

ПОСТРОЕНИЕ ЗОНЫ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ

К.К. Никитский (КБ «Панорама»)

В 2020 г. окончил факультет прикладной космонавтики и фотограмметрии МИИГАиК с присвоением квалификации «магистр» по направлению «Информационные системы и технологии». После окончания университета работает в АО КБ «Панорама», в настоящее время — инженер-программист.

Гидродинамическая авария — это чрезвычайное событие, связанное с выходом из строя (разрушением) гидротехнического сооружения (ГТС) или его части. В результате разрушения возникает волна прорыва, образующаяся во фронте проходящего в прорыв ГТС потока воды, имеющего значительную скорость движения и обладающего большой разрушительной силой.

За последние 100 лет в мире произошло более 20 крупных аварий на гидротехнических сооружениях, три из них — на территории Российской Федерации.

Так, в результате прорыва плотины Тирлянского водохранилища в Башкирии в 1994 г. в зоне затопления оказались 4 населенных пункта, были полностью разрушены 85 домов, частично разрушены 200 домов, погибли 29 человек, 786 человек остались без крова.

В результате аварии из-за разрушения турбины на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. погибло 75 человек. Такое значительное количество погибших объясняется нахождением большинства людей во внутренних помещениях станции ниже уровня пола машинного зала и быстрым затоплением этих помещений.

Разрушение плотины в результате внешнего воздействия на Каховской ГЭС в 2023 г. привело к гибели 60 человек. Затопленной оказалась местность площадью порядка 600 км², в том числе 59 особо охраняемых природных территорий и 67 населенных пунктов.

При гидродинамической аварии основными поражающими факторами являются действие волны прорыва и катастрофическое затопление местности. Многочисленные человеческие жертвы, разрушенные здания, потеря имущества жителями затопленных территорий — это прямой ущерб, который в результате гидродинамической аварии составит значительные суммы. Снижение прямого и косвенного ущерба возможно на основе точных прогнозов движения волны прорыва и зоны затопления.

Катастрофическое затопление местности характеризуется следующими параметрами:

- максимальной возможной высотой и скоростью волны прорыва;
- расчетным временем прихода гребня и фронта волны прорыва в соответствующий створ;
- максимальной глубиной затопления участка местности;

- длительностью затопления территории;
- границами зоны возможного затопления.

Высота волны прорыва и скорость ее распространения зависят от объема и глубины водохранилища, площади зеркала водного бассейна, размеров прорыва, разницы уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, гидрологических и топографических условий русла реки и ее поймы [1].

В КБ «Панорама» разработан Комплекс гидрологических задач для ГИС «Панорама». В версии 6.3.5 комплекса добавлена прикладная задача «Моделирование волны прорыва при разрушении гидротехнического сооружения», созданная на основе Инструкции ФГБУ «Гидро-спецеология» [2]. Исходные данные для выполнения расчетов включают:

- параметры плотины ГТС;
- параметры водохранилища;
- фарватер — осевую линию реки ниже водохранилища на длину анализируемого участка потенциального затопления;
- матрицу высот рельефа вдоль реки на всю длину анализируемого фарватера и на всю ширину предполагаемой зоны затопления;

— створы с характеристиками русла реки ниже водохранилища.

Результатом выполнения расчетов являются:

— график движения волны прорыва;

— матрица с глубинами затопления территории;

— границы зоны катастрофического затопления.

Процесс моделирования зоны катастрофического затопления при прорыве ГТС включает несколько технологических этапов, связанных с подготовкой исходной модели местности, используемой для построения графика движения волны прорыва и зоны затопления. Рассмотрим их подробнее.

В качестве исследуемого объекта было выбрано Можайское водохранилище, расположенное на западе Московской области (рис. 1). Объект, являющийся крупнейшим водохранилищем региона, образован в 1960–1962 гг. в результате сооружения гидроузла на реке Москве, выше города Можайска. В состав гидроузла входят земляная плотина и Можайская гидроэлектростанция.

