

**Моделирование весеннего паводка в пойме р. Вятки на территории размещения объектов Кирово-Чепецкого отделения ФГУП «РосРАО»**© 2014. Г. Я. Кантор<sup>1,2</sup>, к.т.н, с.н.с.,Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д.т.н., зав. лабораторией, зав. кафедрой,<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,<sup>2</sup>Вятский государственный гуманитарный университет,  
e-mail: ecolab2@gmail.com

Разработана динамическая гидрологическая модель паводковой ситуации в пойме р. Вятки на территории размещения объектов Кирово-Чепецкого отделения филиала «Приволжский территориальный округ» ФГУП «РосРАО» (КЧО РосРАО), в основу которой положены эффективные алгоритмы построения цифровых моделей рельефа и методы физического моделирования перераспределения водных потоков под действием сил гравитации. Данная модель позволяет адекватно отображать динамику весеннего половодья, что даёт возможность её использования для прогнозирования характера затопления территории при различных уровнях подъёма воды.

Совершенствование модели может обеспечиваться расширением перечня факторов, оказывающих влияние на ход гидродинамических процессов (природное и техногенное изменение рельефа, растительность, механические и гидрофизические свойства грунтов и т. д.).

Предложенная модель может использоваться в системах оперативного мониторинга паводкоопасных территорий для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций и планирования реабилитационных мероприятий.

A dynamic hydrological model of flood was developed in the floodplain of the Vyatka River on the territory of Kirovo-Chepetsk branch of "Volga Territorial District" FSUE "RosRAO" (KCB of RosRAO). It is based on the efficient algorithms for constructing digital terrain models and methods of physical modeling of gravity water flows redistribution. This model allows us to adequately reflect the dynamics of spring floods, which enables to predict the character of flooding the area at different levels of water rising.

The model's improvement can be achieved by means of enlarging the list of factors influencing the hydrodynamic processes (natural and man-made change in topography, vegetation, mechanical and hydro-physical properties of soils, etc.).

The proposed model can be used in operational monitoring of flood-prone territories in order to prevent emergencies and to plan the rehabilitation.

**Ключевые слова:** гидрологическая модель, весеннее половодье, цифровая модель рельефа местности, гидроморфологическая характеристика, паводкоопасные территории.

**Keywords:** hydrological model, spring flood, digital model of the terrain, hydromorphological characteristics, flood-prone territory.

На Кирово-Чепецком химическом комбинате (КЧХК) в г. Кирово-Чепецке Кировской области на берегу реки Вятки, в 20 км от водозабора, обеспечивающего хозяйственно-питьевое водоснабжение населения областного центра г. Кирова, десятки лет функционировало радиохимическое производство по переработке фторидов урана. В результате его деятельности радиационному загрязнению подверглось около 70 га территорий, накопилось и хранится большое количество радиоактивных химических отходов с общей активностью 3 400 Ки. Наибольшую опасность представляют радиоактивные элементы Pu-239, U-238, Cs-137, Sr-90 и другие, обладающие большими периодами полураспада [1–3].

Территории, занятые объектами размещения отходов, располагаются на высокой пойме

и первой надпойменной террасе р. Вятки. Объекты размещения радиоактивных и химических отходов находятся в черте г. Кирово-Чепецка, на расстоянии 2-3 км от жилой зоны, где проживает 88 тыс. населения. Расстояние от промплощадки и мест размещения радиоактивных отходов до р. Вятки составляет от 2,0 до 4,0 км [3, 4].

Необходимость разработки гидрологической модели обусловлена тем, что левобережная пойма р. Вятки, расположенная ниже по течению от г. Кирово-Чепецка и его крупного промышленного комплекса, является одной из паводкоопасных территорий, которая затопляется ежегодно. Источниками экологической опасности на этой территории являются хранилища токсичных и радиоактивных отходов бывшего Кирово-Чепецкого химического ком-

бината, расположенные в непосредственной близости от затапливаемой территории [4, 5].

На данной территории имеется много водных объектов, среди них несколько озёр: Ивановское, Берёзовое, Просное, Глухое, цепь Бобровых озёр и другие мелкие пойменные озёра; протекают реки Просница, Елховка, Воложка. В пойме р. Вятки имеются два искусственных водоёма – карьер песчано-гравийной смеси у Завода минеральных удобрений (ОАО «ЗМУ КЧХК») площадью 44 га и карьер у оз. Берёзовое, а также ряд мелких обводнённых искусственных выемок и дренажных канав. Самым крупным озером на левом берегу является старичное мелководное оз. Ивановское, через которое происходит сброс сточных вод МУП ЖКХ г. Кирово-Чепецка и ТЭЦ-3. Площадь его составляет около 30 га. В юго-юго-западном направлении от него находится оз. Берёзовое. Рядом с ним расположена цепь из трёх пойменных Бобровых озёр. Эти озёра соединены временными водотоками между собой и с р. Елховкой, впадающей в оз. Просное, которое является естественным отстойником вод р. Елховки. За десятилетия деятельности КЧХК в нём накоплено около 330 тыс. м<sup>3</sup> отложений, в том числе в пределах современной акватории 118 тыс. м<sup>3</sup>, на северной задернованной части озера 212 тыс. м<sup>3</sup> [3, 4].

