



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
филиал ФГБОУ ВО «РГГМУ» в г. Туапсе

Кафедра «Экономики и управления на предприятии природопользования»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)
по направлению подготовки 09.03.03 Прикладная информатика
(квалификация – бакалавр)

На тему «Имитационное моделирование загрязнения водных объектов взвешенными веществами с использованием клиентских веб-технологий»

Исполнитель Моргун Никита Андреевич

Руководитель к.г.н., доцент по кафедре информатики и прикладной математике
Полупанов Владимир Николаевич

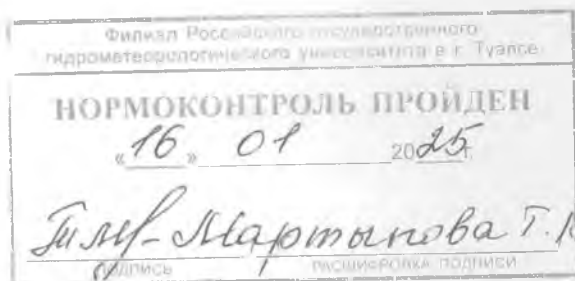
«К защите допускаю»

Руководитель кафедры

кандидат экономических наук

Майборода Евгений Викторович

«10» 01 2025 г.



Туапсе
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Анализ объекта и предмета исследования	5
1.1 Загрязнение объектов взвешенными веществами	5
1.2 Методы моделирования загрязнения	6
1.3 КА-модель распространения загрязнения	14
2 Веб-реализация КА-модели	211
2.1 Клиентская версия КА-модели	21
2.2 Примеры веб-моделирования загрязнения.....	24
2.3 Сравнение с традиционными расчётами загрязнения.....	32
3 Повышение эффективности веб-имитации	48
3.1 «Десктопный» вариант веб-приложения	46
3.2 Параллелизм, многопоточность и веб-воркеры.....	48
3.3 Экономическая эффективность веб-моделирования	53
Заключение	57
Список литературы	60

Введение

В соответствии с нормативными документами Росрыболовства при оценивании воздействия гидротехнических работ на окружающую среду в случаях, когда затрагиваются водные объекты рыбохозяйственного значения, рассчитываются характеристики загрязнения взвешенными веществами (взвесьями, консервативными примесями). Подобные характеристики необходимы также для оценки экологического загрязнения водных объектов, входящего в зону ответственности Минприроды. Для расчёта характеристик загрязнения используются различные математические модели и методы их реализации.

В настоящей выпускной работе исследуются возможности имитационного моделирования характеристик загрязнения водных объектов взвесьями, реализованного с использованием клиентских веб-технологий. При этом рассматриваются лишь мелководные объекты, для которых приемлемы двумерные пространственные модели.

Актуальность исследования обусловлена двумя аспектами. С одной стороны веб-реализация представляет интерес для рассмотрения в связи с тем, что имитационное моделирование относится к подходам, в которых используются «тяжёлые» методы вычислительной математики, традиционно реализуемые средствами достаточно мощных стационарных вычислительных платформ. Но «тяжёлые» методы трудно применять в практической деятельности экологических организаций, из-за чего ведутся поиски более «лёгких» методов, одним из которых может быть рассматриваемое веб-приложение, возможно доработанное с учётом результатов настоящей ВКР.

Другой аспект исследования состоит в возможности на примере существующего веб-приложения рассмотреть пути повышения вычислительной эффективности имитационного моделирования за счёт применения новейших веб-технологий, ещё не используемых в данной предметной области.

Объект исследования – моделирование загрязнения взвесьями водных

объектов.

Предмет исследования – имитационное моделирование распространения загрязнения взвесями мелководных объектов с использованием веб-технологий в среде клиента (браузера).

Целью бакалаврской работы является исследование возможностей использования клиентских веб-технологий для имитационного моделирования в экологии при расчёте распространения взвешенных веществ в мелководных объектах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- выполнить анализ методов моделирования в рассматриваемой предметной области;
- исследовать возможности существующего веб-приложения для моделирования распространения взвесей в мелководных водных объектах;
- провести имитационные эксперименты по распространению взвесей на конкретных примерах;
- сравнить результаты веб-моделирования с результатами традиционных методов;
- рассмотреть возможности новых веб-технологий для повышения эффективности клиентского имитационного моделирования;
- сформировать выводы и предложения по результатам проведённого исследования.

1 Анализ объекта и предмета исследования

1.1 Загрязнение водных объектов взвешенными веществами

При оценивании воздействия гидротехнических проектов на окружающую среду (ОВОС) в случаях, когда затрагиваются водные объекты рыбохозяйственного значения, необходимо знать характеристики загрязнения взвешенными веществами (взвесями), которые часто невозможно рассчитать без имитационного (математического) моделирования.

К водным объектам, рассматриваемым в настоящей работе, относятся мелководные (не глубже 10-20 м) водоёмы типа участков морских акваторий, водохранилищ, прудов, лиманов, а также водотоки (реки и каналы).

При этом выделяются ограниченные участки этих объектов, поскольку значимые концентрации взвеси обычно обнаруживаются на небольших расстояниях от источника загрязнения (до двух-трёх км). Рассматриваются также лишь слабопроточные водные объекты, в которых средние скорости течений не превышают 0,5 м/с.

Моделирование распространения загрязнения взвесями состоит из двух основных этапов. На первом этапе строится цифровая модель рельефа дна области моделирования и рассчитываются параметры установившихся турбулентных течений. Второй этап посвящён моделированию транспортировки этими течениями взвесей, вбрасываемых в поток, с учётом их седиментации (осаждения).

На втором этапе моделирование позволяет определить пространственные количественные характеристики загрязнения: карты распределения концентрации взвеси (мг/л) и толщину осадка (мм).

Вброс взвесей чаще всего имитируется точечным источником, возможно, перемещающимся. При этом взвесь может состоять из смеси частиц различных размеров (полидисперсная взвесь). Скорость осаждения или так называемая гидравлическая крупность таких частиц наиболее существенно зависит от размеров. Наиболее крупные (песчанистые) частицы осаждаются недалеко от

источника, а более мелкие, например глинистые частицы, могут распространяться на большие расстояния, практически не осаждаясь.

В процессе перемещения шлейфа (облака) взвеси потоком, водный объект подвергается двум типам загрязнения: замутнению воды и отложению осадка. Замутнение воды, характеризуемое концентрацией взвеси, вызывает негативное воздействие на гидробионты (нектон, планктон, бентос) за счёт уменьшения освещения, необходимого для их жизнедеятельности. При наложении осадка определённой толщины заболевают или полностью гибнут донные организмы (зообентос и фитобентос) и организмы, которые питаются бентосом, например рыбы.

Кроме негативного влияния на обитателей водного объекта загрязнение взвесями может вызывать экологические проблемы в виде неблагоприятных санитарно-эпидемиологических последствий для оценки которых также необходимо моделирование характеристик загрязнения.

1.2 Методы моделирования загрязнения

Характер распространения взвешенных веществ от точечного источника в первую очередь зависит от гидродинамических и гидрологических характеристик водных объектов [9], среди которых можно выделить основные:

- морфометрические характеристики водного объекта;
- расход воды, вызывающий сточные течения в водотоках;
- ветер, способный вызвать ветровые течения;
- условия для развития турбулентности.

Ещё одна характеристика, оказывающая существенное влияние на характер распространения взвешенных веществ - скорость осаждения или гидравлическая крупность частиц взвеси [9,27].

Изучение методов расчёта распространения загрязнения взвесями позволяет глубже раскрыть особенности предметной области, следуя логике исследований при разработке этих методов. Среди методов выделим лишь

независящие от начального разбавления, когда скорости выпуска осветлённых вод в водоток незначительно (не более, чем в 4 раза)) превышают скорость потока в водном объекте [9]. В свою очередь эти методы можно разделить:

- на аналитические, когда для расчётов используются решения уравнений турбулентной диффузии, доведённые до аналитических формул;
- имитационные (математические), когда имитация распространения загрязнения осуществляется с использованием численных решений уравнений турбулентной диффузии.

Упрощённые аналитические методы рекомендуется использовать для предварительных расчётов [9], поскольку формулы этих методов содержат эмпирические коэффициенты, часто либо неизвестные, либо произвольно изменяемые в пределах достаточно широких интервалов.

Применение различных значений интервала приводит к существенно различающимся результатам (пример – коэффициент Шези [6,7,9]).

Смысл других до сих пор непонятен и всё ещё проясняется. Примером может служить так называемый «коэффициент шероховатости», с использованием которого часто вычисляется всё тот же коэффициент Шези [6,7,9].