Модель исходных данных для выполнения расчетов катастрофического затопления местности должна включать матрицу высот рельефа и цифровую карту, с нанесенными на нее объектами гидрографии.

В качестве исходной цифровой карты была взята карта OSM на Московскую область (рис. 2). OSM (OpenStreetMap) — некоммерческий веб-картографический проект по созданию силами сообщества участников подробной свободной и бесплатной географической карты мира.

В качестве исходной цифровой модели рельефа была взята матрица SRTM с размером элемента 92,77 м² на Московскую область (рис. 3). SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) — международный исследователь-

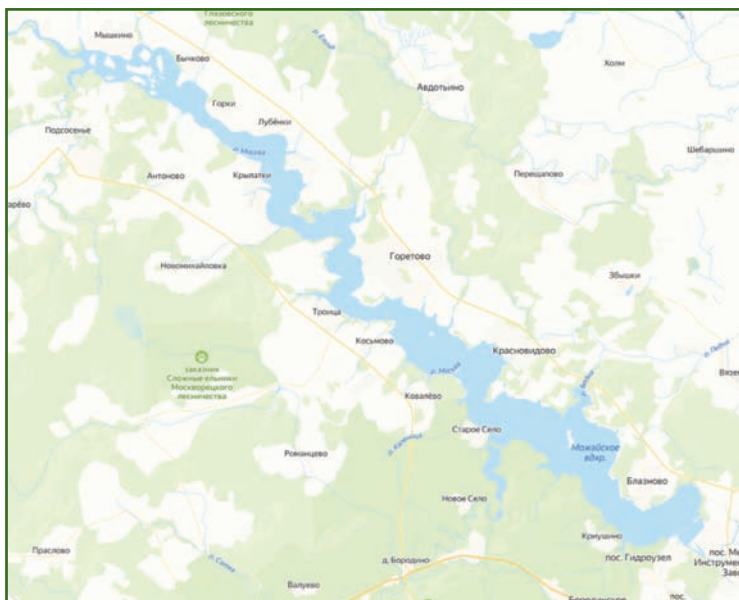


Рис. 1

Можайское водохранилище на геопортале «Яндекс Карты»

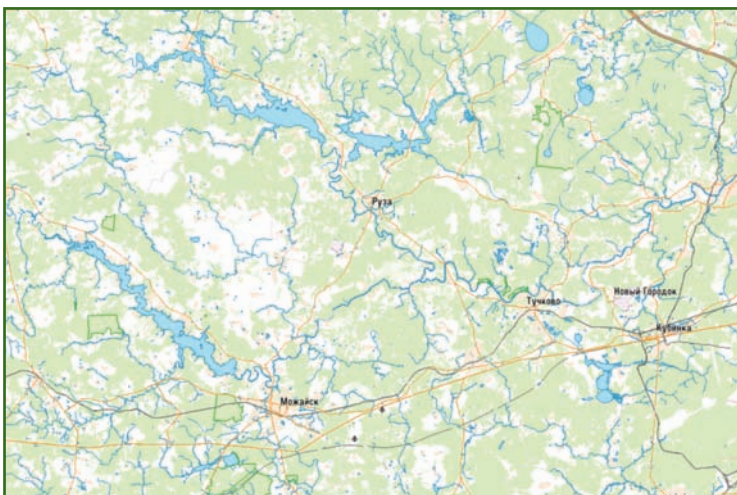


Рис. 2

Цифровая карта западной части территории Московской области

ский проект по созданию цифровой модели высот Земли с помощью радарной топографической съемки ее поверхности. Информация, полученная благодаря съемке, предназначена для использования в научных и гражданских приложениях.

Исходная модель местности, используемая для расчетов, должна быть гидрологически корректной. Это означает, что соблюдаются следующие условия:

— объекты гидрографии имеют трехмерную метрику;

— у линейных объектов гидрографии (реки, ручьи) высоты в метрике монотонно убывают от истока к устью;

— у площадных объектов гидрографии с постоянным уровнем воды (озера, моря) одинаковая высота во всех точках;

— у смежных объектов гидрографии высоты в метрике согласованы друг с другом;

— высоты объектов гидрографии согласованы со значениями матрицы высот.