Типичные сроки весеннего половодья на р. Вятке в районе городов Киров и Кирово-Чепецк приходятся на 15 апреля – 15 мая. За весь период наблюдений с 1878 по 2012 г. максимальный уровень на гидрологическом посту (гидропост) г. Кирова составил 109,57 м в 1979 г., а минимальный – 105,51 м в 1996 г. В г. Кирово-Чепецке за период наблюдений с 1996 г. максимальный паводок наблюдался в 2002 г. (112,55 м), а минимальный – в 1996 г. (110,00 м) [5].

Обычно весенний паводок начинается с подъёма воды в юго-западной части исследуемого участка в районе устья р. Просницы, создающего подпор в оз. Просное, Глухое, р. Елховка, затапливающего понижения рельефа в пойме р. Вятки и повышая уровень воды в Бобровых озёрах. При абсолютной отметке уреза р. Вятки 105,2 м уровень воды составляет 105,8 м (оз. Просное), 105,9 м (оз. Глухое), 107,6 м (оз. Бобровое). Таким образом, подъём воды в водоёмах нижней части поймы начинается раньше, чем в верхней, но вследствие отсутствия явных препятствий для воды процесс происходит плавно, без высоких скоростей потока, не создавая угрозы резкого роста уровня загрязнения воды р. Вятки.

По мере дальнейшего повышения уровня воды в р. Вятке характер паводка существенно меняется, начинается подтопление северо-восточной части территории. Если в межень уровень воды в оз. Ивановское превышает уровень воды в р. Вятке на 3-4 м, то при подъёме воды в р. Вятке до 110 м направление течения в протоке из оз. Ивановское меняется на обратное, и начинается быстрый подъём уровня в оз. Ивановское и связанных с ним протоками водоёмах – оз. Берёзовое и соседний карьер. При повышении уровня в р. Вятке на водозаборе ООО «Энергоснабжающая организация» (ЭСО) КЧХК до 110,6–110,7 м в Балтийской системе высот (БС) вода переливается через дамбу, и пойма стремительно заливается водой, скорость которой резко возрастает по мере дальнейшего повышения уровня. На пике паводка широкий поток воды на высокой скорости накрывает оз. Берёзовое и Бобровые, в которых в период зимней межени за счёт фильтрации загрязнённых грунтовых вод накапливается значительное количество нитрата аммония [6].

Как показывают многолетние наблюдения, если перелив дамбы происходит при высокой скорости подъёма воды, то быстрый сброс загрязнённой воды с содержанием нитрата аммония до 70 г/л приводит к серьёзному повышению азотного загрязнения воды р. Вятки, причём периодически (раз в несколько лет) концентрация ионов аммония на хозяйственно-питьевом водозаборе г. Кирова на пике весеннего половодья превышает санитарные нормы ( $ПДК_{ХП} = 2 \text{ мг/дм}^3$ ). Такие ситуации с превышением ПДК по аммонiu в водоразводящей сети г. Кирова имели место в 2005 и 2010 гг.; в 2012 г. качество водопроводной воды удалось удержать в пределах нормы за счёт дополнительных мер по очистке воды на водозаборе с использованием цеолитного сорбента, хотя в воде р. Вятки небольшое превышение ПДК по аммонiu всё же проявлялось.

Главное назначение создаваемой динамической гидрологической модели – надёжное распознавание возникновения потенциально опасных ситуаций и прогнозирование их развития для превентивного принятия защитных мер – прежде всего, для предотвращения гибели людей и защиты важнейших материальных ценностей от разрушения и повреждения. Такая модель должна учитывать всю совокупность имеющихся сведений о природных, техногенных и социальных факторах, оказывающих влияние на формирование водного стока – климатические данные за

максимально доступный период наблюдений, результаты наблюдений уровня на постоянных и временных гидропостах, детальную модель рельефа местности, включающую сведения о механических свойствах подстилающих пород, их влагоёмкость и водопроницаемость, устойчивость к размыву и т.д., наличие и технические характеристики гидротехнических сооружений, механизмов регулирования водосброса, регламенты управления этими механизмами в предаварийных и критических ситуациях [5].

Создание численной модели, адекватно воспроизводящей все детали водных потоков на сложнопересечённой местности, является чрезвычайно трудоёмкой задачей, решение которой на современном этапе развития вычислительной техники требует применения высокопроизводительных мультипроцессорных вычислительных кластеров и соответствующего программного обеспечения, предварительного выполнения многолетнего ряда гидрологических измерений на всех фазах водного режима, ежегодной корректировки топоосновы модели для учёта происходящих эрозионных и аллювиальных процессов, результатов хозяйственной деятельности, исправления вновь отмеченных ошибок в исходных данных.

