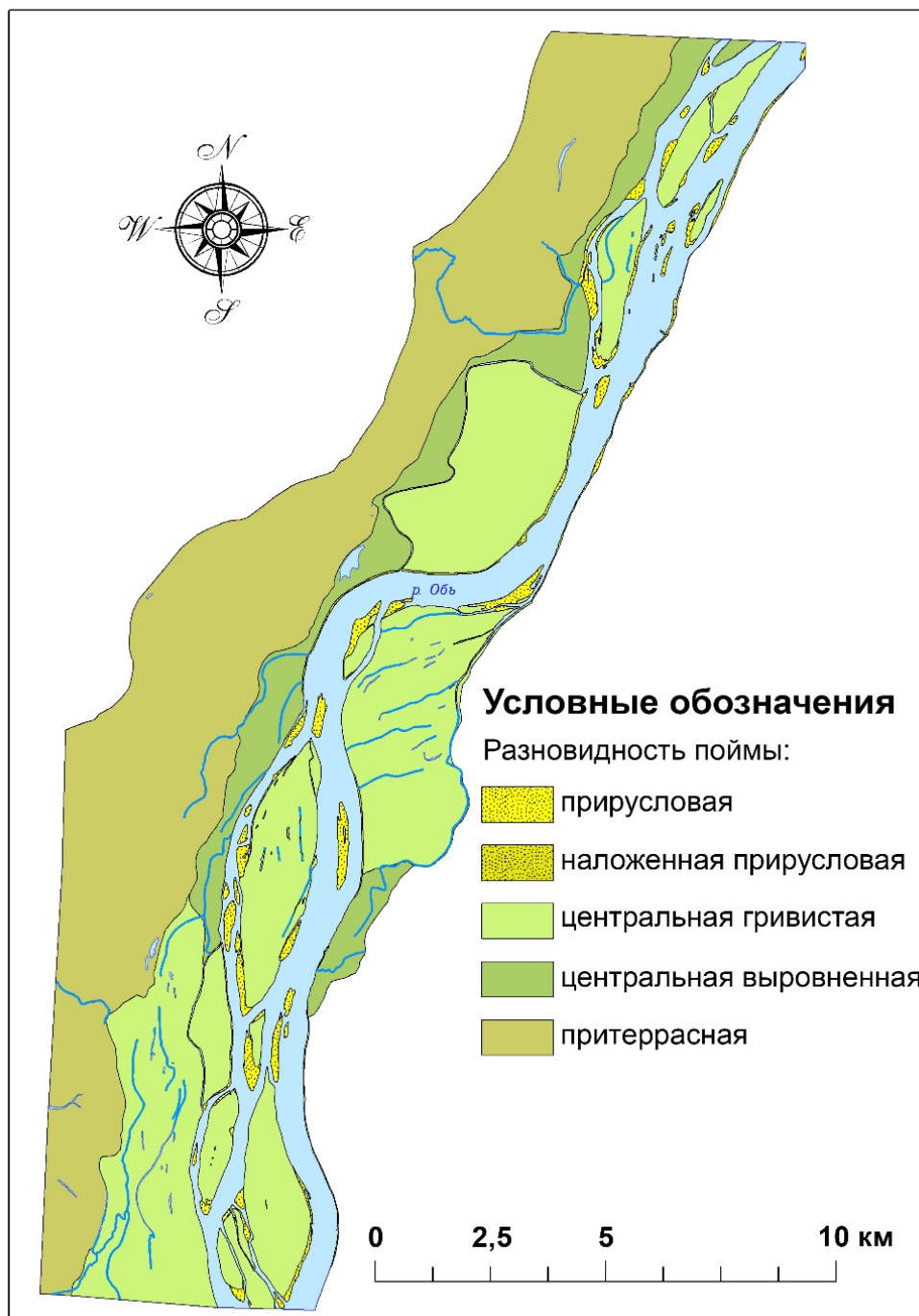


Рис. 7. Карта разновидностей пойм р. Оби в южной части Томской области

Fig. 7. Floodplains types of the Ob River in the southern part of the Tomsk region

