Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134). С. 147-164. ISSN 1998-8443 (print)

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 6 (134). P. 147-164. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 556+519.673

doi: 10.17122/ntj-oil-2021-6-147-164

ОЦЕНКА ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ ПАВОДКА МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФРАГМЕНТАРНЫХ ДАННЫХ О ФАКТАХ ЗАТОПЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Александр Николаевич Угаров¹, Елена Анатольевна Сидельская²,
Валерий Иванович Ларионов³

^{1, 3}Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Центр исследований экстремальных ситуаций, Москва, Россия

¹garo-1@yandex.ru

²helena2477@mail.ru

³lar@esrc.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Угаров, garo-1@yandex.ru

Аннотация. На территории Российской Федерации, как одной из наиболее обеспеченных водными ресурсами стран мира, сосредоточено более 20 % мировых запасов пресных вод. При этом серьезной проблемой, требующей особого внимания со стороны государства, становится увеличение чрезвычайных ситуаций в результате наводнений. Сложная водохозяйственная ситуация складывается в Приморском и Хабаровском крае, Сахалинской и Амурской областях, Забайкалье, на Среднем и Южном Урале, в низовьях Волги, на Северном Кавказе, в Краснодарском крае, Западной и Восточной Сибири. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средств-

вами ГИС-технологий в современных условиях, при постоянно растущих требованиях к безопасности, – трудоемкая, многоуровневая задача, требующая, как правило, отдельного подхода к рекам и даже участкам рек, поскольку зоны максимального разлива рек (затопления) моделируются для водотоков (участков водотоков), затапливаемых при половодьях, паводках, заторах, зажорах и нагонах, а также при пропуске паводков в нижних бьефах гидроузлов и пр. Существующие методики моделирования и программные средства оценки обстановки в зоне затопления не всегда позволяют получить удовлетворительный результат, чтобы в полной мере оценить степень риска, и не

предполагают оперативного решения задач, связанных с оценкой последствий катастрофических паводков.

В статье обоснована возможность проведения оперативной оценки обстановки в зоне паводка по данным из отдельных телефонных сообщений пострадавших и наблюдателей (информаторов). Предложен алгоритм моделирования зоны затопления, отличительная особенность которого заключается в том, что после определения местоположения источника информации (корреспондента) на основе анализа пространственных данных при помощи геоинформационных систем формируется линия стока, соединяющая место размещения информатора с осью водотока, являющегося источником опасности. По тексту сообщения или фотографии места определяются координаты и глубина затопления точки, представленной в сообщении, а также абсолютная отметка

подъема воды в этой точке с использованием цифровой модели рельефа. Указанная отметка относится ко всей линии стока и ее водосбору, в пределах которого как затопленные отмечаются точки, высота которых меньше вычисленного значения абсолютной отметки подъема воды для места нахождения информатора. Указанная технология с увеличением числа информаторов, расположенных в разных точках на местности, и при наличии цифровой модели территории позволит оперативно оценить границы зоны затопления, которая впоследствии может быть уточнена с использованием методов дистанционного зондирования и фотограмметрии, а также позволит минимизировать время принятия решения на выполнение спасательной операции.

Ключевые слова: катастрофическое затопление, зона затопления, водоток, береговая линия, зона водосбора, матрица стока, моделирование, цифровая модель, обстановка, АИУС РСЧС

Благодарности: Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-087 от 18.12.2019).

Для цитирования: Угаров А. Н., Сидельская Е. А., Ларионов В. И. Оценка обстановки в зоне паводка методом компьютерного моделирования на основе фрагментарных данных о фактах затопления объектов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134), С. 147-164. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-147-164>.

Original article

SITUATION ASSESSMENT IN FLOOD ZONE VIA COMPUTER SIMULATION METHOD BASED ON FRAGMENTARY DATA ON FLOODED OBJECTS

Alexander N. Ugarov¹, Elena A. Sidelskaya², Valeriy I. Larionov³

^{1, 3}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Extreme Situations Research Center, Moscow, Russia

¹garo-1@yandex.ru

²helena2477@mail.ru

³lar@esrc.ru

Corresponding author: **Alexander N. Ugarov**, garo-1@yandex.ru

Abstract. The territory of Russian Federation as one of the most water resourced country in the world contains more than 20% of the world's freshwater capacity. Moreover, the increase in emergencies due to floods has become the crucial problem that requires special attention from the government. Complicated hydro-economic situation is developing in Primorski krai, Khabarovsk krai, Sakhalin and Amur regions, Transbaikali, Middle and Southern Urals, Lower Volga, North Caucasus, Krasnodar krai, Western and Eastern Siberia. Visualization of the hydrological situation in large rivers basins via GIS technologies in modern conditions with ever-growing safety requirements is time-consuming, multi-level task. It usually requires separate approach to rivers and even river reaches as the zones of maximum flood flow (flooding) are modelled for watercourses (stream segments) flooded at high waters, freshets, hanging dams and surges, and at the admission of freshets in the lower levels of water-engineering systems, etc. Existing simulation procedures and software tools for situation assessment in the flood zone do not always allow to obtain the satisfactory result to fully estimate the degree of risk, and do not suggest real-time problem solution for the assessment of the catastrophic floods consequences.