Имитационная динамическая модель развития паводка на исследуемой территории позволит получать количественные оценки параметров процессов, и прежде всего – распределение суммарного расхода по потокам и скорости потоков по глубине. Кроме того, моделирование позволит рассматривать гипотетические сценарии развития паводков низкой обеспеченности, уровни которых превышают исторический максимум 1979 г. Последнее важно для оценки степени риска повреждения объектов хранения радиоактивных отходов паводковыми водами, что гипотетически может привести к радиоактивному загрязнению территорий и водных объектов.

Для надёжного прогнозирования развития радиоэкологической ситуации в районе г. Кирово-Чепецка необходимо как дальнейшее совершенствование созданной геофильтрационной модели, так и создание адекватной модели поверхностного стока, которые должны и далее скоординированно развиваться в процессе будущего радиоэкологического мониторинга на территории ответственности Кирово-Чепецкого отделения РосРАО. Создаваемая динамическая гидрологическая модель позволит описывать реальные процессы

подъёма и дальнейшего спада воды на пойме р. Вятки в период весеннего половодья.

При моделировании различных вариантов затопления поймы р. Вятки в районе размещения объектов Кирово-Чепецкого отделения, выполненном в 2010 г. [5], была использована статическая модель, в которой поверхность воды считалась горизонтальной и не учитывалась скорость её движения. Такая модель, давая в целом правильное представление о характере затопления поймы, всё же показывала значительные отклонения от реальной ситуации, так как в пределах моделируемой зоны перепад уровней воды в р. Вятке составляет 1,4 м на протяжении 14 км извилистого русла. Такой подход приводит к значительной переоценке глубины затопления поймы в нижней её части в районе устьев рек Елховка и Просница. Кроме того, важнейшим недостатком статической модели является отсутствие учёта распределения скорости течения воды по акватории затопленной поймы на различных стадиях паводка, что необходимо для оценки интенсивности процессов переноса загрязняющих веществ водами р. Вятки в период весеннего половодья.

Создание динамической модели паводка является существенным уточнением модели затопления поймы в районе Кирово-Чепецкого промышленного комплекса с учётом динамических процессов перераспределения объёмов воды по элементам рельефа в зависимости от уровня воды в р. Вятке и скорости его изменения (подъёма или спада) [7].

При разработке статической модели в качестве топоосновы использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) с горизонтальным разрешением 5 м, построенная на основе топографической карты масштаба 1:10000 с учётом существенных изменений рельефа, произошедших после 1979 г. (год съёмки карты) в связи со строительством Завода минеральных удобрений. Однако для динамической модели такое разрешение оказалось слишком грубым, и для улучшения разрешения до 2,5 м был разработан специальный метод двойной сплайновой интерполяции с оптимизацией, обеспечивающий достаточно высокое качество ЦМР при высокой скорости расчёта.

Для разработки динамической модели паводка в качестве модельной зоны была выбрана квадратная площадка размером 7,5×7,5 км, покрывающая всю часть Кирово-Чепецкой поймы, на которой расположены все объекты хранения химических и радиоактивных отходов КЧХК, а также частично промплощадки

Завода минеральных удобрений и завода «ГалоПолимер». В пределах выбранной площадки находится гидропост ЭСО КЧХК, через створ которого проходит весь паводковый поток р. Вятки, а также выходные створы на реках Вятка и Просница (Воложка), собирающие всю паводковую воду с поймы, включая дополнительный приток природных и сточных вод из рек Елховка и Просница. Такая конфигурация зоны моделирования позволяет детально рассчитывать водный баланс поверхностного стока, а также проверять правильность расчётов прямыми гидрологическими измерениями (уровни на реперных участках, скорости и расходы воды, концентрации и потоки загрязняющих веществ). Географические координаты угловых точек площадки приведены в таблице 1, схема расположения модельной площадки приведена на рисунке 1 (см. цветную вкладку).

Горизонтальное пространственное разрешение модели составляет 2,5×2,5 м. В дальнейшем, по мере совершенствования алгоритмов и техники вычислений, разрешение при необходимости может быть повышено, а также могут быть расширены и географические границы зоны моделирования.

На протяжении моделируемого участка русла р. Вятки абсолютная отметка меженного уровня изменяется от 106,6 м БС (верхний створ, водозабор и гидропост ЭСО КЧХК) до 105,2 м БС (нижний створ, устье р. Просницы). Продольный профиль уреза воды р. Вятки вдоль левого берега представлен на рисунке 2.

Важнейшим фактором, определяющим весь характер паводка, является гидроморфологическая характеристика главной водной артерии – в данном случае р. Вятки. На сильно извилистом участке реки высока интенсивность процессов эрозии и аккумуляции аллювиального материала. Подробная батиметрическая съёмка русла реки в пределах модельной площадки в последние годы не проводилась. Для морфометрической характеристики реки нами использованы опубликованные и фондовые материалы с учётом известных гидрологических закономерностей. Эмпирическое соотношение расхода и уровня воды в р. Вятке в створе гидропоста ЭСО КЧХК приведено на рисунке 3.

Такого рода зависимость может быть также вычислена расчётным путём на основании полуэмпирической формулы Шези [8]:

$$h_{cp} = \left( \frac{Q \cdot n}{B \cdot \sqrt{I}} \right)^{3/5},$$

где  $h_{cp}$  – средняя глубина водного потока (м),  $Q$  – объёмный расход воды в створе ( $m^3/c$ ),  $B$  – ширина русла реки (м),  $n$  – коэффициент шероховатости русла,  $I$  – уклон водной поверхности.