Аналитические методы основаны на понятии кратности разбавления n и (или) коэффициенте смешения γ .

$$n = s_{cm}/s_{макс}, \quad (1.1)$$

где $s_{макс}$ - максимальная концентрация в поперечном сечении речного потока, находящемся на контрольном расстоянии от места выпуска сточных вод вниз по течению, s_{cm} - концентрация сточных вод в момент выпуска.

Коэффициент смешения был впервые введён И.Д. Родзиллером при развитии метода, разработанного В.А. Фроловым (известный как метод Фролова-Родзиллера или метод ВНИИ-ВодГЕО), и показывает, какая часть расхода реки смешивается со сточными водами [9]:

$$\gamma = (1 - \beta) / (1 + \beta \cdot Q_e / Q_{cm}), \quad (1.2)$$

где Q_e и Q_{cm} - расходы, соответственно, реки и выпуска сточных вод;

β - коэффициент:

$$\beta = \exp(-\alpha \cdot \sqrt[3]{x}), \quad (1.3)$$

x – расстояние по фарватеру от места выпуска сточных вод до рассматриваемого створа; α - коэффициент, учитывающий влияние гидравлических условий смешения:

$$\alpha = \xi \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{D/Q_{cm}}, \quad (1.4)$$

где ξ - коэффициент, зависящий от расположения выпуска сточных вод в водоток: при выпуске у берега он равен 1,0, у стрежня – 1,5; φ – коэффициент извилистости реки; D – коэффициент турбулентной диффузии [9]:

$$D = g \cdot H \cdot v_{cp} / (M \cdot C), \quad (1.5)$$

где g – ускорение свободного падения (m/c^2);

v_{cp} - средняя скорость течения на контрольном участке реки (m/c);

H – средняя глубина (m) на рассматриваемом участке;

C – коэффициент Шези ($m^{1/2}/c$);

M – коэффициент (m/c^2), зависящий от C : при $10 < C < 60$ выполняется зависимость $M = 0,7 \cdot C + 6$, при $C \geq 60$ коэффициент $M = const = 48$.

Кратность разбавления и коэффициент смешения связаны приближённой зависимостью [8]:

$$n \approx (Q_{cm} + \gamma \cdot Q_e) / Q_{cm}. \quad (1.6)$$

В практических расчётах используют понятие створа достаточного перемешивания. В качестве такого створа принимается створ, в котором сточные воды смешиваются с водой реки на 95, 90, 80, ... %, то есть створ, для которого $\gamma = 0,95, 0,90, 0,80, \dots$. Для приближённого определения расстояния до створа достаточного перемешивания используется следующая формула [9]:

$$x_{n.n} \approx \left[\frac{2,3}{\alpha} \cdot \ln \frac{\gamma \cdot Q_e + Q_{cm}}{(1-\gamma) \cdot Q_{cm}} \right]^3. \quad (1.7)$$

Формулы (1.2)÷(1.7) являются практической основой метода Фролова-Родзиллера (или метода ВНИИ-ВодГЕО), часто применяемого для расчётов загрязнения водотоков рыбохозяйственного значения. Метод может применяться при соблюдении условия:

$$0,0025 \leq Q_{cm} / Q_e \leq 0,1. \quad (1.8)$$

Метод Фролова-Родзиллера демонстрирует типовые недостатки использования аналитических методов для определения расстояния перемещения загрязнения.

Так, использование коэффициента извилистости может быть оправдано для усреднения в целом по реке, а для локальных участков протяжённостью до трёх км такой параметр может вносить слишком большую неопределённость. Ещё более значительные расхождения можно получить за счёт использования другой интегральной характеристики, какой является коэффициент Шези.

Основные недостатки использования коэффициента Шези в качестве универсального параметра для определения течений в водных объектах в нашем случае будут рассмотрены далее.

Имитационные численные решения для нашего случая мелководных водных объектов основаны на двумерных моделях турбулентной диффузии [9]. Основная трудность при создании моделей заключается в имитации

турбулентных течений, ответственных за транспортировку взвеси. Ветровые и стоковые течения обычно рассматриваются отдельно, хотя во многом проблемы моделирования в прибрежных зонах морей (водохранилищ) и в водотоках совпадают, поскольку в обоих случаях чаще всего используются приближения уравнений «мелкой воды» (упрощения уравнений Навье-Стокса и Эйлера [15]), только в первом случае движение воды обязано ветру, а во втором - уклону русла. Основные проблемы использования таких моделей возникают из-за недостаточности существующих теорий турбулентности, применимых для непротиворечивого замыкания исходных уравнений. Для традиционного решения этих проблем с использованием полуэмпирических параметризаций необходимы натурные исследования, которые, как правило, отсутствуют [10,15].

Выделяют две основные теоретические проблемы вычисления скоростей основных потоков при использовании уравнений «мелкой воды». Первая состоит в том, что для определения поля давления (или уровня свободной поверхности) используется остаточный член из уравнения неразрывности [15], который по сути является подгоночным (не вполне физическим) параметром при нарушениях гладкости рельефа дна, свойственных прибрежным мелководным участкам.

Вторая проблема связана с определением закона сопротивления осреднённому по глубине турбулентному потоку. Для практических приложений используется либо постоянный коэффициент сопротивления, либо коэффициент сопротивления, зависящий от «шероховатости», тогда как анализ многочисленных прямых инструментальных измерений даёт основание утверждать, что коэффициент сопротивления изменяется в различных водных объектах по ещё не установленным законам, а «шероховатость» - это не устоявшееся понятие, включающее в себя много факторов («зернистой шероховатости», скорости потока, геометрии и гидравлического сопротивления русла и др.), роль которых к настоящему времени не установлена [6,7]. Традиционные методы расчётов с использованием коэффициентов

шероховатости (по Маннингу, Павловскому, Гангилье-Куттера или табличных по Срибному, Чоу и т.п.) приводят к большим погрешностям (для скоростных коэффициентов Шези - от 30% до 100%) и считаются устаревшими [10].

В уравнениях «мелкой воды» типа квазилинейных (бездивергентных) уравнений Сен-Венана, традиционно используемых в речной гидравлике, также используются, упомянутые коэффициенты шероховатости, за счёт чего недопустимо упрощается физическая сторона процесса [15]. Кроме этого, огрубление геометрии потока за счёт чрезмерного сглаживания приводит к существенному искажению пространственной картины векторов скоростей течения [7, 15]. Такое огрубление исходной геометрии русла позволяет получать приемлемые результаты для достаточно протяжённых участков, при достаточных подробных исходных данных об уклонах дна и водной поверхности, глубин, скоростей течений и расходах на нескольких гидростворах.

Но при моделировании на ограниченном достаточно широком участке реки те допуски, что заложены в уравнениях Сен-Венана, являются некорректными [14]. Первоисточник этих некорректностей лежит в самой формулировке гипотезы Шези и последующей подгонки решений путём подбора валидирующего коэффициента («эффективной шероховатости») [5,15]. Ошибки и неоднозначность расчётов возрастают из-за больших погрешностей измерений уклонов и уровней при уменьшении длины участка реки [10].

Кратко возникающие проблемы турбулентной диффузии можно также проиллюстрировать с помощью известной модели горизонтальной турбулентной диффузии (ГТД-модели) [18], описывающей перемещение частиц плоского облака инертной взвеси в турбулентном потоке, векторное поле скорости u которого имеет вид:

$$u = \bar{u} + u', \quad (1.9)$$

где $\bar{u}$ - вектор адвективной составляющей, обеспечивающий перемещение (адвекцию) частиц облака в направлении основного потока;

u' - вектор диффузионной составляющей, вызывающая растекание (диффузию) облака за счёт мелкомасштабных разнонаправленных колебаний.

При постоянной глубине поле скорости u соответствует нормальному закону. Предполагается, что в этом поле действует мгновенный точечный источник с производительностью P по взвеси, порождающий облако, концентрация взвеси C в котором представима в виде гауссовой функции. Положение центра x_0 этой функции прослеживается во времени t с помощью уравнения $dx_0/dt = \bar{u}(x_0, t)$. ГТД-модель позволяет воспроизвести усреднённую по ансамблю всех реализаций во времени концентрацию взвеси C в двумерном однородном и изотропном потоке жидкости с постоянной глубиной h , движущемся со средней скоростью $\bar{u}$ в горизонтальной декартовой системе координат (x, y) , с помощью дифференциального уравнения переноса и диффузии (адвекции-диффузии). Последнее для краткости можно записать, ограничившись направлением вдоль оси x и для случая, когда мгновенный точечный источник мощностью P находится в точке $(x = 0; y = 0)$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = K_t(t) \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - w \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + P, \quad (1.10)$$

где w - доля осаждающейся взвеси; $K_t(t)$ — коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, часто задаваемый в упрощённом виде:

$$K_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{t}, \quad (1.11)$$

Решение для такой упрощённой задачи при $t > 0$ можно получить аналитически в виде гауссовой функции распределения усреднённой концентрации взвеси:

$$C(x, y, t) = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \sigma^2} \exp \left[-\frac{(x - \bar{u} \cdot t)^2 + y^2 - w \cdot t}{2 \cdot \sigma^2} \right], \quad (1.12)$$

где $\sigma^2 = 2K_\ell \cdot t$ – дисперсия; σ определяет полуширину облака загрязнения.