The article shows the possibilities for performing real-time situation assessment in the flood zone based on data from individual telephone messages from victims and observers (informants). The algorithm for flood zone simulation is proposed. Its distinctive feature is that after determining the location of data source (correspondent) it is possible to form drainage line based on the analysis of spatial data using geographic information systems. This line connects the informant's location with the watercourse axis that is the major source of danger. The message text or the photo of the place determines the coordinates and the flood depth as well as the absolute water elevation at this point via the digital terrain model. The indicated mark refers to the whole drainage line and its watercourse. Points that height is less than the calculated value of the absolute water rise for the location of the informant are defined as flooded. This technology with increased number of informants located at different points in the field and with the presence of digital model of the territory will allow us to estimate quickly the boundaries of the flood zone that can later be clarified via remote sensing and photogrammetry methods and will also minimize the decision time for the rescue operation.

Keywords: catastrophic flood, flood zone, watercourse, coastline, drainage basin, drain matrix, simulation, digital model, background, AIMS RSChS

Acknowledgments: The work was carried out at the Moscow State Technical University. N. E. Bauman with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-11-2019-087 of 12/18/2019).

For citation: Ugarov A. N., Sidelskaya E. A., Larionov V. I. Otsenka obstanovki v zone pavodka metodom komp'yuternogo modelirovaniya na osnove fragmentarnykh dannykh o faktakh zatopleniya ob'yektov . [Situation Assessment in Flood Zone via Computer Simulation Method Based on Fragmentary Data on Flooded Objects]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2021, Issue 6 (134), pp. 147-164. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-147-164>.

Введение

В настоящее время отмечается увеличение числа природных и техногенных катастроф, и, несмотря на проведение превентивных мероприятий по обеспечению безопасности и применение разнообразных подходов к оценке обстановки, не снижается ущерб от чрезвычайных ситуаций [1, 2]. Например, на реках России ежегодно происходят наводнения, многие из них со значительным ущербом для страны [1].

Так, Главное управление МЧС России по Иркутской области сообщает о том, что в результате прохождения двух волн паводка с 25-30 июня и с 27-30 июля 2019 г. в 135 населенных пунктах подтопленными оказались 10 890 жилых домов. В них проживали 47 175 человек, в том числе 7 921 ребенок [3]. При столь значимом числе пострадавших вполне могли возникнуть жертвы среди населения, как это произошло в ночь с 6 на 7 июля 2012 г. в Краснодарском крае. По данным прокуратуры, паводок в городах Геленджик, Крымск и Новороссийск привел к гибели многих жителей (погибли 168 человек и двое пропали без вести) [4].

Для повышения качества решения, принимаемого на начальной стадии спасательной операции при наводнениях, необходима оперативная оценка обстановки в зоне паводка. Обследование территории с использованием различных транспортных средств, а также сбор информации об обширных зонах затопления и их текущем состоянии требует времени. В отдельных случаях время оценки

обстановки может исчисляться сутками. Однако исследования показывают, что продолжительность жизни человека, оказавшегося в воде, зависит от температуры окружающей среды [1]. При положительных температурах пребывание пострадавшего в воде более одного часа характеризуется высокой вероятностью его гибели. Чем ниже температура, тем выше вероятность гибели человека (таблица 1). Из этого следует, что мероприятия по спасению людей, попавших в воду, необходимо вести в сроки, не превышающие период времени, после которого могут наступить опасные для жизни физиологические изменения в организме, обусловленные его пребыванием в воде.

Благодаря развитию современных технологий, в том числе средств сотовой связи, которые имеются у подавляющего большинства населения, стало возможным повысить оперативность целенаправленных действий. Время сокращается на этапе оценки обстановки, сформированной на основе компьютерного моделирования.

Моделируется процесс затопления территории с использованием фрагментарных данных о высоте подъема воды и ее изменении, о месте и времени чрезвычайного события, получаемых от пострадавших, оказавшихся в зоне затопления. Как показывает опыт, для определения границ зоны затопления достаточно того, что корреспондент поделится геопривязанной фотографией затопленного объекта или укажет адрес места затопления, сопровождаемого оценкой глубины.