Таблица 1

Координаты угловых точек площадки динамического моделирования паводка

Угол площадки	Координаты, WGS-84	
	долгота	широта
СЗ	49,86519°	58,60505°
СВ	49,99420°	58,60568°
ЮВ	49,99526°	58,53835°
ЮЗ	49,86650°	58,53773°

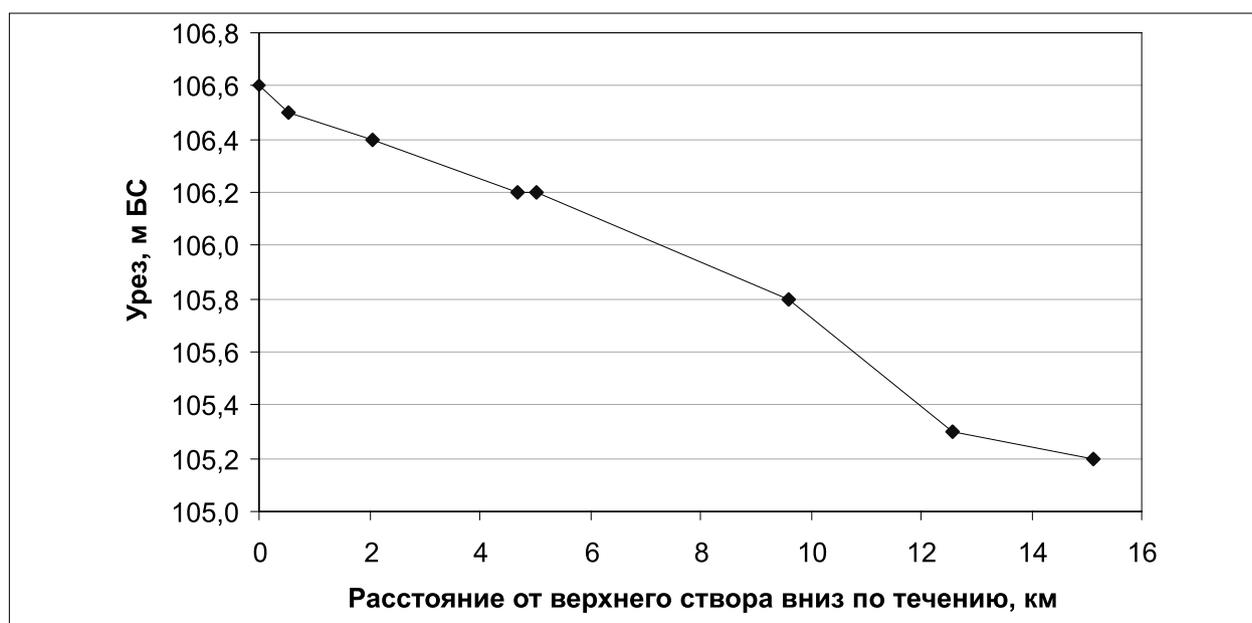


Рис. 2. Профиль уреза р. Вятки от гидропоста ЭСО КЧХК до устья р. Просницы.