Выражение (1.12) позволяет определять состояние плоского радиально-симметричного диффундирующего «облака» усреднённой по глубине концентрации в заданный момент времени t при соблюдении условия изотропии случайной составляющей u' в однородном поле скорости $\bar{u}$.

Однако мелководным (и прибрежным) зонам свойственна существенная изменчивость глубин и обусловленное этим нарушение условий однородности и изотропии поля скорости [17], проявляющееся в резком увеличении веса локальных морфологических возмущений, так что исходное уравнение (2) можно переписать в упрощённом квазидвумерном виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(M_{i,j}/h_{i,j})}{\partial t} + \bar{u}(h_{i,j}) \frac{\partial(M_{i,j}/h_{i,j})}{\partial x} = \\ & = K_\ell(\bar{u}_{i,j}) \left(\frac{\partial^2(M_{i,j}/h_{i,j})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(M_{i,j}/h_{i,j})}{\partial y^2} \right) - w \frac{\partial(M_{i,j}/h_{i,j})}{\partial t} + P, \end{aligned} \quad (1.13')$$

где $K_\ell(\bar{u}_{i,j})$ — тензор коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии; M - масса взвеси.

Аналитические решения для квазиплоского потока отсутствуют, поэтому необходимо использовать численные аппроксимации. Однако, использование численных (сеточных) моделей в мелководных прибрежных зонах, как упоминалось, связано с трудностями.

Проблемы сеточных моделей можно попытаться «обойти» с помощью альтернативных бессеточных методов, разработанных на основе клеточных автоматов (cellular automata, CA или КА) [14, 24].

Предложенная в [19] модель описывает перенос взвеси квазиплоскими течениями (1.10') в расчётной КА-области с ячейками (клетками) квадратной формы (в терминах КА - окрестность Мура [24]) с набором скоростей D2Q9 (два измерения, девять соседей) с использованием некоторых идей метода дискретных решёточных уравнений Больцмана (lattice Boltzmann method, LBM)

[28]. Для наименования модели используется аббревиатура CAD2Q9 (CAD2Q9-модель), а для её программной реализации - CAD2Q9-SIST (Cellular Automata D2Q9-Simulation Suspension Transfer).

Вычислительная эффективность CAD2Q9-модели обеспечивается за счёт идеи «мгновенной максвеллизации» скоростей турбулизованного потока, при которой компоненты скорости в клетках расчётной области напрямую доступны из распределений плотности, близкой к нормальной.

В модели достаточно учитывать лишь ветровые течения и сток, с учётом влияния рельефа дна и берегов, поскольку в большинстве случаев на эти факторы приходится основная доля течений мелководного объекта [23].

Предполагаются выполнимыми следующие условия:

- ветер и расход воды считаются заданными;
- данных о батиметрии достаточно для восстановления глубин;
- численное решение, по аналогии с LBM, может состоять из нескольких этапов: на первых – предварительное решение подобное (4), а затем - окончательное, путём адаптации к граничным условиям и законам сохранения:
- на открытых границах - свободное протекание;
- для береговой линии - непроницаемость и отражение методом отскока;
- у дна – скольжение с торможением, зависящими от глубины и её градиентов;
- в каждой клетке - приближение к условию сохранения баланса импульсов;
- в целом по расчётной области - приближение к сохранению вещества.

В модели предполагается большой разброс получаемых значений за счёт преобладающего влияния крупномасштабных колебаний (синоптических, внутрисезонных и межгодовых), так как в расчётах рекомендуется использовать среднемноголетние значения характеристик ветра и расхода воды при группировке данных за месяц, квартал и даже за год [1,3].

Поэтому в качестве основы будет использоваться представление турбулентного течения в горизонтальной плоскости, лишь формально

соответствующее выражению (1.14):

$$U_{i,j} = \bar{U}_{i,j} + U'_{i,j}; \quad i = \overline{1, n-2}; \quad j = \overline{1, n-2}, \quad (1.14)$$

где $U_{i,j}$ - вектор турбулентного течения;

$\bar{U}_{i,j}$ - вектор основного потока;

$U'_{i,j}$ – отклонения от вектора основного потока.

1.3 КА-модель распространения загрязнения

Подход на основе клеточных автоматов [19] основан на предположении, что турбулентное установившееся течение можно описать девятью компонентами D2Q9-набора [28] скорости в клетках окрестности и в самой центральной клетке.

Эти компоненты скорости генерируются основным потоком, создаваемым ветром и (или) стоком.

При взаимодействии с неровностями дна и береговой линией компоненты трансформируются при сохранении импульса.

Задача состоит в создании алгоритма генерации компонент скорости для каждого D2Q9-набора.

Обозначим клеточную (расчётную) область в виде квадрата размером L с числом клеток $n \times n$ и размером клетки $\Delta x = L/n$.

Положение центральной клетки окрестности в пределах клеточной области можно определить с помощью индексов i (номер строки) и j (номер столбца), а в пределах окрестности - с использованием следующего механизма индексации относительно центральной клетки: $i + l, j + m$; $l = -1, 0, 1$; $m = -1, 0, 1$. Тогда компоненты D2Q9-набора скорости для имитации установившегося турбулентного течения в окрестности Мура [24] с центральной клеткой с координатами $i = 1, j = 1$ можно представить в виде схем, показанных на рисунке 1.1.

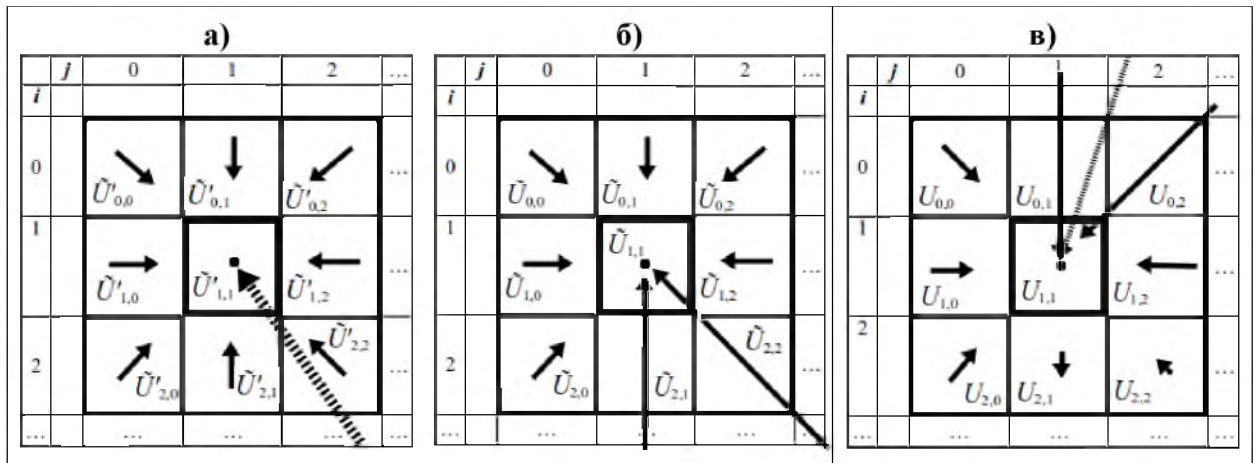


Рисунок 1.1 - Становление D2Q9-набора компонент скорости течения:
а) диффузионные компоненты, сгенерированные вектором основного потока;
б) суммарные компоненты адвективно-диффузионного течения до адаптации;
в) суммарные компоненты адвективно-диффузионного течения после адаптации
(векторы основного потока: $\blacktriangleleft$ - на начальном этапе; $\blacktriangleleft$ - после адаптации)

Рисунок 1.1 демонстрирует особенности подхода, состоящего из нескольких этапов. На начальном этапе ветер и (или) сток возбуждают первоначальный вектор основного потока во влияющих клетках, расположенных с наветренной стороны (выше по течению) от центральной клетки. Начальный вектор генерирует в клетках окрестности девять компонент одинаковой величины $\tilde{U}'_{i+j+m}$, определяющих диффузию (рисунок 1.1-а).