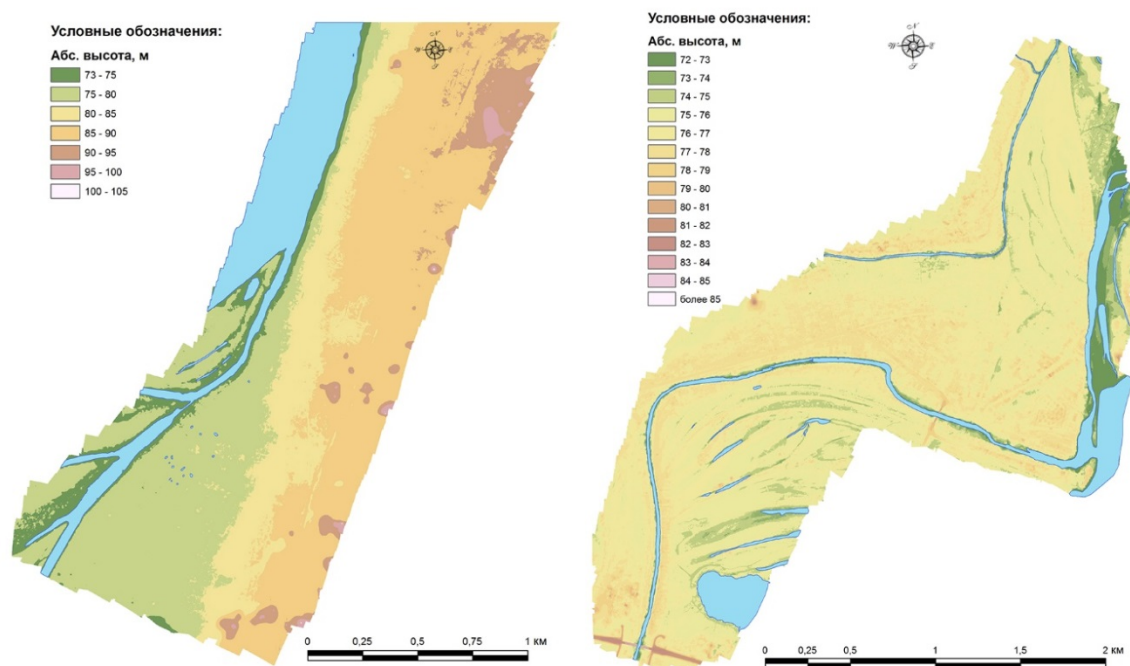


Рис. 8. Цифровые модели местности прибрежных территорий реки Обь, построенные на основе съемки с БПЛА

Fig. 8. Digital surface models of the riverine areas of the Ob River based on UAV surveys

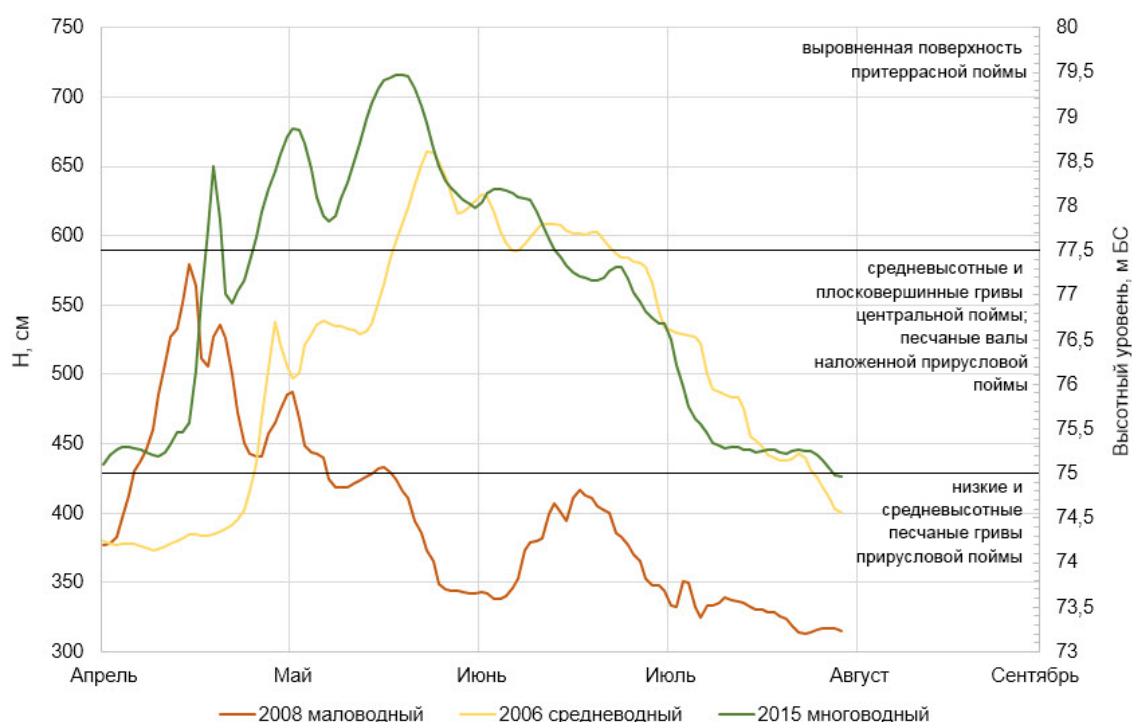


Рис. 9. Уровни воды в р. Оби по гидропосту пос. Победа (Шегарский район) и их соотношение с высотными уровнями поймы

Fig. 9. Water levels in the Ob River according to the Pobeda gauging station (Shegarsky district) and its correlation with the elevation levels of the floodplain

Элементы рельефа поймы, длительность и высота их затопления

Floodplain geomorphic units, their flooding level and duration

Морфологический элемент	Процесс рельефообразования	Абсолютные высоты, м	Высота затопления, м	Длительность затопления, дней
Приустьевая пойма				
Песчаные отмели с пионерной растительностью	Аккумулятивный	72,5–75	5	65–75
Низкие песчаные гряды			–	40–65
Средневысотные песчаные гряды			1–2	20–25
Наложённая приустьевая пойма				
Песчаные валы	Аккумулятивный, эрозийный	75–77	–	40–65
Центральная грядистая пойма				
Средневысотные гряды	Аккумулятивный, эрозийный	75–77,5	1–2	20–35
Межгрядные понижения и приозёрные низины			3–5	40–65
Плосковершинные гряды			1–2	20–25
Центральная выровненная пойма				
Выровненная поверхность	Аккумулятивный	75–77,5	–	–
Притеррасная пойма				
Выровненная заболоченная поверхность с кочками и мелкими ложбинами	Болотообразование, торфонакопление	74,5–80	–	–

Воздействие поёмности на поверхность поймы зависит от высоты и длительности половодья. Часто высокое, но кратковременное половодье может принести изменения более существенные, чем низкое и растянутое. Такая особенность касается в первую очередь русловых деформаций, которые в период половодья во многом зависят от соотношения скоростей и направления руслового и пойменного потока. На пике половодья поток производит наибольшую руслоформирующую работу [Хромых, 1975].