Таблица 1. Время (в ч) наступления физиологических изменений в организме пострадавших, находящихся в воде

Table 1. Time (in hours) of physiological changes in victims in the water

Изменения в организме человека	Температура воды, °C					
	0	+ 10	+ 15	+ 20	+ 25	+ 30
Потеря сознания	0,25	0,5-1,9	2-4	3-7	12	70
Смерть	0,25-1	1-2	6-8	10-15	20-30	72-75

Доступ к сообщениям пострадавших обеспечивается с помощью автоматизированной информационно-управляющей системы РСЧС (АИУС РСЧС) [5, 6]. Оценку обстановки в зоне паводка можно проводить сразу после поступления первых сообщений, например от службы спасения 112, в Центр управления в кризисных ситуациях (ЦУКС) Главного управления МЧС России по субъекту Федерации.

*Общие методические подходы
к моделированию зоны затопления*

Население, попавшее в зону наводнения, производя съемку события и размещая снимки в сети, может оказать службам быстрого реагирования МЧС России значимую помощь при оценке сложившейся обстановки. С применением снимка, полученного с места события, и цифровой модели территории, в которой рельеф местности представлен регулярной сеткой высот (матрицей), можно определить абсолютную отметку и глубину затопления, что дает возможность на следующем шаге спрогнозировать границы затопленной территории.

Поскольку катастрофические события происходят сравнительно редко, необходимо готовиться к ним заблаговременно с тем, чтобы сократить время оперативной оценки обстановки в паводок.

Основной отличительной особенностью предлагаемого алгоритма расчета

параметров обстановки в зоне паводка является разделение вычислительных операций на две группы. К *первой группе* относятся такие расчеты, которые можно выполнить заблаговременно и которые требуют значительных вычислительных ресурсов (цифровое моделирование местности, ее рельефа, речного и поверхностного стока и т.п.). Ко *второй группе* – операции завершающей стадии моделирования и оценки параметров обстановки, требующие минимальных затрат вычислительных ресурсов. Особенность цифрового моделирования при этом заключается в выделении так называемых паводкоопасных участков, для каждого из которых с помощью специального программного обеспечения заблаговременно подготавливаются наборы цифровых данных, необходимых для построения зон затопления методами математического моделирования.

Поверхностный и речной сток в АИУС РСЧС моделируется повсеместно [1, 5, 6]. При этом точность и детальность цифровой модели для паводкоопасных участков выше, чем для остальной территории. Участки привязаны как к водосборам и местам, подверженным затоплениям от различных причин, так и к объектам, которым может быть нанесен значительный ущерб. В окрестности этих уязвимых объектов модель создается с максимальной точностью.

Задача оперативной оценки границ зоны затопления относится к завершающей стадии моделирования (*вторая группа*

вычислительных операций) и решается в пределах каждого паводкоопасного участка отдельно.

Построение зоны затопления территорий

Для решения задачи построения зоны затопления выполняются следующие действия.

1. Определение высоты подъема воды в створах, расположенных в пределах участка. В рассматриваемом случае оценка производится по текстовым или визуальным данным, получаемым службой 112 и/или из сообщений, которые пострадавшие размещают в сети интернет. Сообщение включает данные, сводящиеся специальной обработкой к набору координат и глубины затопления в точке.

На рисунке 1 представлен вариант сообщения информатора с геопривязанной фотографией объекта, по которой возможно оценить глубину затопления. (Поскольку видно, что полностью затоплена цокольная часть дома, то можно предположить, что глубина

воды в указанном месте приблизительно равна 1 м.)

Оператор АИУС РСЧС может прочитать геотег (в пер. *geo* – земля, *tag* – метка), в содержание которого входят географические координаты (широта и долгота) съемки, отыскать на карте затопленное здание, уточнить полученные координаты, а также определить высоту места при помощи программных средств (картографического блока) АИУС РСЧС и рассчитать высоту подъема воды в створе реки, прибавив к высоте места глубину затопления (рисунок 1).

Далее осуществляется поиск указанного створа методом построения линии стока с использованием цифровой модели рельефа местности.

2. Построение линии стока, связывающей точку с известной глубиной и точку береговой линии реки – источника паводковой опасности (рисунок 2). (1 – линия стока, 2 – цепочка элементов дискретизации пространства стока; вода стекает из точки с известной глубиной в точку береговой линии реки, где заканчивается сток.)

Рисунок 1. Пример геопривязанной фотографии объекта (Автор фотографии *Кирилл Шипицин*, ТАСС; <https://www.bfm.ru/news/418344>.)

Figure 1. Example of geo-linked object photo (photographer *Kirill Shipitsin*, TASS; <https://www.bfm.ru/news/418344>.)

A – точка с известной глубиной;
1 – линия стока;
2 – элементы дискретизации пространства стока

A – point with known depth;
1 – drainage line;
2 – bins of drainage area

Рисунок 2. Линия стока
Figure 2. Drainage line

Для повышения скорости построения линии стока строится матрица стока. В ней указывается связь каждого элемента дискретизации ($i_A; j_A$) поверхности стока с одним из элементов ($i_B; j_B$), через который проходит береговая линия и ось водотока (здесь A – точка с известной глубиной / точка наблюдения; B – точка пересечения линии стока и береговой линии).