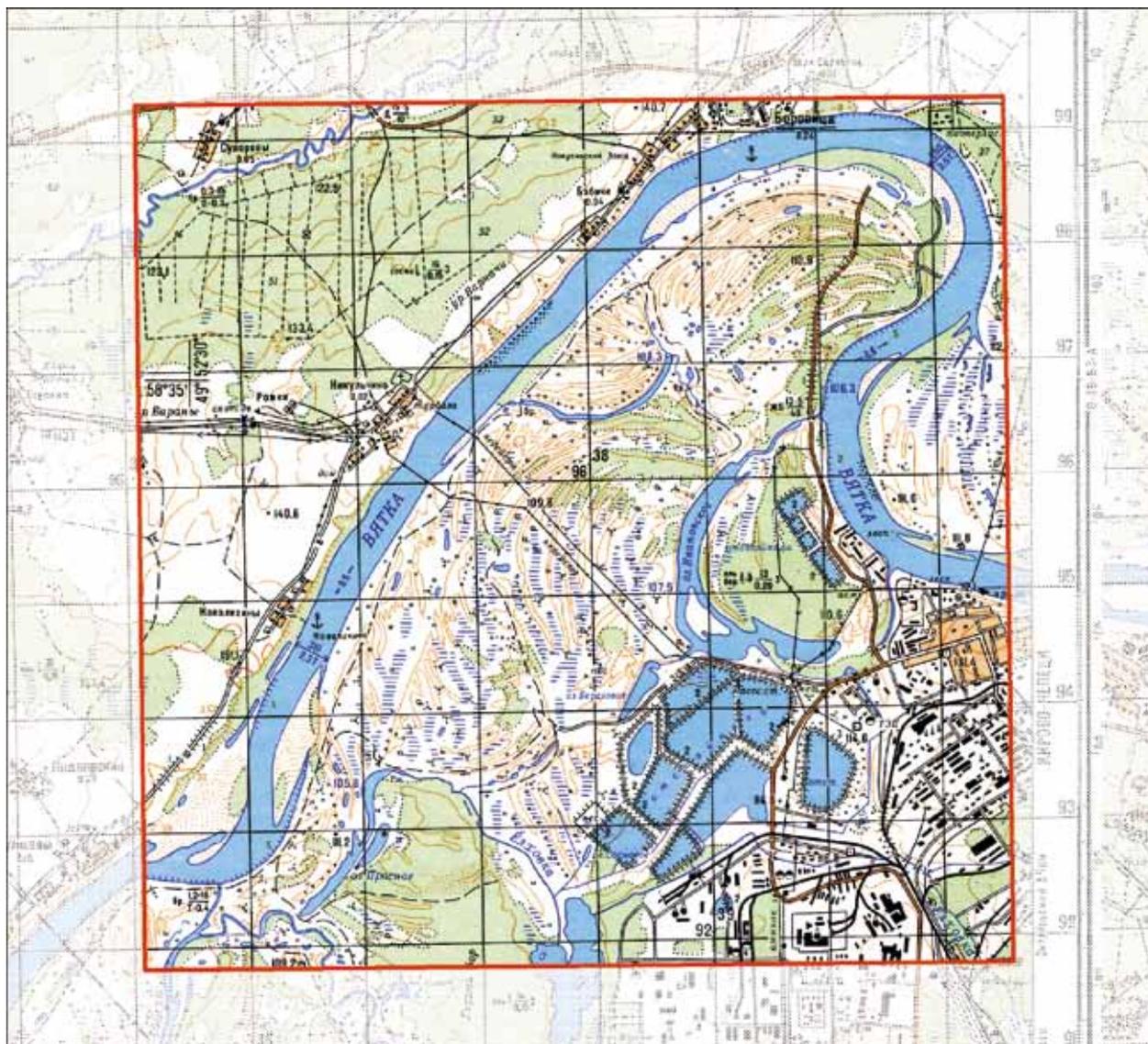
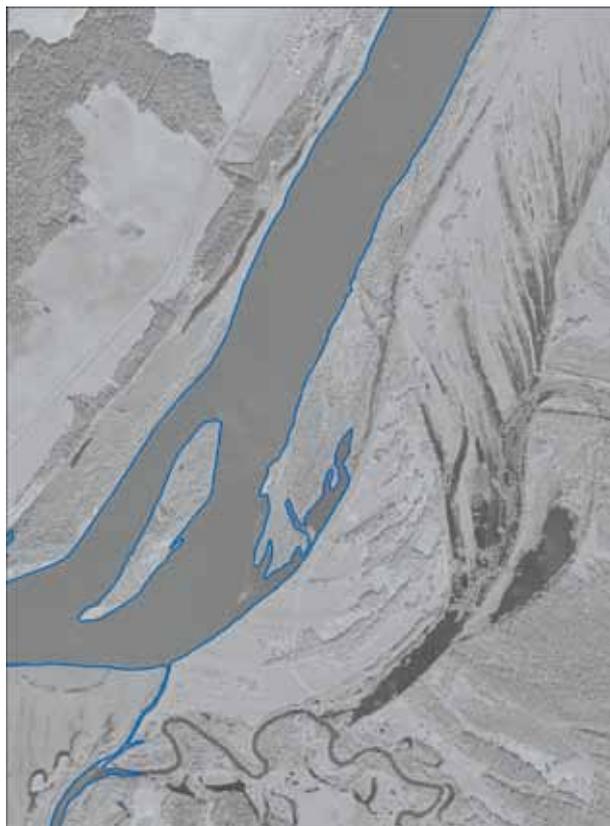
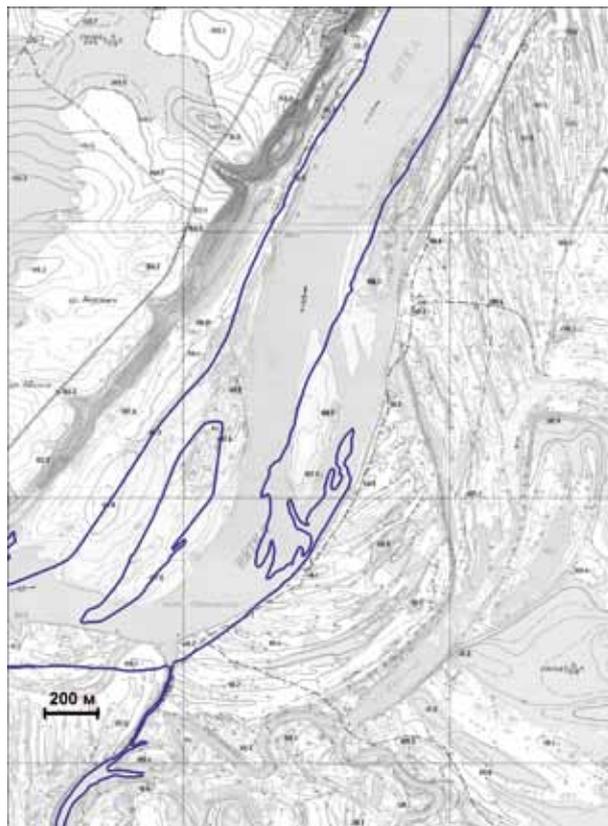


Рис. 1. Площадка гидрологического моделирования.