Для оценки опасности затопления жилых домов в населённых пунктах при максимальных уровнях воды разной обеспеченности использовались общедоступные цифровые карты с адресами домов (OSM, Яндекс Карты), которые были наложены на ортофотопланы с изолиниями зон затопления. Результаты такой оценки для населённых пунктов исследуемого района приведены ниже.

Деревня Оськино расположена на правом берегу р. Обь в 2 724 км от устья Оби на склоне первой надпойменной террасы. Деревня вытянута вдоль берега почти на полтора километра. Терраса полого опускается к реке. Вдоль берега протягивается неширокий песчаный пляж. Склон террасы довольно крутой вблизи берега, далее постепенно выполажи-

вается, на протяжении полукилометра амплитуда высот составляет 10 м. На юге склон более пологий. Урез воды 72,5 м на 18.09.2018. Максимальные рассчитанные уровни воды при 1-, 3-, 5-, 10-, 25-, 50 %-й обеспеченности составляют, соответственно, 78,09; 77,57; 77,33; 76,91; 76,27 и 75,56 м. Песчаный пляж затопляется почти ежегодно, на остальной территории деревни затопление отсутствует. Домов и постоянного населения в пределах территорий, затопляемых при максимальных уровнях воды 50-, 25-, 10-, 5-, 3-, 1 %-й обеспеченности, в деревне Оськино нет. При этом в зоны затопления при максимальных уровнях воды 25-, 10-, 5-, 3-, 1 %-й обеспеченности попадают садовые участки, расположенные к югу от д. Оськино вдоль улиц Береговая и Еловая (рис. 10).

Посёлок Победа расположен на правом берегу Оби в 2 722 км от устья Оби на первой надпойменной террасе. Посёлок довольно большой, протягивается вдоль Оби на 2 км севернее моста через Обь. Рельеф слабо волнистый, терраса полого опускается в сторону реки. Береговой уступ выражен отчётливо, высота его не более 5 м. На южной окраине посёлка протягивается неглубокая балка с пологими склонами. На востоке за посёлком на месте бывшего карьера располагается довольно большой пруд. Урез воды

72,3 м на 18.09.2018. Максимальные рассчитанные уровни воды при 1-, 3-, 5-, 10-, 25-, 50 %-й обеспеченности составляют, соответственно, 77,92; 77,4; 77,16; 76,74; 76,1 и 75,39 м. Вдоль берега простирается узкая полоса ежегодно затопляемого песчаного пляжа. Домов и постоянного населения в пределах территорий, затопляемых при максимальных уровнях воды 50-, 25-, 10-, 5 %-й обеспеченности, в пос. Победа нет

(рис. 11). При максимальных уровнях воды 3 %-й обеспеченности граница зоны затопления затрагивает несколько домов на ул. Коммунистической и ул. Набережной в северной части посёлка. При максимальных уровнях воды 1 %-й обеспеченности граница зоны затопления затрагивает также дома на ул. Октябрьской, а также садовые участки по ул. Коммунистической в северной части посёлка.

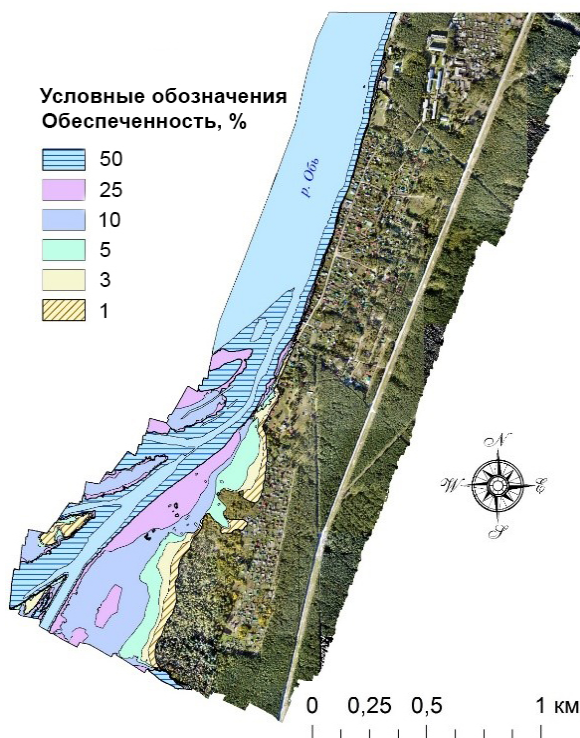


Рис. 10. Карта зон затопления д. Оськино при максимальных уровнях воды разной обеспеченности

Fig. 10. Flood hazard map of the Oskino village with flood zones at maximum water levels of different recurrence



Рис. 11. 3D-модель пос. Победа в районе моста через р. Обь (уровень воды при 50 %-й обеспеченности)

Fig. 11. 3D-model of the Pobeda village in the area of the bridge over the Ob River (water level at 50 % recurrence)

Деревня Старая Шегарка располагается на левом берегу р. Обь в 2 720 км от устья Оби при впадении протоки Старая Обь в реку Обь. Рельеф территории грядисто-ложбинный на юге и крайнем севере, в центральной части пологоволнистый с неглубокими округлыми западинами. Обской берег интенсивно подмывается, образуя обрывы высотой до 6 м. Уступ к протоке старая Обь также довольно крутой, но не подвержен размыву. Урез воды 72,0 м на 18.09.2018. Максимальные рассчитанные уровни воды при 1-, 3-, 5-, 10-, 25-, 50 %-й обеспеченности составляют, соответственно, 77,7; 77,18; 76,94; 76,52; 75,88 и 75,17 м.