При визуальном анализе цифровой карты OSM и матрицы

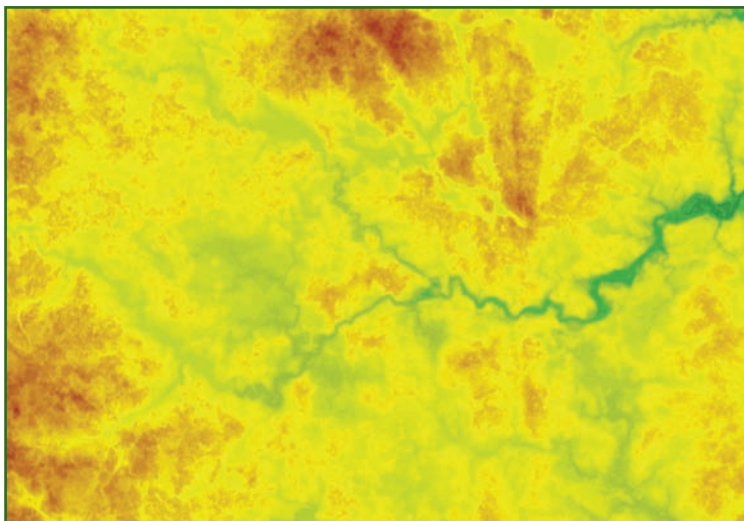


Рис. 3
Цифровая модель рельефа западной части территории Московской области

няются высотами из матрицы высот рельефа. Высоты в промежуточных точках сглаживаются, чтобы обеспечить их плавное убывание от истока к устью. В точках стыковки объектов гидрографии рассчитывается средняя арифметическая высота для согласования объектов друг с другом. В площадные объекты гидрографии с постоянной высотой заносится наиболее часто встречающаяся высота из матриц высот рельефа в пределах объекта. Высоты точек метрики площадных объектов гидрографии с переменной высотой рассчитываются на основе высот точек метри-

высот рельефа STRM стало видно, что есть места, в которых реки не попадают в русло на матрице, следовательно, высоты в метрике таких объектов гидрографии не соответствуют принципу монотонного убывания (рис. 4). Это произошло из-за того, что цифровая карта и матрица высот рельефа были получены из разных источников.

Для создания гидрологически корректной модели местности было необходимо согласовать цифровую карту и матрицу высот рельефа. Для этого использовался режим «Согласование объектов гидрографии и матриц высот» Комплекса гидрологических задач ГИС «Панорама» (рис. 5).

Поскольку высоты объектов гидрографии корректируются по направлению оцифровки объектов, перед началом согласования была выполнена проверка того, что все реки оцифрованы по направлению течения от истока к устью.

Все нижеописанные операции согласования объектов гидрографии и матрицы высот рельефа выполняются в автоматическом режиме.

Вначале на основе объектов гидрографии формируется се-

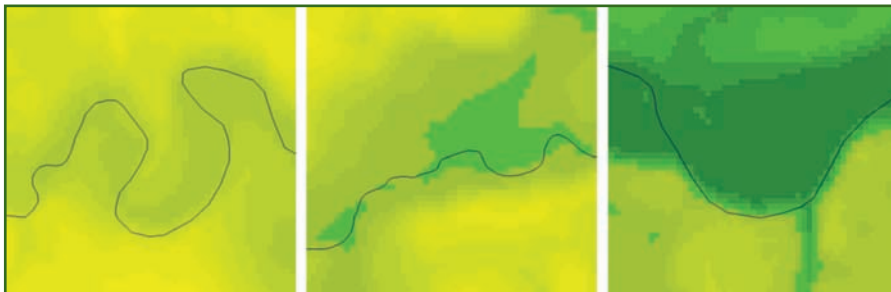


Рис. 4
Фрагменты модели местности с несогласованными участками

тевой граф. Затем выполняется линейная аппроксимация высот объектов гидрографии. Значения в крайних точках линейных объектов гидрографии запол-

ки смежных объектов гидрографии.