а

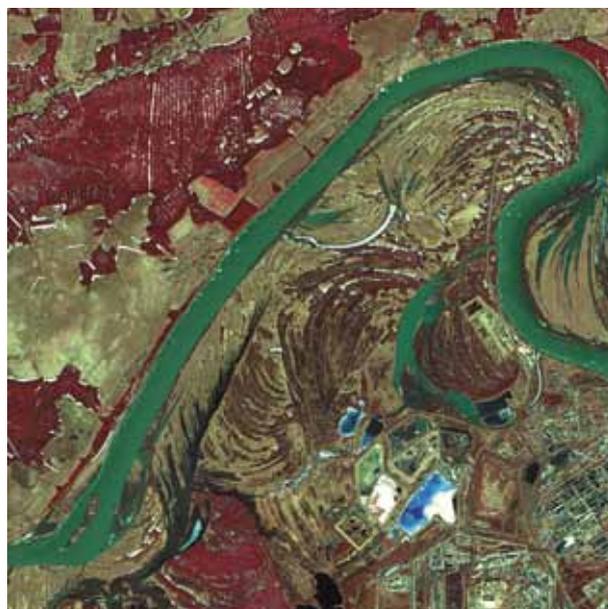


б

Рис. 5. Эрозия берега р. Вятки за период 30 лет: а – снимок WorldView-1 19 мая 2009 г., б – топографическая карта 1:10000 съёмки 1979 г.



а



б

Рис. 6. Паводковая ситуация на р. Вятке в районе г. Кирово-Чепецка 21 апреля 2012 г.: а – изображение зоны затопления по результатам расчёта разработанной моделью паводка; б – снимок с космического аппарата SPOT-5 в условных цветах.

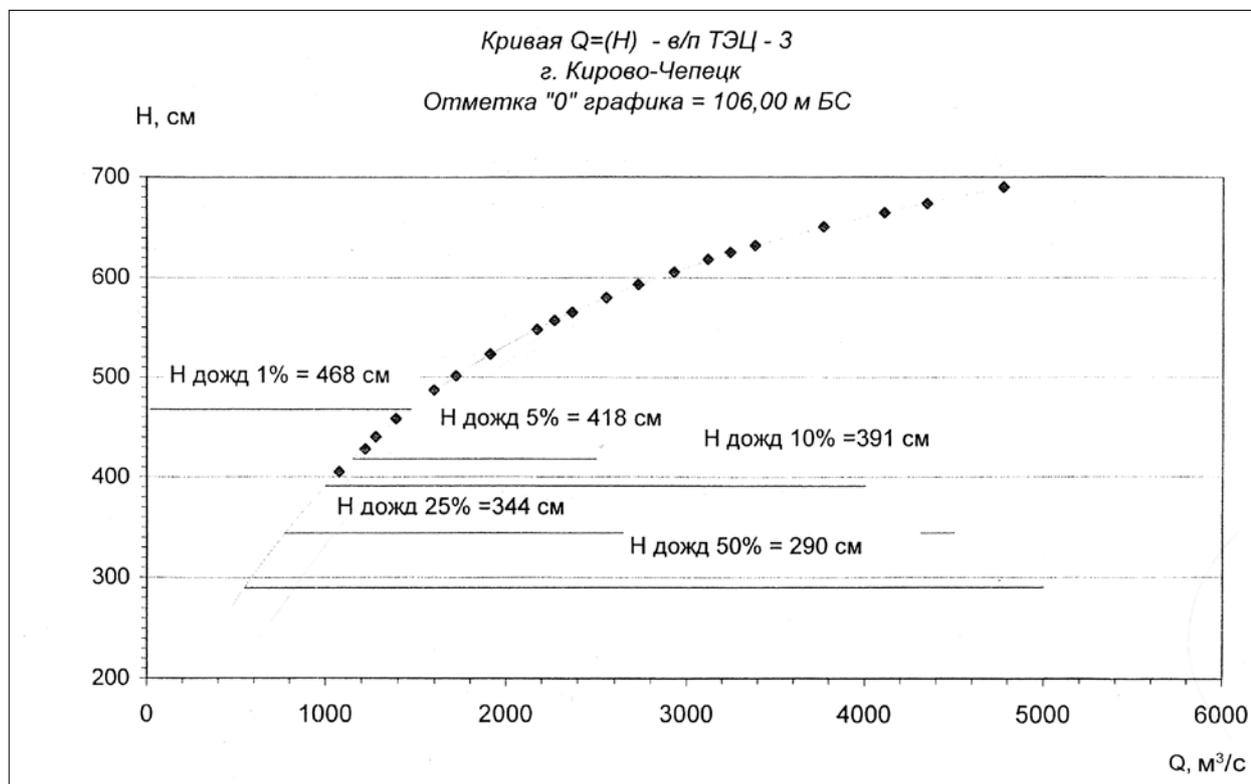


Рис. 3. Эмпирическое соотношение расхода и уровня воды в р. Вятке в створе гидропоста ЭСО КЧХК.