Территория деревни находится в пойме Оби, поэтому при сильных половодьях затопляется полностью. Лишь при максимальных уровнях воды 50 %-й обеспеченности граница зоны затопления не затрагивает жилые дома. Однако уже при максимальных уровнях воды 25 %-й обеспеченности граница зоны затопления захватывает несколько домов на ул. Зелёной, Набережной и Садовой (рис. 12). При максимальных уровнях воды 10 %-й обеспеченности граница зоны затопления включает также дом на ул. Тракторной. При максимальных уровнях воды 5-, 3-, 1 %-й обеспеченности зона затопления охватывает всю деревню.

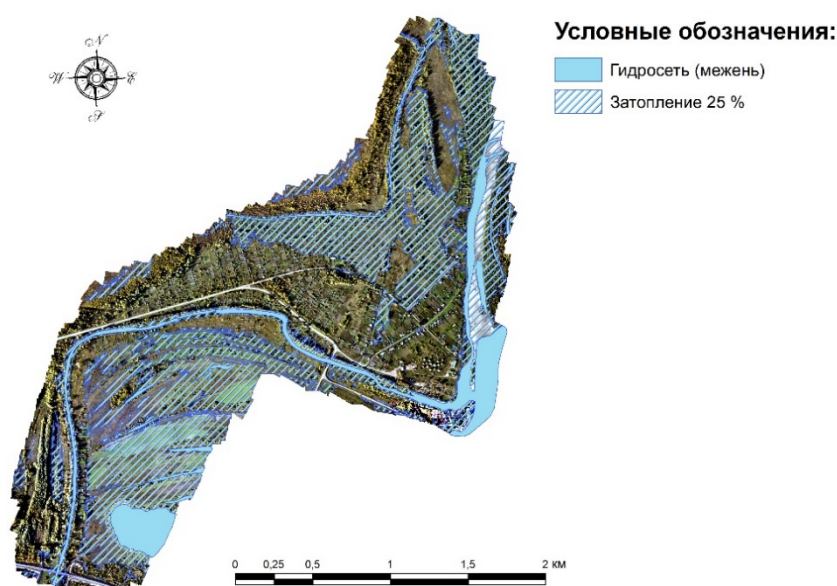


Рис. 12. Карта зон затопления д. Старая Шегарка при максимальном уровне воды 25 % обеспеченности

Fig. 12. Flood hazard map of the Staraya Shegarka village with flood zones at maximum water level of 25 % recurrence

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что благодаря применению крупномасштабных цифровых моделей рельефа существенно улучшается качество картографирования прогнозируемых зон затопления при наводнениях относительно традиционных подходов, основанных на применении открытых ЦМР низкого пространственного разрешения (например, SRTM). Проведенное исследование показало, что использование высокоточных данных с БПЛА и крупномасштабное моделирование рельефа на основе аэро съемки помогли повысить точность прогнозного картографирования зон затопления. Описанный в статье подход возможно использовать при прогножном картографировании зон затопления в пределах небольших

по площади территорий (несколько квадратных километров) в поймах равнинных рек с небольшим уклоном. В случае моделирования более протяженных участков необходимо получить цифровую модель относительных высот от уреза воды, что, например, возможно при работе с ПО SAGA [Готов, 2013].

Комплексный подход использования современных технологий в области дистанционного зондирования и геоинформационных систем, данных натурных наблюдений и фундаментальных знаний о процессах и явлениях позволяет обрести для исследований все необходимые составляющие – визуальную, аналитическую и прогнозную. Внедрение подобного подхода в практические задачи позволяет сделать жизнь людей безопаснее и минимизировать материальные потери в период наводнения.

Результаты картографирования в настоящее время размещены на Геопортале Томской области, что позволяет снизить угрозу жизни людей и материальным ценностям в период половодья. В продолжение данного исследования создается база геоданных по жителям домов, попадающих в зоны затопления, в населенных пунктах исследуемого района.