После исправления объектов гидрографии проводится согла-

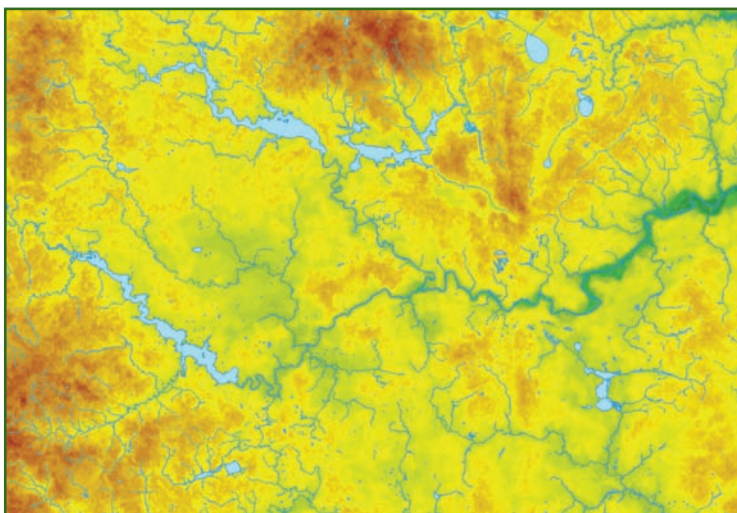


Рис. 5
Гидрологически корректная модель местности

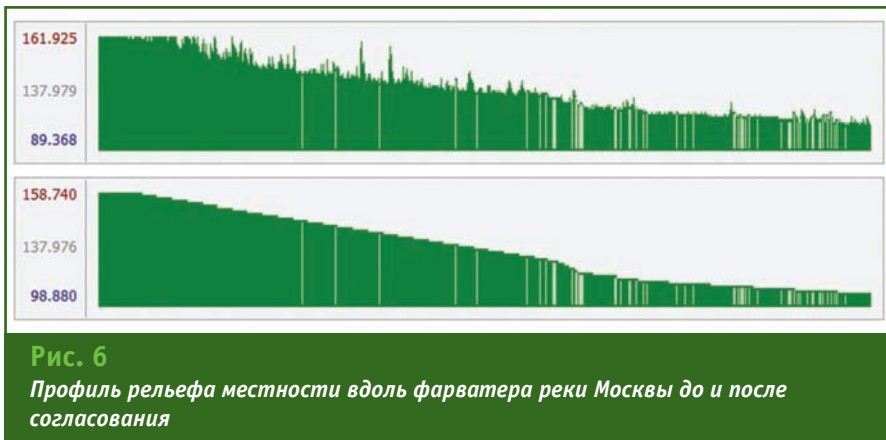


Рис. 6

Профиль рельефа местности вдоль фарватера реки Москвы до и после согласования

сование матрицы высот. Рассчитанные высоты из метрики объектов гидрографии переносятся в ячейки матрицы высот. Значения высот в ячейках матрицы, смежных с объектами гидрографии, сглаживаются методом линейной аппроксимации.

Сравнение профилей рельефа местности вдоль фарватера реки Москвы до и после согласования показывает, что до согласования высоты матрицы не обеспечивали плавное убывание высоты реки от истока к устью, а после согласования модель рельефа стала гидрологически корректной (рис. 6).

Перед моделированием волны прорыва и построением зо-

ны затопления была подготовлена карта русла реки, состоящая из дамбы, фарватера и створных точек. Карта русла реки создавалась ниже плотины на всю территорию предполагаемой зоны затопления на основе подготовленной модели местности.