Матрица стока строится заблаговременно (*первая группа вычислительных операций*). При наличии такой матрицы построение линии стока сводится к определению номера элемента, из которого сток начинается. Номер определяется по координатам точки с известной глубиной.

Соответственный номер элемента дискретизации на береговой линии и оси водотока выбирается из матрицы стока, построенной заблаговременно.

Скорость выполнения такой операции очень высока, так как не требует затрат на перебор вариантов прохождения линии стока.

3. Определение высоты подъема воды в створе реки. Для этого сравниваются абсолютные высоты элементов дискретизации в точке B на береговой линии реки и в точке A с известной глубиной затопления, затем к разнице высот указанных элементов, расположенных на различных концах линии стока, прибавляют глубину затопления, полученную из сообщения.

На рисунке 3 показан пример вычислений абсолютной высоты подъема воды для элемента дискретизации на береговой линии реки и величины прироста уровня воды. Точка наблюдения A , из которой получена информация о глубине затопления, имеет фиксированные координаты $(i_A; j_A)$ и абсолютную высоту Z_A , полученную по координатам $(i_A; j_A)$ из цифровой модели паводкоопасного участка (например, $Z_A = 224,3$ м).

Абсолютная высота поверхности высокой воды определяется путем прибавления к высоте Z_A точки наблюдения, отмеченной на территории глубины ΔZ_A , которая принята равной в рассматриваемом случае 1 м:

$$H_A = Z_A + \Delta Z_A = 224,3 + 1 = 225,3 \text{ м.} \quad (1)$$

По номеру (i_A, j_A) элемента, соответствующего точке A , из матрицы стока выбирается точка B с координатами (i_B, j_B) , расположенная на пересечении линий берега и стока. Абсолютная высота Z_B точки B получена по координатам (i_B, j_B) из цифровой модели паводкоопасного участка (например, $Z_B = 219,5$ м). Абсолютная высота H_B поверхности воды в точке B при ее подъеме равна H_A , то есть $H_B = H_A = 225,3$ м, поскольку эти точки лежат на одной линии стока AB , а вода во время паводка поднимается по этой линии.

A – точка наблюдения;
 B – точка пересечения линии стока и береговой линии;
 AB – линия стока

A – observation point;
 B – overlap point of drainage line and coastline;
 AB – drainage line

Рисунок 3. Данные для вычисления высоты (м) подъема воды в створе
Figure 3. Data for water rise height calculation (m) in dam site

Высота Δ_{ZB} подъема воды в точке B определяется формулой

$$\Delta_{ZB} = H_B - Z_B = 225,3 - 219,5 = 5,8 \text{ м.} \quad (2)$$

Таким образом определяется высота Δ_{ZB} подъема воды в створе реки, проходящем через точку B и элемент дискретизации (i_B, j_B) , расположенный на береговой линии и связанный линией стока с местом, где глубина затопления известна.

4. Построение зоны (карты) затопления.

На рисунке 4 представлен фрагмент карты, построенной с использованием картографического блока АИУС РСЧС.

В качестве исходных данных для построения карты были использованы значения высот $H_B = 225,3$ м и $\Delta_{ZB} = 5,8$ м, полученные в (1) и (2). Следует отметить, что сообщений и, соответственно, значений высоты подъема воды может быть довольно много (рисунок 5).

A – точка наблюдения;
 B – точка пересечения линии стока и береговой линии;
 AB – линия стока

A – observation point;
 B – overlap point of drainage line and coastline;
 AB – drainage line

Рисунок 4. Зона затопления (фрагмент карты)
Figure 4. Flood zone (map tile)

Рисунок 5. Множество точек 1, 2, ..., 7 с известной высотой затопления территории
Figure 5. Various points 1, 2, ..., 7 with known flood height

5. Уточнение границ зон затопления.
При большом числе сообщений с информацией о глубинах затопления границы зоны затопления уточняются путем отбрасывания грубо измеренных значений.

Увеличение числа точек (на рисунке 5 для примера показано 7 точек) с известной высотой затопления, несмотря на их возможную избыточность, позволяет при их корректной обработке повысить точность окончательной оценки уровня воды в пределах паводкоопасного участка.

Корректность обработки заключается в отбрасывании заведомо ошибочных значений высоты подъема и в специальном усреднении их с учетом свойств водной поверхности реки. Условием отбрасывания измеренных значений является выход высоты за определенные

пределы, установленные для паводкоопасного участка по многолетним наблюдениям уровня воды на гидропостах и методом моделирования различных сценариев затопления. Моделирование сценариев с разной обеспеченностью осуществляется заблаговременно. Это позволяет сократить время оценки высоты подъема воды на этапе исключения грубых ошибок.