Разложение вектора основного потока по проекциям на два соседних направления и суммирование со сгенерированными диффузионными компонентами даст компоненты скорости адвективно-диффузионного потока в виде D2Q9-набора $\tilde{U}_{i+n,j+m}$ (рисунок 1-б). Горизонтальные компоненты $\tilde{U}_{i+n,j+m}$ при $n,m \neq 0$ обеспечивают адвекцию и горизонтальную диффузию (адвективную диффузию), а вертикальная $\tilde{U}_{i,j}$ ($n,m = 0$) отвечает за тормозящий эффект, обусловленный гидродинамическим сопротивлением потоку.

Затем полученные девять компонент трансформируются в D2Q9-набор компонент $U_{i+n,j+m}$ (рисунок 1-в) путём адаптации к перепадам глубин окрестности при сохранении первоначально заданного импульса, которым обладал D2Q9-набор $\tilde{U}_{i+n,j+m}$. После адаптации горизонтальные компоненты $U_{i+n,j+m}$ ($n,m \neq 0$) каждого D2Q9-набора обеспечивают адвективную диффузию с учётом влияния рельефа дна, а вертикальная компонента $U_{i,j}$ ($n,m = 0$) отвечает

за тормозящий эффект, теперь уже с учётом сохранения импульса.

Векторное суммирование полученных таким образом горизонтальных компонент даст значение поля скорости основного потока (адвекции) $\vec{U}$, а разность векторов горизонтальных компонент и вектора скорости основного потока - значения пульсаций $\vec{U}'$, отвечающих за диффузию.

Принятая модель окрестности обеспечивает гибкое реагирование на изменчивость глубин и сложную береговую линию путём применения процедуры оптимизации соотношения компонент скорости при сохранении импульса. Другими словами такой подход позволяет выдержать замкнутость модели турбулентного течения.

Предлагаемое представление турбулентного течения соответствует выражению (1.9'), а становление такого поля скорости для каждой D2Q9-окрестности можно представить обратной задачей получения компонент скорости по первоначальным векторам основного потока, решаемой с помощью итерационной оптимизационной процедуры.

Распространение взвеси при известном D2Q9-наборе компонент турбулентного потока U_{ij} имитируется с использованием клеточного механизма, предложенного в [19]. В CAD2Q9-модели предусмотрена и программно реализована возможность манипуляций со взвесью, состоящей из частиц нескольких фракций (полидисперсная взвесь), когда перемещение частиц каждой фракции имитируется в виде отдельного монодисперсного шлейфа (облака), а для получения суммарного количества вещества используется принцип суперпозиции. Такой подход равнозначен расчётам с использованием так называемой «эффективной гидравлической крупности» [11], однако манипулирование отдельными облаками оставляет более широкие возможности для развития модели в случае необходимости учёта взаимозависимости облаков, как это происходит при флокуляции [27]. В дальнейшем для краткости изложения полидисперсность учитывается лишь при необходимости.

На рисунке 1.2 показаны схемы расположения основных величин,

используемых в CAD2Q9-модели с индексами клеток D2Q9-окрестности для случая, когда центральная клетка находится в клетке (1,1) клеточной области.

a)					
	f	0	1	2	...
i					
0		$H_{0,0}$ $U_{0,0}$ $U_{sub0,0}$	$H_{0,1}$ $U_{0,1}$ $U_{sub0,1}$	$H_{0,2}$ $U_{0,2}$ $U_{sub0,2}$	...
1		$H_{1,0}$ $U_{1,0}$ $U_{sub1,0}$	$H_{1,1}$ $U_{1,1}$ $U_{sub1,1}$	$H_{1,2}$ $U_{1,2}$ $U_{sub1,2}$	...
2		$H_{2,0}$ $U_{2,0}$ $U_{sub2,0}$	$H_{2,1}$ $U_{2,1}$ $U_{sub2,1}$	$H_{2,2}$ $U_{2,2}$ $U_{sub2,2}$	...
...		...	...	...	...

б)					
	f	0	1	2	...
i					
0		$W_{0,0}, (W_0)$ $W_{sub0,0}$	$W_{0,1}, (W_1)$ $W_{sub0,1}$	$W_{0,2}, (W_2)$ $W_{sub0,2}$	...
1		$W_{1,0}, (W_3)$ $W_{sub1,0}$	$W_{1,1}, (W_4)$ $W_{sub1,1}$	$W_{1,2}, (W_5)$ $W_{sub1,2}$	...
2		$W_{2,0}, (W_6)$ $W_{sub2,0}$	$W_{2,1}, (W_7)$ $W_{sub2,1}$	$W_{2,2}, (W_8)$ $W_{sub2,2}$	...
...		...	...	...	...

B)					
	f	0	1	2	...
i					
0		$Msup_{0,0}(f)$ $Msub_{0,0}(f)$	$Msup_{0,1}(f)$ $Msub_{0,1}(f)$	$Msup_{0,2}(f)$ $Msub_{0,2}(f)$	...
1		$Msup_{1,0}(f)$ $Msub_{1,0}(f)$	$Msup_{1,1}(f)$ $Msub_{1,1}(f)$	$Msup_{1,2}(f)$ $Msub_{1,2}(f)$	...
2		$Msup_{2,0}(f)$ $Msub_{2,0}(f)$	$Msup_{2,1}(f)$ $Msub_{2,1}(f)$	$Msup_{2,2}(f)$ $Msub_{2,2}(f)$	...
...		...	...	...	...

Рисунок 1.2 - Схемы расположения величин в CAD2Q9-модели:

а) глубины, компоненты скорости течения и скорости осаждения взвеси;

б) весовые коэффициенты перемещения и осаждения взвеси;

в) масса взвеси и масса образовавшегося осадка

Величины на рисунке 1.2 проиндексированы в пределах всей клеточной области (абсолютная индексация), кроме весовых коэффициентов на рисунке 1.2-б, для которых в скобках показаны величины с альтернативной индексацией клеток в пределах окрестности (относительная индексация). Второй тип индексации предпочтителен при неоднократном повторении манипуляций над величинами в клетках одной и той же окрестности.

На рисунке 1.2 представлены следующие величины: $U_{i+l,j+m}$ – компоненты скорости турбулентного течения (см. рисунок 1-в); $U_{sub i+l,j+m}$ – скорости осаждения взвеси; $H_{i+l,j+m}$ – глубина; $W_{i+l,j+m}$ – весовые коэффициенты для учёта влияния компонент скорости на горизонтальное перемещение массы взвеси; $W_{sub i+l,j+m}$ – весовые коэффициенты для учёта влияния скорости осаждения на массы взвеси и образующегося осадка; $M_{sup i+l,j+m}(I)$ – масса взвеси на I -том цикле; $M_{sub i+l,j+m}(I)$ – масса образовавшегося осадка на I -том цикле.

Клеточный автомат представляет собой дискретную модель процесса распространения взвеси, развивающегося в каждой клетке двумерной клеточной области с окрестностью Мура [24] на очередном цикле I . Используется КА первого порядка, когда значения в клетках очередного цикла $(I+1)$ зависят от

значений лишь одного предыдущего I -го цикла. Количество взвешенного вещества $M_{i,j}$ в клетке с координатами (i, j) рассчитывается по одному и тому же алгоритму (КА-правилу), зависящему от компонент скорости турбулентного течения $U_{i+l,j+m}$, глубин $H_{i+l,j+m}$ и скоростей осаждения взвеси $U_{sub_{i+l,j+m}}$ в клетках окрестности.

Образование осадка напрямую зависит от скорости осаждения. При этом следует отметить, что в модели учитывается полидисперсность взвеси, содержащей частицы нескольких фракций ($fr=1,...,N$) со значительно различающимися размерами d_{fr} (когда, вдобавок, возможна флокуляция частиц [26]). Скорость осаждения считается зависящей от размера частиц d_{fr} и весовой концентрации частиц фракции $C_{fr}(I)_{i,j}$. Задача упрощается из-за небольших скоростей потока (не более 0,5 м/с, при которых обычно не учитываются влияние вертикального турбулентного обмена и взмучивание у дна [27]).

Различаются два основных типа осаждения мелкодисперсных частиц в зависимости от их концентрации: свободное осаждение и стеснённое осаждение. Свободное осаждение (наш случай) наблюдается при низкой концентрации частиц $O(10^0 \text{ мг/л})$, когда можно считать, что частицы оседают независимо друг от друга, не сталкиваясь и не взаимодействуя друг с другом. В этом случае скорость осаждения частиц размером 0,05 мм и менее – это гидравлическая крупность, рассчитывается непосредственно по формуле Стокса

$$\omega_{fr,0} = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_{fr,s} - \rho_w}{\rho_w} \cdot g \cdot \frac{d_{fr}^2}{\nu}; \quad (1.15)$$

где $\omega_{fr,0}$ - скорость осаждения частиц фракции fr (м/с); $\rho_{fr,s}$ - плотность частиц (кг/м^3); ρ_w - плотность воды (кг/м^3); g - ускорение силы тяжести ($9,80665 \text{ м/с}^2$); d_{fr} - диаметр частиц (м); ν – кинематическая вязкость воды ($\text{м}^2/\text{с}$).