Список источников

- Адам А.М., Шепелева Л.Ф., Попков В.К. Биологические ресурсы поймы Средней Оби: динамика и прогноз. Томск : Изд-во Томского университета, 1996. 212 с.
- Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник РАН. 2016. № 2. С. 127–137.
- Асмус В.В. Применение спутниковой информации для решения задач в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. М. : ФБГУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», 2017. 47 с.
- Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Ледотермический режим нижнего бьефа Новосибирского гидроузла // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 2. С. 123–130.
- Беркович К.М., Вершинин Д.А., Земцов В.А., Рулева С.Н., Сурков В.В., Фролова Н.Л. Ледовый и русловый режим нижнего течения реки Томи // Эрозионные и русловые процессы : сб. науч. тр. 2015. Вып. 6. С. 183–198.
- Болотнов В.П. Использование индекса воздействия половодий для мониторинга пойменных экосистем (на примере поймы Средней Оби) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2007. № 3. С. 26–30.
- Борщ С.В., Бураков Д.А., Жабина И.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Система прогнозирования и раннего предупреждения об угрозе наводнений на реках бассейна р. Амур // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года» : сб. науч. тр. М. : ФГБУН ИВП РАН, 2015. С. 6–12.
- Бузин В.А. Опасные гидрологические явления : учеб. пособие. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2008. 228 с.
- Бузин В.А., Копалиани З.Д. Наводнения на реках России при современных тенденциях в изменении климата // Ученые записки РГГМУ. 2007. № 5. С. 43–54.
- Бузин В.А. Затопления и заторные наводнения на реках. СПб. : Гидрометеиздат, 2004. 202 с.
- Булавина А.С. Климатические факторы формирования стока реки Обь // Наука юга России. 2020. Т. 16, № 1. С. 45–54.
- Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Волковская Н.П. Методика долгосрочного прогноза максимальных уровней воды для р. Оби у г. Нижневартовска и результаты ее испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. № 44. С. 152–157.
- Гинко С.С. Катастрофы на берегах рек. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 128 с.
- Глотов А.А. Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием // Геоматика. 2013. № 4. С. 32–36.
- Добровольский С.Г., Истомин М.Н. Наводнения мира. М. : ГЕОС, 2006. 256 с.
- Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 244 с.
- Евсеева Н.С. Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск : Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
- Земцов В.А., Паромов В.В., Савичев О.Г. Изменение водного стока крупных рек юга Западной Сибири // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия : материалы Междунар. науч. конф. Томск, 2000. С. 321–324.
- Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь : ООО «Алекс-Пресс», 2010. 217 с.
- Карта реки Обь от Новосибирского гидроузла до устья реки Томь. Министерство речного флота РСФСР ГЛАВВОДПУТЬ. 1987. 77 с.
- Козлов Д.В., Кулешов С.Л. Многомерный анализ данных при оценке факторов заторообразования в речных бассейнах // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 2. С. 132–141.
- Колмакова М.В., Захарова Е.А., Кураев А.В., Земцов В.А., Кирпотин С.Н. Временная изменчивость климата и обводненности территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 364. С. 173–180.
- Кулешов С.Л., Козлов Д.В. Анализ влияния морфометрии русла на частоту образования весенних заторов льда в пределах речного бассейна // Природообустройство. 2017. № 5. С. 15–19.
- Льготин В.А. Естественные и антропогенные изменения речных русел бассейна Средней Оби. Самоорганизация и динамика геоморфосистем // Материалы 27-го Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Томск, 2003. С. 334–338.
- Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Агафонова С.А., Кузнецов М.А., Банщикова Л.С. Гидрологический режим Нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1 (102). С. 106–115.
- Мельникова Я.А., Вершинин Д.А. Оценка многолетнего перераспределения стока взвешенных наносов рек Томской области // Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете : Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Томск, 2017. С. 377–381.
- Мельникова Я.А., Вершинин Д.А. Многолетние изменения среднемесячных расходов взвешенных наносов реки Оби в пределах Томской области // Вестник Удмуртского университета. 2018. Т. 28, вып. 4. С. 419–426.
- Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / В.М. Савкин [и др.]; отв. ред. О.Ф. Васильев. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. 393 с.
- Новаковский Б.А., Пермяков Р.В. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа. М. : МИИГАиК, 2019. 175 с.
- Огородников А.В., Огурцова Т.М., Хромых В.С. Типология земель Кожевниковского участка поймы реки Оби // Вопросы географии Сибири. 1997. Сб. 22. С. 174–181.

Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74.

Паромов В.В., Шантыкова Л.Н. Ледовый режим бассейна Верхней Оби в условиях климатических изменений // Материалы науч. конф., посвященной 125-летию основания Томского государственного университета и 70-летию образования геолого-географического факультета. Томск, 2003. С. 145–147.

Паромов В.В. Тенденции Изменения климатических условий и речного стока в бассейне Верхней Оби в конце XX века // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия : материалы Междунар. науч. конф. Томск, 2000. С. 345–349.

Попов И.В. Применение морфологического анализа к оценке общих русловых деформаций р. Оби // Труды Государственного гидрологического института. 1962. Вып. 94. С. 22–87.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 15. Алтай и Западная Сибирь. Выпуск 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. Л. : Гидрометеоздат, 1972. 406 с.

Савичев О.Г., Паромов С.В. Гидрологические аспекты образования болот в таёжной зоне Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2014. Т. 324, № 1. С. 155–161.

Савичев О.Г., Гусева Н.В., Куприянов Е.А., Скороходова А.А., Ахмед-Оглы К.В. Химический состав вод Обского болота (Западная Сибирь) и его пространственные изменения под влиянием сбросов загрязняющих веществ // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, № 1. С. 168–172.

Семенов В.А., Гниломедов Е.В., Салугашвили Р.С., Голубев В.Н., Фролов Д.М. География распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России // Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Обнинск : Изд-во «ВНИИГМИ-МЦД», 2015. Вып. 179. С. 198–120.

Фролов А.В., Асмус В.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Жабина И.И., Затыгалова В.В., Кровотынцев В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А. «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21.

Хромых В.С. Структура и качественная оценка ландшафтов поймы Средней Оби (в границах Томской области) : дис. ... канд. геогр. наук. Новосибирск, 1975. 230 с.

Чалов Р.С. Геоморфологические следствия русловых процессов // Вопросы географии: Современная геоморфология. 2015. Сб. 140. С. 217–241.

Чалов Р.С., Плескевич Е.М. Русловые процессы и водные пути рек Обского бассейна. Новосибирск : РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.

Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М. : Изд-во Московского университета, 1983. 198 с.

Khromykh V.V., Khromykh O.V. A study of natural and anthropogenic changes of soils within the Tom river valley based on GIS, remote sensing and field observations // Journal of Physics. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 201. P. 012006.

Khromykh V.V., Khromykh V.S., Khromykh O.V. Features of soils in the floodplain landscapes of Siberian Rivers // Journal of Physics. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 201. P. 012007. doi: 10.1088/1755-1315/201/1/012007

Khromykh V.V., Khromykh O.V. Spatial structure and dynamics of Tom river floodplain landscapes based on GIS, digital elevation model and remote sensing // Riparian zones: Characteristics, management practices and ecological impacts / ed. by O.S. Pokrovsky. N.Y. : Nova Science Publishers, 2016. Chapter 12. P. 289–309.

Manfreda S., Samela C., Troy T.J. The use of DEM-based approaches to derive a priori information on flood-prone areas // Flood Monitoring through Remote Sensing: Springer Remote Sensing/Photogrammetry (eBook). 2018. 209 p.

Zemtsov V.A., Vershinin D.A., Khromykh V.V., Khromykh O.V. Long-term dynamics of maximum flood water levels in the middle course of the Ob River // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. № 400. P. 1–7.

References

Adam A.M., Shepeleva L.F., Popkov V.K. *Biologicheskie resursy poymy Sredney Obi: dinamika i prognoz* [Biological resources of the Middle Ob floodplain: dynamics and forecast]. Tomsk : Tomsk State University Publishing house, 1996. 212 p. In Russian

Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Sozdanie intellektual'nykh informatsionnykh sistem operativnogo prognozirovaniya rechnykh navodneniy* [Creation of intelligent information systems for operational forecasting of river floods] // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2016. No. 2. pp. 127–137. In Russian

Asmus V.V. *Primenenie sputnikovoy informatsii dlya resheniya zadach v oblasti gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchey sredy* [Application of satellite information for solving problems in hydrometeorology and environmental monitoring]. Moscow : Siberian Center of the Federal State Budgetary Institution «Scientific Research Center of Space Hydrometeorology ‘Planeta’». 2017. 47 p. In Russian

Atavin A.A., Zinoviev A.T., Kudishin A.V. *Ice thermal regime of the lower pool of the Novosibirsk hydraulic power system* // Water resources. 2014. V. 41. No. 2. pp. 123–130. In Russian

Berkovich K.M., Vershinin D.A., Zemtsov V.A., Ruleva S.N., Surkov V.V., Frolova N.L. *Ledovyy i ruslovoy rezhim nizhnego techeniya reki Tomi* [Ice condition and channel regime of the lower reaches of the Tom River] // Eroziionnye i ruslovy protsessy : collection of works. 2015. V. 6. pp. 183–198. In Russian

Bolotnov V.P. *Application of flood index in monitoring flood-plain ecosystems (by the example of the Middle Ob flood-plain)* // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2007. No. 3. pp. 23–30. In Russian

Borshch S.V., Burakov D.A., Zhabina I.I., Leont'eva E.A., Simonov Yu.A., Stepanov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M. *Sistema prognozirovaniya i rannego preduprezhdeniya ob ugroze navodneniy na rekakh basseyna r. Amur* [System for forecasting and early warning on the risk of floods on the rivers of the Amur river basin] // Nauchnoe obespechenie realizatsii Vodnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda : collection of works. Moscow : WPI RAS, 2015. pp. 6–12. In Russian