Для конкретных условий Кирово-Чепецкой поймы величина уклона составляет 0,0001 (т. е. 10 см на 1 км), коэффициент шероховатости принят равным 0,023, что характерно для равнинных рек с ровным песчаным дном. Исходя

из морфометрических характеристик гидрометрического створа, при расчёте учитывалось увеличение ширины русла реки от 250 до 450 м при подъёме воды от 4 до 7 м, считая от нулевого уровня поста, соответствующего 106,00 м БС.

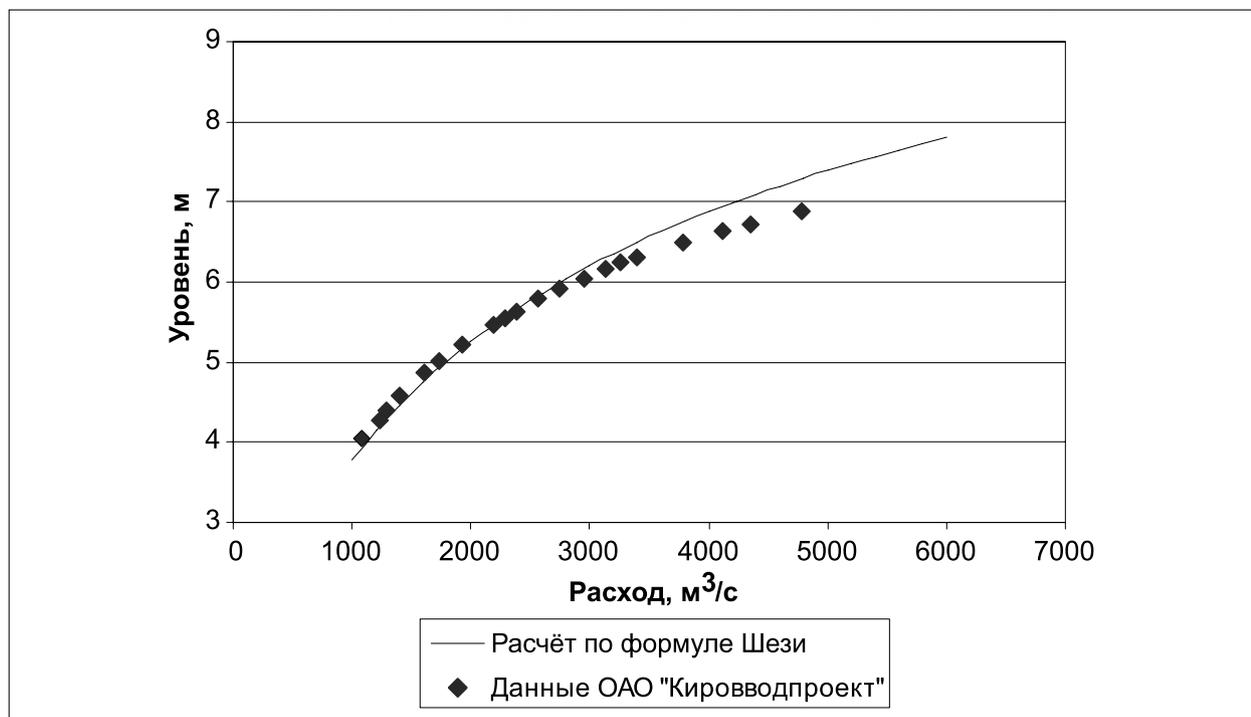


Рис. 4. Сопоставление расчётных и эмпирических данных по соотношению расхода и уровня воды в р. Вятке в районе г. Кирово-Чепецка.

На рисунке 4 приведено сопоставление данных ОАО «Кировводпроект» с результатами расчёта по формуле Шези. Соответствие данных можно считать удовлетворительным, что позволит в дальнейшем использовать формулу Шези для приближённых расчётов глубин затопления поймы и скоростей потоков на затопленных территориях.

Основу динамической модели поверхностного стока составляет детальная цифровая модель рельефа (ЦМР) моделируемой территории. Для построения ЦМР использовались данные топографической карты масштаба 1:10000 съёмки 1979 г. с основной высотой сечения горизонталей 1 м и дополнительной 0,5 м.

Следует отметить, что на исследуемом участке р. Вятки довольно высока интенсивность процессов береговой эрозии, поэтому в топографическую основу были внесены коррективы, отражающие явные изменения положения береговой линии. На рисунке 5 (см. цветную вкладку) для сравнения показано близкое к современному состоянию положение уреза р. Вятки в районе устья р. Просницы на фоне космического снимка, сделанного 19 мая 2009 г. сразу после прохождения весеннего половодья и на фоне топографической карты 1979 г. съёмки.

Данное обстоятельство говорит о настоятельной необходимости выполнения новой топографической съёмки всей территории левобережной поймы в районе Кирово-Чепецкого промышленного комплекса с использованием современных средств высокоточного позиционирования и стереофотограмметрической аэрофотосъёмки.