Для определения плотности воды используется эмпирическая зависимость от температуры ($T, ^\circ\text{C}$) и солёности ($S, \text{‰}$) при стандартном атмосферном

давлении, принятая для Международного уравнения состояния воды (УС-80).

$$\rho_w = \rho_T + (b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4) S + (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) S^{3/2} + d_0 S^2, \quad (1.16)$$

где $b_0 = 8,24493 \cdot 10^{-1}$; $b_1 = -4,0899 \cdot 10^{-3}$; $b_2 = 7,6438 \cdot 10^{-5}$; $b_3 = -8,2467 \cdot 10^{-7}$; $b_4 = 5,3875 \cdot 10^{-9}$; $c_0 = -5,72466 \cdot 10^{-3}$; $c_1 = 1,0227 \cdot 10^{-4}$; $c_2 = -1,6546 \cdot 10^{-6}$; $d_0 = 4,8314 \cdot 10^{-4}$;

ρ_T - плотность чистой воды:

$$\rho_T = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5, \quad (1.17)$$

где $a_0 = 999,842594$; $a_1 = 6,793952 \cdot 10^{-2}$; $a_2 = -9,095290 \cdot 10^{-3}$; $a_3 = 1,001685 \cdot 10^{-4}$; $a_4 = -1,120083 \cdot 10^{-6}$; $a_5 = 6,536332 \cdot 10^{-9}$.

Кинематическая вязкость воды (m^2/c) равна

$$\nu = \mu / \rho_w, \quad (1.18)$$

где μ - динамическая вязкость ($Pa \cdot c = kg/(m \cdot c)$) пресной воды:

$$\mu = \frac{1,79 \cdot 10^{-6}}{(1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2)}. \quad (1.19)$$

Стеснённое осаждение начинает проявляться при повышенных ($O(101 \text{ мг/л})$) концентрациях мелких частиц [27] и для решения нашей задачи не используется.

Более подробно об алгоритмах модели можно узнать в [19,36].

2 Веб-реализация КА-модели

2.1 Клиентская версия КА-модели

Программная реализация КА-модели представляет собой Javascript-версию, имеющую наименование CAD2Q9-SIST (Cellular Automata D2Q9-Simulation Suspension Transfer, клеточно-автоматная D2Q9-имитация переноса взвеси) [20]. Особенность рассматриваемого Web-приложения - это клиентское приложение, работающее полностью в среде браузера, без использования средств сервера.



Рисунок 2.1 — Средства, используемые Web-приложением

В качестве клиента можно использовать наиболее популярные браузеры: Google Chrome, Mozilla Firefox, Яндекс.Браузер, Microsoft Edge, Safari, поддерживающие стандарты Web, одобренные консорциумом W3C [12]. В рамках этих стандартов:

- Javascript – используются средства ECMAScript 2015, которые поддерживаются во всех последующих версиях: ECMAScript 2016,

ECMAScript 2017, ECMAScript 2018;

- HTML – используются средства HTML 5, но такие, которые будут работать и в HTML 4;
- CSS - используются средства CSS3.

Важным преимуществом по сравнению с аналогами, основанными на сеточных моделях, являются пониженные требования к машинным ресурсам, что, наряду со снижением трудоемкости за счет особенностей КА-модели, обеспечивается использованием веб-технологий на стороне клиента. Построение и отображение интерактивных графиков осуществляется с помощью функций Javascript-библиотеки Highcharts JS [33]. Для сохранения и последующей интерпретации результатов используется клиентская база данных на основе HTML5 API IndexedDB [30].

Вычислительные возможности JS-движков браузеров развиваются опережающими темпами за счет постоянного совершенствования Javascript-интерпретаторов и к настоящему времени позволяют реализовать достаточно трудоемкие вычисления, тогда как сопровождение программ на этом языке доступно специалистам предметной области, не являющимся профессиональными программистами.

Web-приложение в среде клиента, в котором используется лишь «нативный» Javascript, обладает рядом преимуществ при выборе платформы для размещения. Такими платформами могут быть: браузер; web-сервер под Apache; web-сервер под Node.js.

Запуск Web-приложения в браузере не должен вызывать вопросов. Для недорогого и даже бесплатного использования на web-сервере всегда можно найти соответствующего провайдера, поскольку для размещения приложения требуется минимум ресурсов. Расширение возможностей приложения (например, использование СУБД) возможно двумя путями: под Apache, вероятнее всего придется писать на PHP; под node.js – можно обойтись одним лишь JS.

На рисунке 2.2 показана форма с полями для ввода исходных данных и с

горизонтальным меню для запуска различных блоков Web-приложения.

В верхней части формы предусмотрено поле для выбора наименования водного объекта с отображением карты-схемы объекта в поле слева. Местоположение квадрата (клеточной области) на карте-схеме можно выбирать перемещением мыши. Задавая различное количество клеток, можно изменять разрешение клеточной области. Координаты клетки с выбросами задаются в пределах перемещаемого квадрата.

CAD2Q9-SIST
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ
© Полупанов В.Н., 2017-2021



Керченский пролив

45°15'2.5" - широта верхней стороны квадрата

36°34'26.07" - долгота левой стороны квадрата

400 - n, клеток в стороне квадрата

147 - y, номер клетки с источником по широте вниз, от 0 до n-1; $\varphi = 45^{\circ}14'44.58''$

276 - x, номер клетки с источником по долготе вправо, от 0 до n-1; $\lambda = 36^{\circ}35'13.88''$

466.7 - продолжительность выбросов (мин)

0.454 - производительность источника по взвеси (кг/мин)

2.74 - плотность частиц взвеси (ρ_p , т/м³)

1.32 - плотность скелета частиц взвеси (ρ_{ps} , т/м³)

1.08 - коэффициент разрыхленности донного осадка (K_{cons})

1.222 - плотность донного осадка с учётом разрыхленности (ρ_d/K_{cons} , т/м³)

147 - y, номер клетки пересечения створов по широте вниз, от 0 до n-1; $\varphi =$

276 - x, номер клетки пересечения створов по долготе вправо, от 0 до n-1; $\lambda =$

23 - направление продольного створа (от 0° до 359° по потоку, из "компас")

0 - расстояние до поперечного створа от первоначально указанной клетки (м)

15 - температура воды (T_w , °C)

12 - солёность воды (S_w , ‰)

0 - направление ветра (от 0° до 359° против потока, в "компас")

4.5 - скорость ветра (м/с)

60 - средний расход на участке, попавшем в квадрат (м³/с)

Пороговые концентрации взвеси ($C_1 + C_2$, мг/л):

0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20

Пороговые толщины образующегося осадка ($H_1 + H_2$, мм):

0.001 0.002 0.005 0.01 0.02 0.05 0.1 0.2

0.005 - наименьшая отображаемая на карте концентрация взвеси (мг/л)

5 - циклов без обновления карты ("0" - без карты; "> 0"/"< 0" - текущая/"протёкшая")

50 - циклов без обновления графиков с временной шкалой ("0" - без графиков)

0 - учитывать стеснённое осаждение (в т.ч. флокуляцию): "0" - нет; "1" - да

3 - число фракций (не более восьми)

Размеры (м), гидравлические крупности (см/с) и доли (%) частиц взвеси:

50	5	1
2.0493e-1	2.0493e-3	8.1970e-5
40	40	20

Глубины

Створы

Тальвег

Течения

Выбросы

Остановить

Продолжить

Глубины с илом

Открыть БД

Добавить ил в БД

Удалить ил из БД

Сложить илы из БД

Площ. с "протёкш." к-циями -> в БД

Площ. с "протёкш." к-циями <- из БД

Сложить площади с к-циями из БД

Справка

Рисунок 2.3 - Форма для ввода исходных данных. На схеме района в квадрате, ограничивающем клеточную область, помечена клетка

В горизонтальном меню имеются следующие поля:

- «Глубины» — загружается батиметрия, выполняется интерполяция и отображение поля глубин;