- Buzin V.A. *Opasnye gidrologicheskie yavleniya. Uchebnoe posobie* [Hazardous hydrological phenomena. Study guide]. St.Petersburg : RSHU Publishing house, 2008. 228 p. In Russian
- Buzin V.A., Kopaliani Z.D. *Navodneniya na rekakh Rossii pri sovremennykh tendentsiyakh v izmenenii klimata* [Floods on Russian rivers with current trends in climate change] // *Uchenye zapiski RGGMU*. 2007. No. 5. pp. 43–54. In Russian
- Buzin V.A. *Zatory l'da i zatornye navodneniya na rekakh* [Ice caps and river jam floods]. St.Petersburg : Gidrometeoizdat Publishing house, 2004. 202 p. In Russian
- Bulavina A.S. *Klimaticheskie faktory formirovaniya stoka reki Ob'* [Climatic factors of the Ob River runoff formation] // *Science in the South of Russia*. 2020. V. 16. No.1. pp. 45–54. In Russian
- Burakov D.A., Kosmakova V.F., Volkovskaya N.P. *Metodika dolgosrochnogo prognoza maksimal'nykh urovney vody dlya r. Obi u g. Nizhnevar'tovska i rezul'taty ee ispytaniya* [The method of long-term forecast of maximum water levels for the Ob River near Nizhnevar'tovsk and the results of its testing] // *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. 2017. No. 44. pp. 152–157. In Russian
- Ginko S.S. *Katastrofy na beregakh rek* [Riverbank disasters]. Leningrad : Gidrometeoizdat Publishing house, 1977. 128 p. In Russian
- Glotov A.A. *Ispol'zovanie TsMR dlya effektivnogo upravleniya prirodopol'zovaniem* [Using the DEM for effective environmental management] // *Geomatics*. 2013. No. 4. pp. 32–36. In Russian
- Dobrovol'skiy S.G., Istomina M.N. *Navodneniya mira* [Floods of the world]. Moscow : GEOS Publishing house, 2006. 256 p. In Russian
- Donchenko R.V. *Ledovyy rezhim rek SSSR* [Ice regime of the USSR Rivers]. Leningrad : Gidrometeoizdat Publishing house, 1987. 244 p. In Russian
- Evseeva N.S. *Sovremennyy morfologicheskyy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Modern morpholithogenesis in the southeast of the West Siberian Plain]. Tomsk: NTL Publishing house, 2009. 484 p. In Russian
- Zemtsov V.A., Paromov V.V., Savichev O.G. *Izmenenie vodnogo stoka krupnykh rek yuga Zapadnoy Sibiri* [Changes in the water runoff of large rivers in the south of Western Siberia] // *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov na rubezhe tret'ego tysyacheletiya: Materials of International Scientific Conference*. Tomsk, 2000. pp. 321–324. In Russian
- Kalinin V.G., Pyankov S.V. *Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologiy v gidrologicheskikh issledovaniyakh* [Application of gis technologies in hydrological research]. Perm : «Aleks-Press», 2010. 217 p. In Russian
- Karta reki Ob' ot Novosibirskogo gidrouzla do ust'ya reki Tom'* [Map of the Ob River from the Novosibirsk hydroelectric complex to the mouth of the Tom River]. Ministry of the River Fleet of the RSFSR GLAVVODPUT". 1987. 77 p. In Russian
- Kozlov D.V., Kuleshov S.L. *Multidimensional data analysis in the assessment of ice-jam formation in river basins* // *Water Resources*. 2019. V.46. No. 2. pp. 152–159.
- Kolmakova M.V., Zakharova E.A., Kuraev A.V., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. *Vremennaya izmenchivost' klimata i obvodnennosti territorii Zapadnoy Sibiri po dannym meteorologicheskikh stantsiy, model'nogo reanaliza i sputnikovoy al'timetrii* [Temporal variability of climate, flooded and wet zones in Western Siberia from data stations, atmospheric reanalysis and satellite altimetry] // *Tomsk State University Journal*. 2012. No. 364. pp. 173–180. In Russian
- Kuleshov S.L., Kozlov D.V. *Analiz vliyaniya morfometrii rusla na chastotu obrazovaniya vesennykh zatorov l'da v predelakh rechnogo basseyna* [Analysis of the effect of channel morphometry on the incidence of spring ice blocks within the river basin] // *Prirodobustroystvo*. 2017. No. 5. pp. 15–19. In Russian
- L'gotin V.A. *Estestvennye i antropogennye izmeneniya rechnykh rusel basseyna Sredney Obi. Samoorganizatsiya i dinamika geomorfosistem* [Natural and anthropogenic changes in river channels in the Middle Ob basin. Self-organization and dynamics of geomorphosystems] // *Materials of 27th Plenum of the Geomorphological Commission of the RAS*. Tomsk, 2003. pp. 334–338. In Russian
- Magritskiy D.V., Chalov S.R., Agafonova S.A., Kuznetsov M.A., Bانشchikova L.S. *Gidrologicheskiy rezhim Nizhney Obi v sovremennykh gidroklimaticheskikh usloviyakh b pod vliyaniem krupnomasshtabnoy vodokhozyaystvennoy deyatel'nosti* [Hydrological regime of the Lower Ob in modern hydroclimatic conditions and under the influence of large-scale water management] // *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District*. 2019. № 1 (102). pp. 106–115. In Russian
- Mel'nikova Ya.A., Vershinin D.A. *Otsenka mnogoletnego pereraspredeleniya stoka vzveshennykh nanosov rek Tomskoy oblasti* [Evaluation of long-term redistribution runoff of suspended sediment of rivers of Tomsk Region] // *Sovremennye problemy geografii i geologii: k 100-letiyu otkrytiya estestvennogo otdeleniya v Tomskom gosudarstvennom universitete* : Materials of the Fourth Scientific and Practical Conference. Tomsk, 2017. pp. 377–381. In Russian
- Mel'nikova Ya.A., Vershinin D.A. *Mноголетние изменения средних месячных расходов взвешенных наносов реки Оби в пределах Томской области* [Long-term changes of monthly discharges of suspended sediments of the Ob river within the Tomsk region] // *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2018. V. 28. No. 4. pp. 419–426. In Russian
- Mноголетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища* [Long-term dynamics of water and ecological regime of Novosibirsk Reservoir] / V.M. Savkin [et al.]; ed. O.F. Vasil'ev. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2014. 393 p. In Russian
- Novakovskiy B.A. *Kompleksnoe geoinformatsionno-fotogrammetricheskoe modelirovanie rel'efa* [Integrated geoinformation and photogrammetric modelling of relief]. Moscow : MII GAIK Publishing House, 2019. 175 p. In Russian
- Ogorodnikov A.V., Ogurtsova T.M., Khromykh V.S. *Tipologiya zemel' Kozhevnikovskogo uchastka poymy reki Obi* [Land typology of the Kozhevnikovskiy section of the Ob River floodplain] // *Voprosy geografii Sibiri*. 1997. V. 22. pp. 174–181. In Russian
- Paromov V.V., Zemtsov V.A., Kopysov S.G. *Climate of West Siberia during the slowing phase of warming (1986–2015) and prediction of hydro-climatic resources for 2021–2030*. // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. V. 328. No.1. pp. 62–74. In Russian
- Paromov V.V., Shantykova L.N. *Ledovyy rezhim basseyna Verkhney Obi v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy* // *Materialy nauch. konf., posvyashchennoy 125-letiyu osnovaniya Tomskogo gosudarstvennogo universiteta i 70-letiyu obrazovaniya geologo-geograficheskogo fakul'teta*. Ser. «Nauki o Zemle (geologiya, geografiya, meteorologiya, geodeziya)». Tomsk, 2003. pp. 145–147. In Russian