На рисунке 6 представлены профили, соответствующие событиям с различной обеспеченностью (уровни построены для участка реки, представленного на рисунке 5), на рисунке 7 – соответственные указанным уровням зоны возможного затопления, полученные заблаговременно методом моделирования (границы соответствуют уровням, представленным на рисунке 6).

6. Уточнение границ зон затопления методом сглаживания линии продольного профиля участка реки в пределах паводкоопасного участка. Для сглаживания высот осуществляется построение профилей воды вдоль осевой линии реки в пределах паводкоопасного участка. Текущий профиль строится по измерениям абсолютных высот подъема воды в точках наблюдения 1, 2, ..., 7, привязанным к различным створам (рисунки 5 и 7). Из-за ошибок в описании рельефа местности и в измерениях глубины затопления профиль уровней воды вдоль оси реки получается пилообразным. Алгоритм определения высоты подъема воды предусматривает его сглаживание (рисунок 8). Сглаживание производится построением аппроксимирующей профиль линии, параллельной поверхности воды в межень. Перед сглаживанием из множества измерений высоты подъема воды удаляются грубо измеренные значения (промахи). На рисунке 8 показан створ, располо-

женный на удалении 3500 м от входного створа в русло паводкоопасного участка. В рассматриваемом примере максимальное отклонение результатов измерений 1 от сглаженных значений 2 не превышает 1 м. Значения высот H , выходящие за пределы интервала (219,48; 227,48), отбрасываются (рисунок 6). После получения сглаженных значений высоты подъема воды в створах осуществляется построение уточненной зоны затопления. При разработке алгоритма построения зон фактического затопления местности при разливах рек учитывалась необходимость обеспечения высокой скорости отображения их на карте. Поэтому за прототип был выбран алгоритм, основанный на оценке подъема воды вдоль линии стока [1, 7, 8]. Правдоподобие процесса затопления и модели, его реализующей, достигалось за счет выполнения ряда ограничений и условий (см. подробно в пунктах 1, 2, 3 алгоритма).

Рисунок 6. Уровни воды, рассматриваемые на этапе отбора измерений
Figure 6. Water levels considered at the sampling stage

× – осевая линия водотока;
Точки 1, 2, ..., 7 – точки с известной высотой затопления территории;
1 – межень; 2 – паводок с обеспеченностью 20 %;
3 – паводок с обеспеченностью 10 %; 4 – паводок с обеспеченностью 1 %

× – watercourse center line;
Points 1, 2, ..., 7 – points with known flood height;
1 – baseflow; 2 – freshet with 20 % endowment;
3 – freshet with 10 % endowment; 4 – freshet with 1 % endowment

Рисунок 7. Границы возможных зон затопления с различной обеспеченностью

Figure 7. Boundaries of possible flooding zones with different endowments

Рисунок 8. Результаты оценки высоты подъема воды в створах и результат их сглаживания

Figure 8. Results of water rise height assessment in dam sites and result of their smoothing

*Оптимизация алгоритма построения зоны
затопления*

Рассмотрим некоторые возможности, которые позволят сократить временные затраты на реализацию алгоритма.

1. Заблаговременный выбор траектории движения воды по поверхности. При стекании по поверхности вода движется в направлении наибольшей крутизны ската под уклон. Участки рельефа с нарушенной монотонностью изменения высот (локальные углубления), встречающиеся на пути движения воды, заполняются, поднимая отметку поверхности стекания, восстанавливая ее монотонность. При подъеме уровня воды движение осуществляется по той же траектории, что и при ее стоке, только в обратном направлении.

2. Ограничение пространства моделирования границами паводкоопасного участка. Условие обеспечивает принадлежность всех точек участка водосбору отрезка реки, заключенного между створами, совпадающими с границами паводкоопасного участка. Принадлежность точек водосбору обеспечивает построение для каждой из них заблаговременной траектории движения воды по поверхности.

3. Дискретизация пространства моделирования. Траектория движения воды представляет собой цепочку элементов дискретизации, через которые проходит след движения воды при стоке. Для построения зоны затопления нужны два элемента этой цепочки, один из которых попадает на береговую линию, другой – на сушу. Сравнивая значение уровня воды в створе элемента, расположенного на берегу, с высотой элемента на суше можно сделать вывод о факте и глубине затопления.

Существенно сократить время построения зоны затопления можно путем заблаговременного выполнения группы трудоемких операций (функций). К таким функциям относится построение структуры, которая устанавливает связь дискретных точек поверхности, описывающей рельеф местности, с точ-

ками береговой линии (матрица стока). Кроме того, ускорить решение задачи построения зоны затопления можно при сокращении области моделирования. Сокращение производится за счет наложения построенных заблаговременно зон затопления (рисунок 7) с разной обеспеченностью на пространство паводкоопасного участка. Выбор зоны моделирования осуществляется в соответствии с величиной подъема воды, вычисленной по результатам обработки сообщений о затоплении.