- «Створы» — прокладываются продольный и поперечный створы;
- «Тальвег» — определяются особые точки тальвега;
- «Течения» — моделируются и отображаются скорости течений;
- «Выбросы» — начинаются циклы расчета поступления и распространения взвеси и отображения результатов. После очередного цикла можно сделать остановку («Остановить»), просмотреть числовые результаты, проанализировать распределения характеристик на карте и интерактивных графиках, изменить при необходимости значения в полях формы и продолжить («Продолжить») моделирование выбросов в этой же или другой клетке, имитируя многократный выброс или выброс из перемещающегося (распределённого) источника;
- «Глубины с илом» — иногда, при большом количестве осадка и малых глубинах, требуется выполнить перерасчёт глубин с учётом образовавшегося осадка для отображения и анализа и, возможно, пересчитать течения и затем продолжить моделирование с изменившимися полями глубин и течений;
- «Открыть БД», «Добавить ил в БД», «Удалить ил из БД», «Сложить илы из БД», «Протекло концентрации - в БД», «Площ. с протёкш. к-циями -> в БД», «Площ. с протёкш. к-циями <- БД», «Сложить площади с к-циями из БД» —используются для получения характеристик образовавшегося осадка и площади под заданными величинами интегральной («протёкшей» [1]) концентрации по результатам, сохраняемым в базе данных;

2.2 Примеры веб-моделирования загрязнения

В рассматриваемом веб-приложении в качестве исходных данных необходимо иметь геоданные с глубинами водного объекта, обычно получаемые по батиметрии, нанесённой на растровых картах. Для оцифровки батиметрии можно использовать, например, инструменты создания векторного точечного слоя, имеющиеся в QGIS, с последующей передачей геоданных через файл в формате JSON (geoJSON) [31,32]. Другая возможность получения такого файла

– использование Web-приложения для оцифровки глубин [13]. Глубины извлекаются из файла с помощью функции `parse.js()` и интерполируются в клетки в виде значений двумерного массива, привязанных к системе координат (СК) WGS-84/Pseudo-Mercator (EPSG:3857). Для интерполяции используется метод обратных взвешенных расстояний (ОВР или IDW от англ. - Inverse Distance Weighting), подробно описанный в [13]. Как показали эксперименты для небольших участков с размерами не более 5 км точность определения координат, длин и площадей вполне достаточны (ошибка не превышает 5 м).

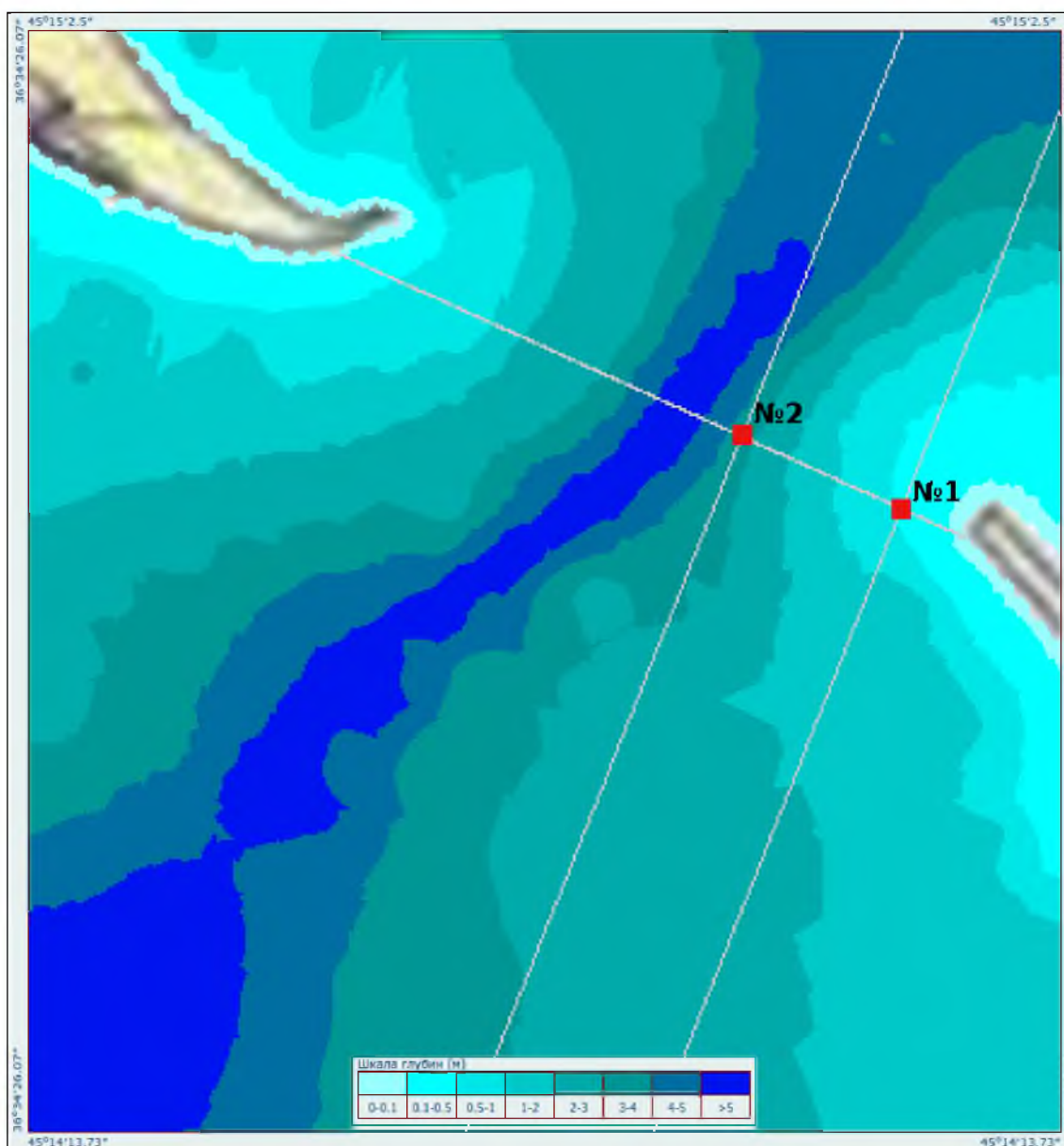


Рисунок 2.4 - Результат выполнения пункта меню «Глубины»

(№1 и №2 – местоположения буровых платформ - источников выбросов взвеси)

На рисунке 2.4 показан результат выполнения пункта меню «Глубины» с цветовым отображением карты глубин. На карте видны также линии продольных и поперечных створов, построенных с помощью кнопки «Створы».

Длина стороны квадрата составляет 1505 м, размер клетки - 3,76 м.

На рисунке 2.5 показан фрагмент поля векторов адвекции, вычисляемой и отображаемой после нажатия кнопки «Течения».