Фарватер реки Москвы был взят с исходной карты. Так как он состоял из множества объектов, было проведено объединение этих объектов в один с помощью режима «Объединение выделенных линейных объектов» редактора карты ГИС «Панорама». У фарватера уже были рассчитаны высоты при согласовании, так что дополнительных действий не потребовалось.

Дамба была нанесена на карту на место гидроузла Можайского водохранилища. Для нее была заполнена семантическая информация, необходимая для построения зоны затопления (рис. 7). Эти данные были получены на основе анализа информации о водохранилище и прилегающей к нему местности на гидрологических веб-ресурсах.

Для получения сведений о ширине реки, глубине, скорости течения и прочих характеристиках створов были проанализированы цифровая карта и данные с геопорталов. Местоположение створных точек определялось с учетом расчета параметров волны прорыва, а также

удаленности от гидроузла и особенностей местности. Створные точки были размещены в узлах метрики фарватера.

Несмотря на то, что значения семантик створных точек могли быть рассчитаны автоматически при моделировании волны прорыва, они были заданы вручную для более точных расчетов (рис. 8).

Для построения зоны затопления использовалась задача «Моделирование волны прорыва при разрушении гидротехнического сооружения» Комплекса гидрологических задач ГИС «Панорама». При запуске задачи программа считывает с карты исходные сведения семантической информации дамбы и створных точек, автоматически рассчитывает уровень затопления в створных точках и строит график движения волны прорыва (рис. 9).

График движения волны прорыва показывает изменение основных параметров волны по длине реки, начиная от створа в нижнем бьефе гидроузла (0-й створ) и до последнего створа.

График движения волны прорыва строится на плоскости Z-L-T:

— L (расстояние от гидроузла) откладывается на оси абсцисс;

— Z (отметки уровня) обозначаются на левой оси ординат;

— T (время с момента разрушения) обозначается на правой оси ординат.

Основой графика является продольный профиль фарватера реки, построенный в плоскости Z-L, на который наносится максимальный уровень воды в расчетных створах при движении волны прорыва. На рис. 9 показан линией черного цвета.

В плоскости L-T строятся графики движения фронта, гребня и хвоста волны прорыва. На рис. 9 показаны линиями красного, синего и зеленого цветов.

1001	Объем водохранилища [0.0 ... 0.0]	235
1002	Глубина водохранилища у плотины [0.0 ... 0.0]	22
1003	Площадь зеркала водохранилища [0.0 ... 0.0]	31
1004	Ширина водохранилища у плотины [0.0 ... 0.0]	80
1005	Глубина реки в нижнем бьефе гидроузла [0.0 ... 0.0]	3
1006	Ширина реки в нижнем бьефе гидроузла [0.0 ... 0.0]	35
1007	Скорость течения в нижнем бьефе гидроузла [0.0 ... 0.0 0.5]	0.5
1008	Глубина водохранилища у плотины на момент разрушения	22
1009	Степень разрушения гидроузла [0.00 ... 0.00]	100
1010	Высота порога бреша [0.0 ... 0.0]	2
1011	Отметка уреза воды водохранилища (НПУ) [0.0 ... 0.0]	177

Рис. 7

Семантическая информация по дамбе — исходные данные для расчета

2004	Отметка уреза воды бытового потока [0.0 ... 0.0]	156
2005	Глубина бытового потока [0.0 ... 0.0]	3
2006	Ширина бытового потока [0.0 ... 0.0]	23
2007	Скорость течения бытового потока [0.0 ... 0.0]	0.5
2008	Отметка горизонтали местности [0.0 ... 0.0]	160
2009	Расстояние между горизонталями [0.0 ... 0.0]	320