4. Ограничение зоны моделирования. Зона ограничивается по результатам вычислений уровня подъема воды, выполненных с использованием сообщений о затоплении. В результате получается область затопления. На рисунке 9 для примера показана зона затопления, построенная по результатам измерения глубин в точках 1, 2, ..., 7.

Для оценки эффективности мер, направленных на сокращение времени построения зон затопления, был выполнен расчетный эксперимент и проведена оценка временной и вычислительной сложности предлагаемого алгоритма. В качестве показателя использовалась асимптотическая оценка числа операций, которые необходимо выполнить для получения результата. Зависимость получена для квадратной матрицы рельефа ($N \times M$), где N – число строк и столбцов матрицы рельефа.

На первом этапе (заблаговременные вычисления) выполняется построение матрицы стока по алгоритму, который имеет один цикл по числу элементов в матрице рельефа ($N \times M$), в пределах которой осуществляются восемь операций сравнения и одна операция присваивания (всего 9) для всех элементов матрицы ($N \times M$).

С учетом этого сложность алгоритма построения матрицы стока составляет $\Omega_1 = 9 \cdot M^2$.

Алгоритм построения матрицы глубин имеет два цикла (внешний и внутренний). Число шагов внешнего цикла определяется числом записей в матрице стока и в данном примере не превосходит M^2 .

- × – осевая линия водотока;
1, 2, ..., 7 – точки с известной высотой затопления территории
- × – watercourse center line;
1, 2, ..., 7 – points with known flood height

Рисунок 9. Зона затопления
Figure 9. Flood zone

Число шагов вложенного цикла зависит от количества элементов, через которые проходит линия стока, и в данном случае не превышает N . Внутри вложенного цикла выполняются одна операция разности и одна операция присваивания (всего 2), следовательно, суммарное число операций $\Omega_2 = 2 \cdot N^3$.

Вычислительная сложность алгоритма построения зон затопления определяется формулой $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 = 9 \cdot N^4 + 2 \cdot N^3$.

Очевидно, что общее число операций алгоритма и число операций на каждом из этапов в отдельности (построение матриц

стока и глубин) зависят от размерности исходной матрицы высот, т. е. вычислительная сложность алгоритма определяется протяженностью паводкоопасного участка, выраженной в шагах дискретизации пространства моделирования.

Двухэтапный подход к моделированию процесса затопления (один из этапов выполняется заблаговременно, другой – в оперативном режиме) позволяет сократить сложность расчетов, выполняемых в оперативном режиме, в U раз:

$$U = (9 \cdot N^4 + 2 \cdot N^3) / 2 \cdot N^3;$$

$$U = 4,5 \cdot N + 1. \quad (3)$$

Здесь U – кратность снижения числа операций при реализации двухэтапного алгоритма по сравнению с одноэтапным вариантом его реализации.

Как следует из (3), кратность снижения общего числа операций U , благодаря организации двух этапов в расчетах глубин в зоне затопления, более чем в 4 раза превосходит число элементов дискретизации N . Для экспериментальной оценки времени, необходимого для формирования матрицы глубин, использованы данные о площади затопляемой территории водосбора среднего Амура в 2013 г. [9].

Для моделирования зон затопления был использован компьютер со следующими характеристиками:

1) процессор Intel Core i7-3770 (число операций в секунду определялось экспериментально с использованием тестов);

2) оперативная память объемом не менее 32 Гбайт;

3) внешняя память – диск (SEAGATE Exos ST4000NM0035 4T6 SATA III).

Важно отметить, что выявленная ранее зависимость времени необходимого расчета от размера паводкоопасного участка (параметра N) – кубическая. Это значит, что показатель затрат времени t на расчет изменяется достаточно быстро. На рисунке 10 представлены экспериментальные данные, полученные в результате замеров времени, и их аппроксимация кубической параболой (на рисунке 10 показаны 1 – ломаная линия, соединяющая точки замеров времени t , необходимого на выполнение расчета зон затопления, 2 – аппроксимация замеров кубической параболой.)

Рисунок 10. Экспериментальные данные по оценке затрат времени на построение зоны затопления

Figure 10. Experimental data on the estimation of the time spent on the flood zone construction

Время построения зоны затопления определяется длиной участка $L = N \cdot \delta$ (где δ – шаг дискретизации, например $\delta = 0,025$ км; N – число элементов), которая может быть подобрана с учетом требований к оперативности прогноза обстановки.

Для участка длиной $L = 25$ км на расчет потребуется не более 4 с, длиной $L = 100$ км – не более 4 мин. Опыт применения АИУС РСЧС показывает, что длина паводкоопасных участков по руслу реки колеблется в пределах от 10 до 25 км, следовательно, время расчета зоны затопления не превышает 4 с.

Обсуждение результатов

Сокращение времени, необходимого для принятия решения о выполнении неотложных спасательных и восстановительных работ руководителями в паводок, возможно благодаря применению средств автоматизации, таких как АИУС РСЧС.