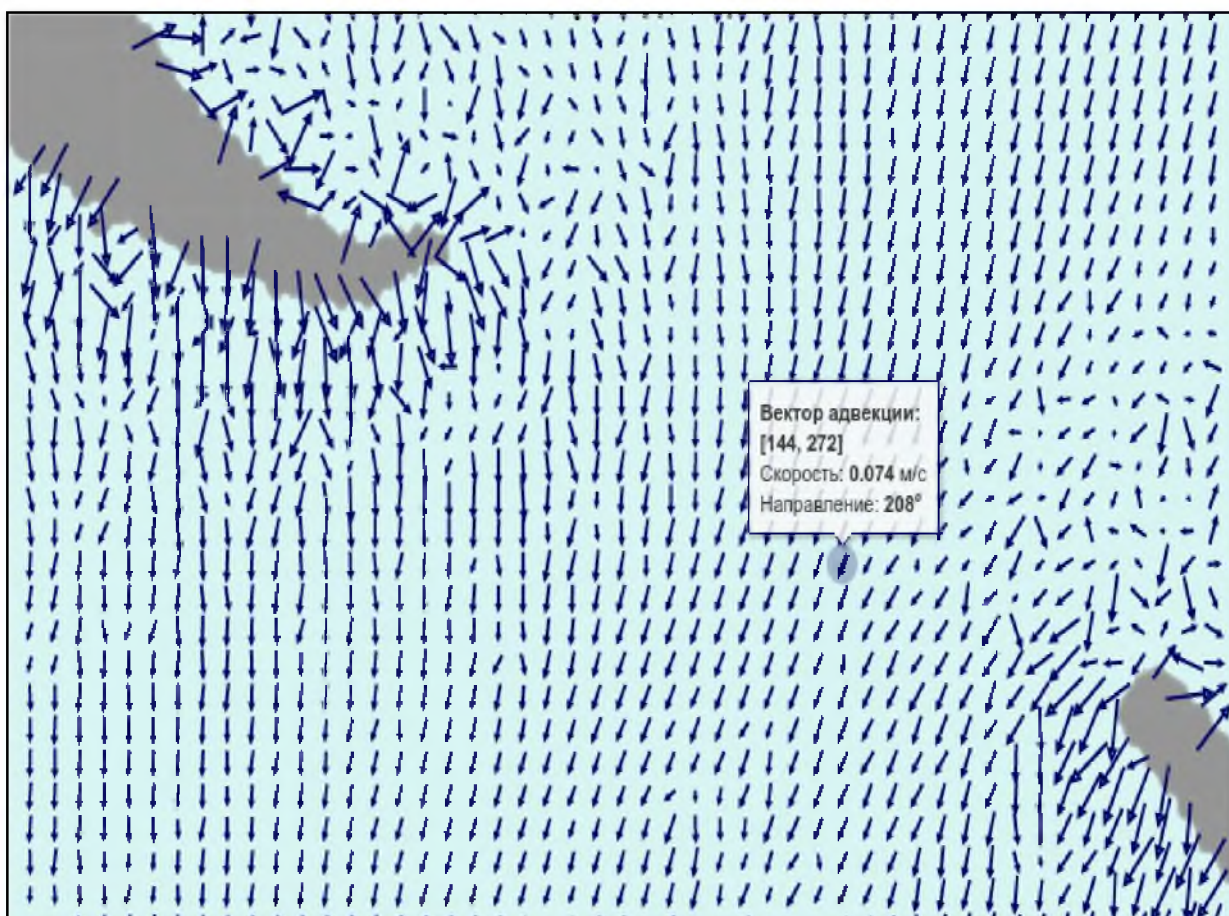


Рисунок 2.5 – Фрагмент поля векторов адвекции

Средняя скорость адвекции при усреднении по всей клеточной области составляет 0,076 м/с. Максимальная скорость наблюдается у берегов и достигает 0,2 м/с.

На рисунках 2.6 - 2.14 приведены фрагменты интерактивных карт и графиков, отображаемых в процессе моделирования, с помощью которых можно представить особенности пространственно-временной динамики загрязнения. Длительность одного расчётного цикла составляет 61 с.

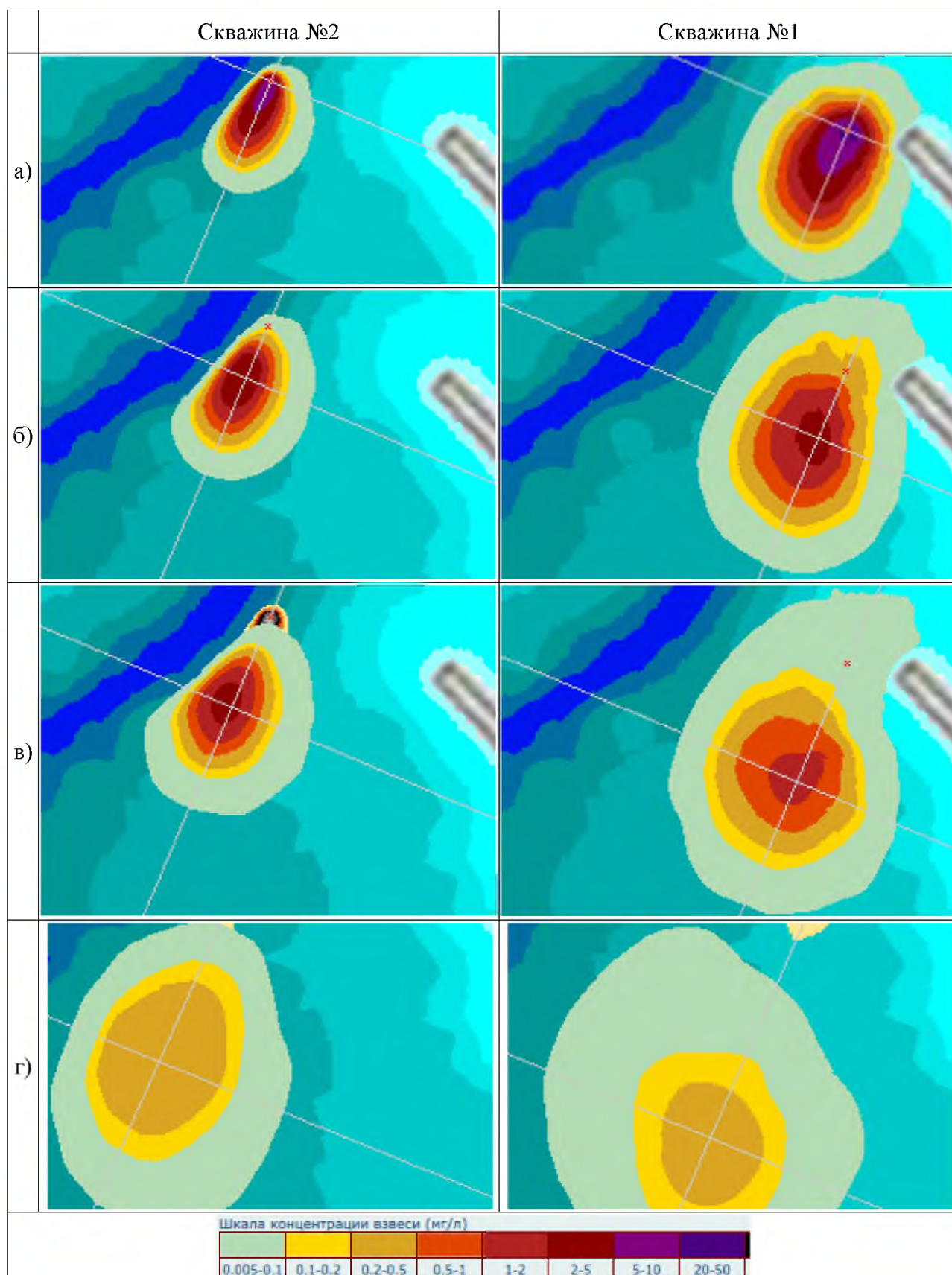


Рисунок 2.6 — Концентрация взвеси в различные моменты времени после окончания выбросов