Рис. 8

Семантическая информация створной точки — данные для расчета

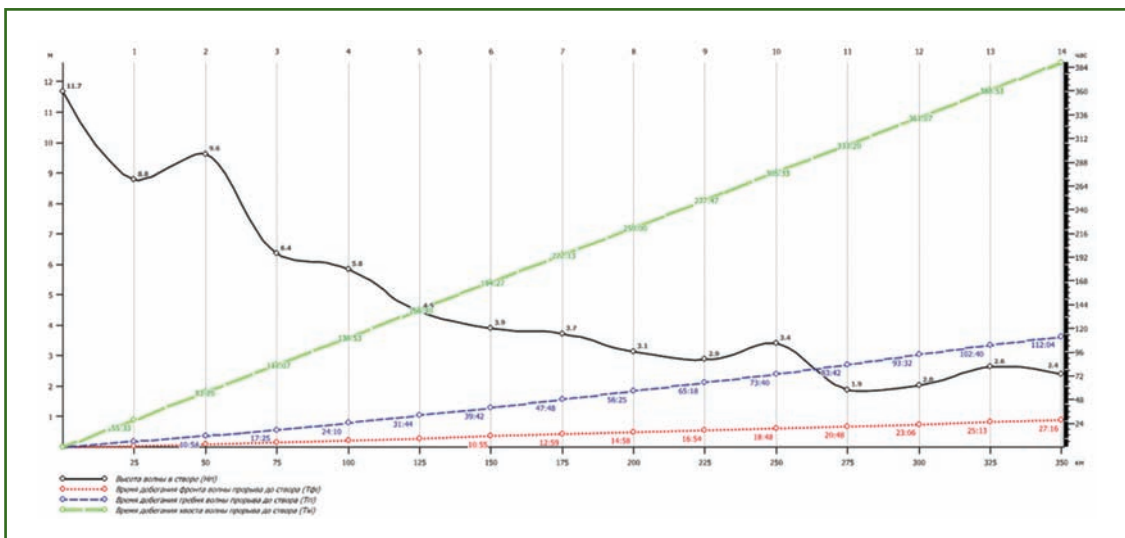


Рис. 9
График движения волны прорыва

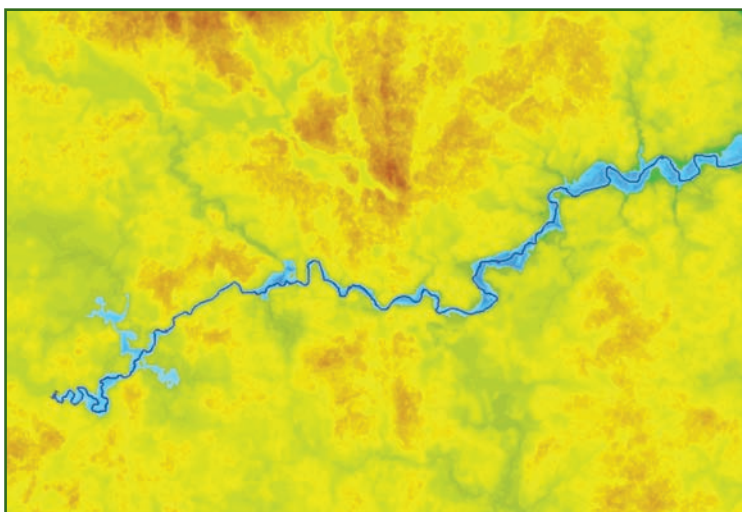


Рис. 10
Зона затопления вдоль фарватера реки Москвы

Графики движения волны прорыва позволяют определить параметры волны прорыва в любом промежуточном створе реки.

На основе уровней воды в створных точках строится зона затопления. Глубины затопления рассчитываются сначала в непосредственной близости от фарватера и постепенно отдаляются от него, пока высота рельефа не будет превышать уровень подъема воды. Такой метод расчета позволяет строить зоны затопления для рек с большим количеством

изгибов и ответвлений (рис. 10).

В результате создается матрица глубин, а также объект, показывающий границы зоны затопления. Зону затопления и график движения волны прорыва в любой момент можно перестроить на основе более актуальных данных, если такие будут получены.