Предложенный метод моделирования позволяет построить зоны затопления по любому сколь угодно малому набору фрагментарных данных об обстановке, в том числе по информации, извлеченной из сообщений пострадавших, попавших в зону затопления. Проведение расчетных экспериментов показало, что при выполнении минимальных требований к полноте, точности и достоверности сообщений полученные зоны затопления будут приемлемого качества. Точность моделирования растет по мере поступления новых сообщений.

Применяемые методы отбора достоверных сообщений в данном случае позволяют избежать ошибок, выходящих за пределы зон, заданных своей обеспеченностью. В дальнейшем эти методы должны совершенствоваться с привлечением знаний об особенностях территории, вносимых в базу данных, содержащую параметризованные описания произошедших ранее событий и их причин.

Деление расчетного процесса на две стадии и оптимизация размеров паводкоопасных участков позволила резко сократить

затраты времени на расчет зон затопления в финальной стадии оценки обстановки. Например, для участка длиной 25 км при шаге дискретизации поверхности стока 25 м на построение потребуется не более 4 с.

Полученная оценка затрат времени является верхней границей. Реальные затраты меньше за счет исключения из процесса расчета тех элементов дискретизации, которые не могут быть затоплены при заданных значениях обеспеченности события.

Высокая скорость реакции модели на изменение входных параметров делает работу оператора АИУС РСЧС эффективной. Однако при этом повышаются трудозатраты специалистов-картографов, привлекаемых к созданию моделей паводкоопасных участков.

Выводы

Данная работа направлена на снижение возможного ущерба за счет сокращения времени на принятие решений при проведении неотложных спасательных и восстановительных работ в зоне затопления. Поставленная задача была решена за счет ускорения оценки обстановки, в частности, на этапе построения зоны затопления программными средствами АИУС РСЧС. Для этого предложен алгоритм моделирования паводка, позволяющий построить зоны по различным фрагментарным сообщениям о месте и наблюдаемых глубинах. Использование таких сообщений позволяет начать процесс оценки обстановки сразу после получения первых сообщений. Алгоритм моделирования позволяет увеличить точность параметров паводка, по мере роста числа обработанных сообщений.

Возможность успешного усреднения многочисленных измерений достигается за счет применения многоступенчатой процедуры браковки недостоверных данных. При этом используются данные о многолетних наблюдениях за уровнем и границы зон затопления, построенные для сценариев с различной обеспеченностью.

В целях минимизации времени зоны затопления строятся только в пределах

участков, на которых расположены уязвимые к паводку объекты, для которых формируется детальная цифровая модель местности. Кроме того, оптимальным для моделирования по размерам является участок протяженностью до 25 км, поскольку время отображения обстановки в его пределах составляет единицы секунд.

Следующим успешным мероприятием, позволившим сократить время построения и отображения зон затопления, является выделение вычислительных операций, которые могут быть выполнены заблаговременно до начала оперативной работы, и расчетов фи-

нальной стадии моделирования. К таким операциям отнесено моделирование поверхности и построение матрицы стока. Это позволяет понизить зависимость времени выполнения операций на завершающей стадии моделирования от размеров участка с четвертой до третьей степени.

Таким образом, применение всех перечисленных мероприятий позволяет успешно и оперативно решать задачу оценки обстановки в зоне паводка методом компьютерного моделирования на основе фрагментарных данных о фактах затопления объектов.

Список источников

1. Александров А.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Анализ и управление техногенными и природными рисками. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 357 с.
2. Воробьев Ю.П., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2003. 352 с.
3. Сводка ЧС ГУ МЧС России по Иркутской области на 6-00 28.08.2021 // ГУ МЧС России по Иркутской области. 28.08.2021. URL: <https://38.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informatsiya/svodka-chs-i-proisshestviy/4547756> (дата обращения: 17.09.2021).
4. Десять самых масштабных наводнений в России в 1993-2013 годах // РИА Новости. 26.09.2013. URL: <https://ria.ru/20130926/966016499.html> (дата обращения: 14.09.2021).
5. Измалков В.А. Развитие АИУС РСЧС как динамической автоматизированной системы // Технологии гражданской безопасности. 2017. Т. 14. № 2 (52). С. 26-31.
6. Качанов С.А., Агеев С.В., Ковтун О.Б., Свентская Н.В., Чернов В.М., Лукина Ю.С. Основные направления развития информационного обеспечения автоматизированной информационно-управляющей системы (АИУС) единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) // Технологии гражданской безопасности. 2015. Т. 12. № 2 (44). С. 8-12.
7. Волчек А.А., Петров Д.О., Костюк Д.А. Алгоритм вычисления границ области затопления для речной сети с моделированием распространения воды по растровому представлению рельефа // Доклады БГУИР. 2016. № 5 (99). С. 73-78.
8. Балдаков Н.А., Ловцкая О.В. Способы визуализации результатов расчета зон затопления пойменных территорий средствами ГИС // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1. № 4. С. 267-274.
9. Мы и амурские наводнения: невыученный