Исходя из заданных размеров модельной площадки и пространственного разрешения, ЦМР является массивом абсолютных отметок уровня местности (включая дно водных объектов) размером 3000×3000 элементов. Удобный формат хранения ЦМР – графический файл BMP, цветовая кодировка которого позволяет хранить более 16700000 различных отсчётов, т.е. кодировать абсолютную отметку пиксела в пределах от нуля до 167 м с шагом 10 мкм. Такая кодировка рельефа даёт возможность быстрого построения сплошного поля высот путём сплайновой интерполяции векторной карты горизонталей, содержащих в соответствующем поле атрибутивной таблицы величину абсолютной отметки.

Цифровая модель рельефа для гидрологического моделирования была создана на основе топографической карты в три основных

этапа, включающих цветовое кодирование векторной карты горизонталей, растеризацию карты с заданным пространственным разрешением и двойную сплайновую интерполяцию с дополнительным усреднением.

Ключевой компонент гидродинамической модели – алгоритм, воспроизводящий процесс заполнения понижений рельефа водой по мере повышения уровня паводковых вод. В данном случае использовался алгоритм, аналогичный алгоритму закрашивания плоской фигуры, применяемому в различных графических приложениях. Этот алгоритм воспроизводит движение воды с учётом рельефа местности и наличия препятствий.

Для проверки адекватности разработанной модели паводка было проведено сравнение результата расчёта границ зоны затопления поймы с космическим снимком, полученным с космического аппарата SPOT-5 21 апреля 2012 г. По данным гидропоста ООО «ЭСО КЧХК», на момент съёмки уровень воды р. Вятки составлял 109,96 м. Гипсометрический уровень устья р. Просницы ниже уровня гидропоста ЭСО КЧХК на 1,3 м. Таким образом, абсолютная отметка уреза воды в устье р. Просницы на момент съёмки составляла 108,66 м. Задавая этот уровень в качестве входного параметра модели, нами получена картина затопления поймы, представленная на рисунке 6 а (см. цветную вкладку). Сравнение изображения, полученного расчётным путём, с космическим снимком (рис. 6 а, б) показывает почти полную идентичность контуров границ затопления, что подтверждает правильность принципов и алгоритмов, положенных в основу разработки модели.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-6536.2014.5.*

## Литература

1. Глаголев А.В., Вольницкая Е.П., Лемешко А.П. Результаты полевого обследования состояния недр в районе территории объектов «РосРАО» – выводы и предложения // Современная радиозокологическая обстановка в Кировской области. Объектовый мониторинг состояния недр и его роль в решении практических задач Госкорпорации «Росатом» по реабилитации радиационно-опасных объектов ФГУП «РосРАО»: Материалы научно-практической конференции. Киров, 2009. С. 45–62
2. Дружинин Г. В., Лемешко А. П., Нечаев В. А., Хитрин С. В. Отчет по результатам комплексной оценки

влияния хозяйственной деятельности ОАО КЧХК и прилегающей к нему площади водосбора на режим формирования качества и количества стоков. Киров: ООО «Геосервис», 2006. 146 с.

3. Ашихмина Т.Я., Лемешко А.П., Кантор Г.Я., Дабах Е.В. Комплексное обследование территории в районе хранения радиоактивных отходов Кирово-Чепецкого отделения филиала «Приволжский территориальный округ» ФГУП «РосРАО» // Современная радиоэкологическая обстановка в Кировской области. Объектовый мониторинг состояния недр и его роль в решении практических задач Госкорпорации «Росатом» по реабилитации радиационно-опасных объектов ФГУП «РосРАО»: Материалы научно-практической конференции. Киров, 2009. С. 63–76.

4. Ашихмина Т.Я., Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Лемешко А.П., Скугорева С.Г., Адамович Т.А. Оценка состояния природного комплекса в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 18–26

5. Моделирование возможных вариантов затопления поймы р. Вятка в зоне размещения хранилищ РАО,

для обоснования необходимости проектирования защитных барьеров. Оценка современного состояния природной среды в районе влияния объектов Кирово-Чепецкого отделения филиала «Приволжский территориальный округ» ФГУП «РосРАО» и создание цифровой карты загрязнённой территории. Отчёт по договору № Ц-ИР/ИФ05-10/10. Сыктывкар. 2010. 119 с.

6. Изучение химического и радиохимического состава поверхностных вод в районе хранилищ РАО КЧХК. Отчёт по договору № 3/20-2010. Киров. 2010. – 42 с.

7. Святовец С.В. Разведочная модель переноса загрязняющих веществ подземными водами в районе площадки объектов «РосРАО» и прилегающей территории – предварительные результаты // Современная радиоэкологическая обстановка в Кировской области. Объектовый мониторинг состояния недр и его роль в решении практических задач Госкорпорации «Росатом» по реабилитации радиационно-опасных объектов ФГУП «РосРАО»: Материалы научно-практической конференции. Киров. 2009. С. 77–90.

8. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. М.: Высшая школа, 1991. 368 с.