Полученная граница зоны катастрофического затопления используется для определения ее площади и количества объектов производственной, транспортной, коммунальной и соци-

альной инфраструктуры, жилых и производственных зданий, сельскохозяйственных угодий, попадающих в зону затопления (рис. 11). Результаты анализа используются для подготовки различных отчетов и аналитических справок, в том числе для оценки последствий чрезвычайной ситуации, в соответствии с требованиями приказа МЧС России от 01.09.2020 г. № 631 [3].

Описанная технология моделирования волны прорыва и зоны катастрофического затопления местности при прорыве

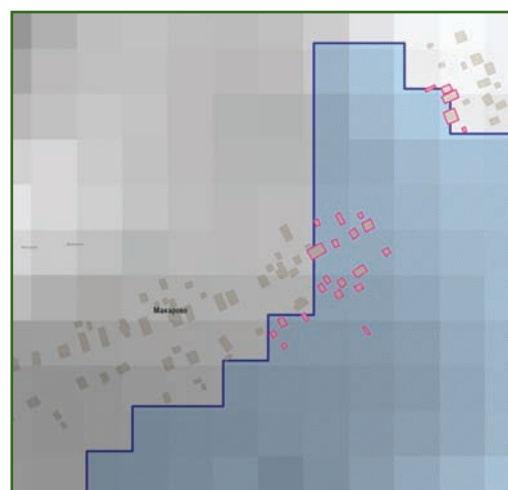


Рис. 11
Пример отображения зданий, попавших в зону затопления

гидроузла обеспечивает высокоточные расчеты на основе данных, полученных из открытых источников. Использование режимов Комплекса гидрологических задач ГИС «Панорама» дает возможность обработать и откорректировать матрицы высот рельефа по данным векторной карты, полученных из разных источников. Созданная гидрографически корректная модель местности помогает построить матрицу глубин, определить границы зоны затопления и оценить местность, попавшую в зону чрезвычайной ситуации.

Перспективным направлением применения методики построения зон катастрофического затопления является, например, формирование таких зон при создании проектов определения границ зон затопления и подтопления.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 18 апреля 2014 г. № 360 [4] предусмотрено выполнение государственных контрактов по определению границ зон затоплений и подтоплений. При этом зоны затопления определяются в отношении территорий, затопляемых при половодьях, паводках, заторах/зажорах и нагонных явлениях. Для решения выше указанных задач успешно используются функционал ГИС «Панорама»: от построения границ зон затопления до формирования электронных XML-документов для внесения в ЕГРН.

В настоящее время на территории РФ эксплуатируется свыше 28,5 тыс. водохранилищ, в том числе 330 крупных (емкостью более 10 млн м³) с общей емкостью более 800 км³. Многие из них находятся в экс-

плуатации более 40 лет. Наличие зарегистрированных границ зон катастрофического затопления местности обеспечит более эффективное планирование строительства и освоения территорий, находящихся в зонах потенциального катастрофического затопления.

▼ Список литературы

1. Гражданская защита: Энциклопедия в 4-х томах. Том I (А–И); под общей ред. В.А. Пучкова / МЧС России. — М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. — 666 с.

2. Инструкция по приближенному расчету движения волны прорыва при активном затоплении. — М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2014.

3. Приказ МЧС России от 01.09.2020 г. № 631 «Об утверждении Методики оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций».

4. Постановление Правительства РФ от 18 апреля 2014 г. № 360 «Об определении границ зон затопления, подтопления».

КБ ПАНОРАМА
Геоинформационные технологии

gisinfo.ru

15 Геоинформационная платформа
ПАНОРАМА

АО КБ «Панорама»
105005, Россия, г. Москва, ул. Бауманская,
д.7, стр.1, помещ. I, ком. 45, этаж 2
+7 (495) 739-0245
+7 (926) 542-2631
panorama@gisinfo.ru
kb@gisinfo.ru

Основы для построения
геоинформационных систем
различного назначения

Трансформирование данных
Атлас карт
Трехмерный вид
Картография
Подготовка к изданию