References

1. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. *Analiz i upravlenie tekhnogennymi i prirodnymi riskami* [Analysis and Management of Man-Made and Natural Risks]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2019. 357 p. [in Russian].
2. Vorobev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Katastroficheskie navodneniya nachala KhKhI veka: uroki i vyvody* [Catastrophic Floods of the Early XXI Century: Lessons and Conclusions]. Moscow, DEKS-PRESS Publ., 2003. 352 p. [in Russian].
3. Svodka ChS GU MChS Rossii po Irkutskoi oblasti na 6-00 28.08.2021 [Emergency Summary of the Main Directorate of the Ministry of Emergencies of Russia in the Irkutsk Region at 6-00 28.08.2021]. *GU MChS Rossii po Irkutskoi oblasti*. 28.08.2021. Available at: <https://38.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informatsiya/svodka-chs-i-proisshestviy/4547756> (accessed 17.09.2021). [in Russian].
4. Desyat' samykh masshtabnykh navodnenii v Rossii v 1993-2013 godakh [The ten Largest Floods in Russia in 1993-2013]. *RIA Novosti*. 26.09.2013. Available at: <https://ria.ru/20130926/966016499.html> (accessed 14.09.2021). [in Russian].
5. Izmal'kov V.A. Razvitiye AIUS RSChS kak dinamicheskoi avtomatizirovannoi sistemy [Development of AIUS RSCHS as a Dynamic Automated System]. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti - Civil Security Technology*, 2017, Vol. 14, No. 2 (52), pp. 26-31. [in Russian].
6. Kachanov S.A., Ageev S.V., Kovtun O.B., Svetskaya N.V., Chernov V.M., Lukina Yu.S. Osnovnye napravleniya razvitiya informatsionnogo obespecheniya avtomatizirovannoi informatsionno-upravlyayushchei sistemy (AIUS) edinoy gosudarstvennoi sistemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsii (RSChS) [The Main Directions of Development of the Information Security of Automated Information Management System of the Unified State System of Prevention and Liquidation of Emer-

урок? / Под ред. А.В. Шаликовского. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2016. 216 с.

gency Situations]. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti - Civil Security Technology*, 2015, Vol. 12, No. 2 (44), pp. 8-12. [in Russian].

7. Volchek A.A., Petrov D.O., Kostyuk D.A. Algoritmy vychisleniya granits oblasti zatopleniya dlya rechnoi seti s modelirovaniem rasprostraneniya vody po rastrovomu predstavleniyu rel'efa [Algorithm for the Flood Inundation Zone Boundaries for the River Network Based on Water Spread over the Raster Terrain Model]. *Doklady BGUIR - Doklady BGUIR*, 2016, No. 5 (99), pp. 73-78. [in Russian].

8. Baldakov N.A., Lovtskaya O.V. Sposoby vizualizatsii rezul'tatov rascheta zon zatopleniya poimennykh territorii sredstvami GIS [Methods for Visualization of Hydrological Study of Flood Zones on Floodplains Using Gis-Techniques]. *Interexpo GEO-Siberia*, 2018, Vol. 1, No. 4, pp. 267-274. [in Russian].

9. *Мы и амурские наводнения: невыученный урок?* [We and the Amur Floods: an Unlearned Lesson?]. Ed. by A.V. Shalikovskogo. Moscow, Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF) Publ., 2016. 216 p. [in Russian].

Информация об авторах

• Угаров Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность»
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5
e-mail: garo-1@yandex.ru

Information about the authors

• Ugarov Alexander N., Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Bauman Moscow State Technical University
Assistant Professor of Ecology and Industrial Safety Department
5, Vtoraya Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
e-mail: garo-1@yandex.ru

• Сидельская Елена Анатольевна
Центр исследований экстремальных ситуаций
Начальник отдела геоинформационных технологий
Россия, 127018, Москва, ул. Складочная, 1, стр. 15
e-mail: helen2477@mail.ru

• Sidelskaya Elena A.
Extreme Situations Research Center
Head of Geoinformation Technology Department
1-15, Skladochnaya str., Moscow, 127018, Russia
e-mail: helen2477@mail.ru

• Ларионов Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Заместитель директора
Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5
e-mail: lar@esrc.ru

• Larionov Valeriy I., Doctor of Engineering Sciences, Professor
Bauman Moscow State Technical University
Deputy Director of Scientific and Educational Center for Study of Extreme Situations
5, Vtoraya Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation
e-mail: lar@esrc.ru

Статья поступила в редакцию 12.10.2021; одобрена после рецензирования 21.10.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 12.10.2021; approved after reviewing 21.10.2021; accepted for publication 01.11.2021.