Paromov V.V. *Tendentsii izmeneniya klimaticheskikh usloviy i rechnogo stoka v bassejne Verkhney Obi v kontse XX veka* [Trends in changes in climatic conditions and river flow in the Upper Ob basin at the end of the 20th century] // *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov na rubezhe tret'ego tysyacheletiya* : Materials of International Scientific Conference. Tomsk, 2000. pp. 345–349. In Russian

Popov I.V. *Primenenie morfologicheskogo analiza k otsenke obshchikh ruslovykh deformatsiy r. Obi* [Application of morphological analysis to the assessment of the general channel deformations of the Ob River] / Collection of works of the SHI. 1962. V. 94. pp. 22–87. In Russian

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 15. Altay i Zapadnaya Sibir'. Vypusk 2. Srednyaya Ob' [Resources of surface waters of the USSR. Volume 15. Altai and Western Siberia. Issue 2. Middle Ob] / ed. N. A. Panina. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1972. 406 p. In Russian

Savichev O.G., Paromov S.V. *Hydrological aspects of bogs formation in Taiga zone of Western Siberia* // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2014. V. 324. No. 1. pp. 155–161. In Russian

Savichev O.G., Guseva N.V., Kupriyanov E.A., Skorokhodova A.A., Akhmed-Ogly K.V. *Khimicheskiy sostav vod Obskogo bolota (Zapadnaya Sibir') i ego prostranstvennye izmeneniya pod vliyaniem sbrosov zagryaznyayushchikh veshchestv* [The water chemical composition of the Ob bog (Western Siberia) and its spatial changes under the influence of pollutant discharge] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2013. V. 323. No. 1. pp. 168–172. In Russian

Semenov V.A., Gnilomedov E.V., Salugashvili R.S., Golubev V.N., Frolov D.M. *Geografiya raspredeleniya i genezis klimatobuslovlennykh izmeneniy ekstremal'nykh raskhodov vody, opasnykh navodneniy i malovodiy na rekakh Rossii* [Geography of distribution and genesis of climate-related changes in extreme water flow rates, hazardous floods and low water levels on Russian rivers] // Collection of works of the RIHMI-WDC. Obninsk : RIHMI-WDC Publishing house, 2015. V. 179. pp. 198–220. In Russian

Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Yu.A., Stepanov Yu.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. V. 41. No. 3. pp. 5–21. In Russian

Khromykh V.S. *Struktura i kachestvennaya otsenka landshaftov poymy Sredney Obi (v granitsakh Tomskoy oblasti)* / Thesis for the Candidate of Geographical Sciences. Novosibirsk, 1975. 230 p.

Chalov R.S. *Geomorfologicheskie sledstviya ruslovykh protsessov* [Geomorphological consequences of channel processes] // *Voprosy geografii: Sovremennaya geomorfologiya*. 2015. V. 140. pp. 217–241. In Russian

Chalov R.S., Pleskevich E.M. *Ruslovyye protsessy i vodnye puti rek Obskogo basseyna* [Channel processes and waterways of the rivers of the Ob River basin]. Novosibirsk : «RIPEL plus», 2001. 300 p. In Russian

Chernov A.V. *Geomorfologiya poymy ravninnykh rek* [Geomorphology of floodplains of lowland rivers]. Moscow : Moscow State University Publishing house, 1983. 198 p. In Russian

Khromykh V.V., Khromykh O.V. A study of natural and anthropogenic changes of soils within the Tom river valley based on GIS, remote sensing and field observations // *Journal of Physics. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 201. 012006.

Khromykh V.V., Khromykh V.S., Khromykh O.V. Features of soils in the floodplain landscapes of Siberian Rivers // *Journal of Physics. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 201. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/201/1/012007

Khromykh V.V., Khromykh O.V. Spatial structure and dynamics of Tom river floodplain landscapes based on GIS, digital elevation model and remote sensing // *Riparian zones: Characteristics, management practices and ecological impacts*. Ed. O.S. Pokrovsky. New York: Nova Science Publishers, 2016. Chapter 12. pp. 289–309.

Manfreda S., Samela C., Troy T.J. The use of DEM-based approaches to derive a priori information on flood-prone areas // *Flood Monitoring through Remote Sensing: Springer Remote Sensing/Photogrammetry (eBook)*. 2018. 209 p.

Zemtsov V.A., Vershinin D.A., Khromykh V.V., Khromykh O.V. Long-term dynamics of maximum flood water levels in the middle course of the Ob River // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. № 400. pp. 1–7.

Информация об авторах:

Чекина А.А., аспирант, кафедра географии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: chekina.ann@gmail.com

Хромых В.В., кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой географии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: khromykh_vadim@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Chekina A.A., Postgraduate Student, Department of Geography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: chekina.ann@gmail.com

Khromykh V.V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Head at the Department of Geography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: khromykh_vadim@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.10.2021; одобрена после рецензирования 19.05.2023; принята к публикации 28.05.2023

The article was submitted 15.10.2021; approved after reviewing 19.05.2023; accepted for publication 28.05.2023