а) в момент окончания; б) через 5 час; в) через 10 час; г) через 40 час

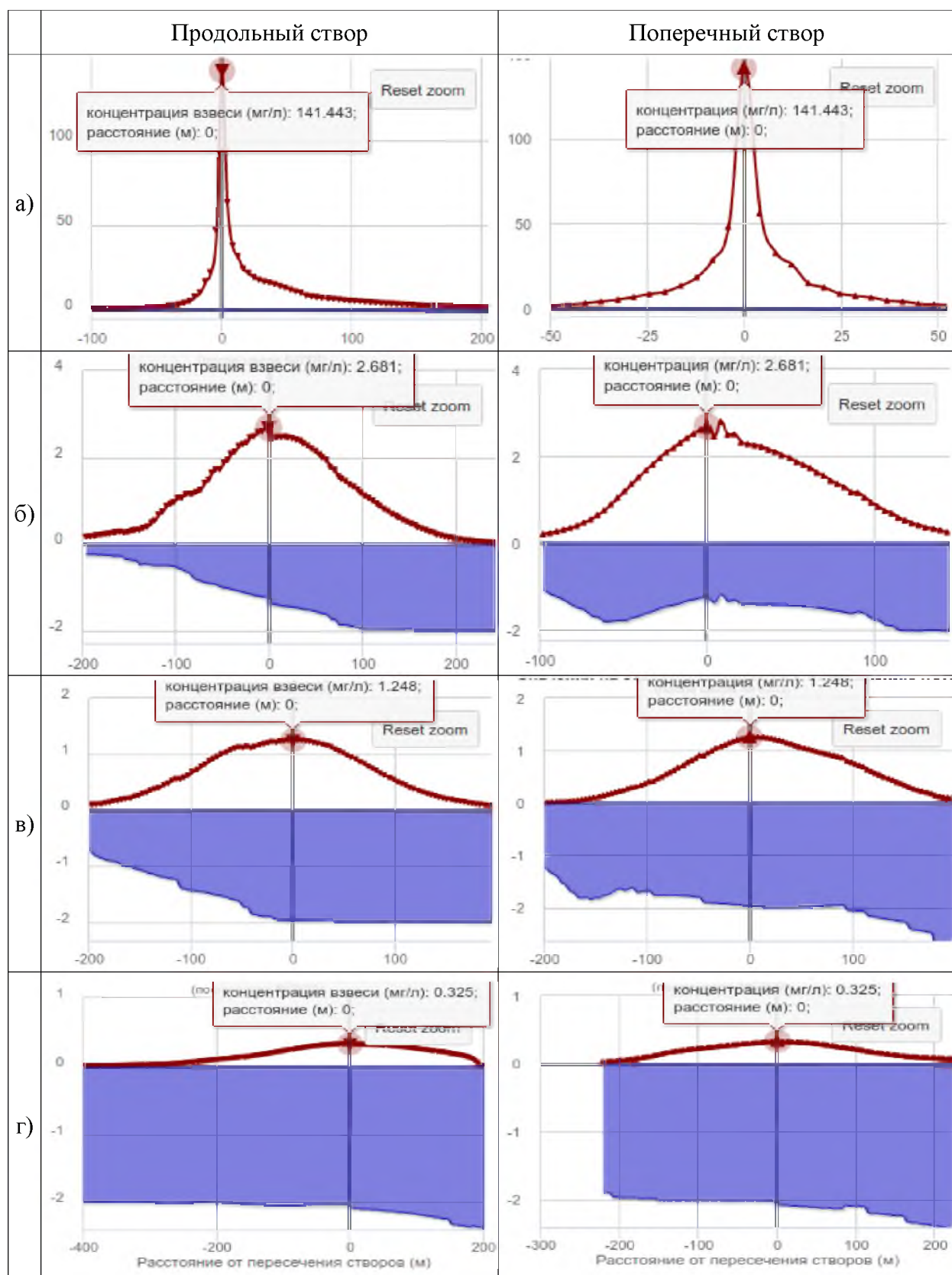


Рисунок 2.7 — Концентрация взвеси вдоль продольного и поперечного створов в моменты после окончания выбросов из скважины №1:

а) в момент окончания; б) через 5 час; в) через 10 час; г) через 40 час

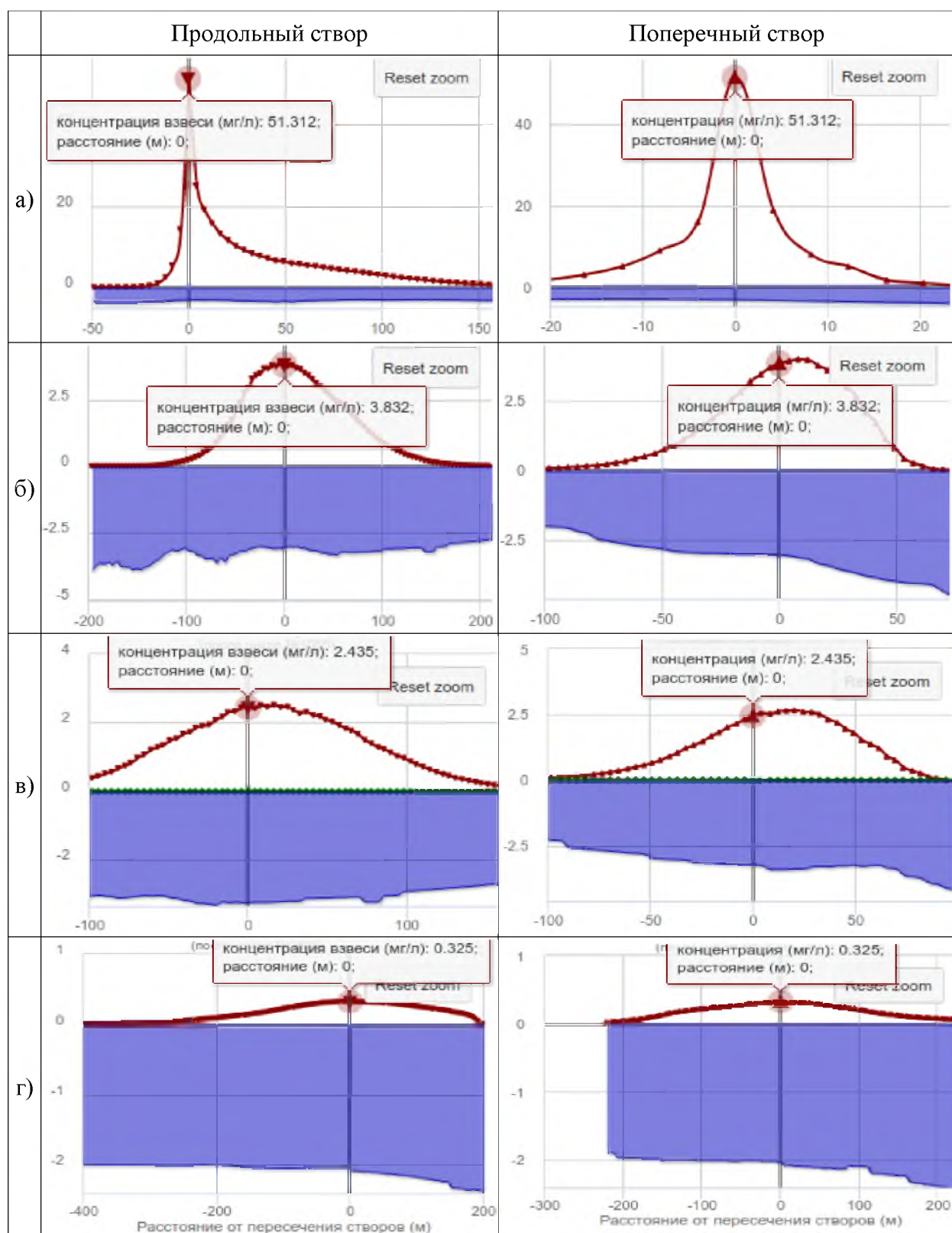


Рисунок 2.8 — Концентрация взвеси вдоль продольного и поперечного створов в моменты после окончания выбросов из скважины №2:

а) в момент окончания; б) через 5 час; в) через 10 час; г) через 40 час

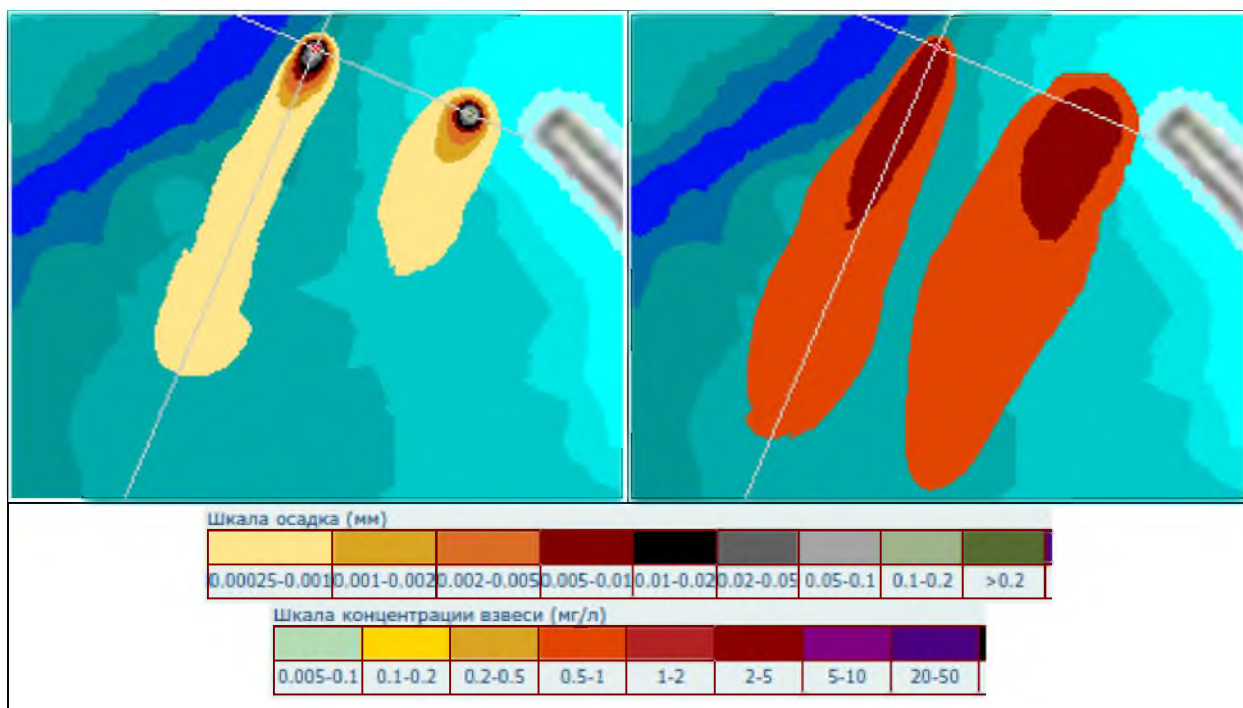


Рисунок 2.9 — Толщина осадка и площади под двумя заданными пороговыми интегральными («протёкшими») концентрациями взвеси, образовавшиеся в результате накопления от выбросов из скважин №1 и №2

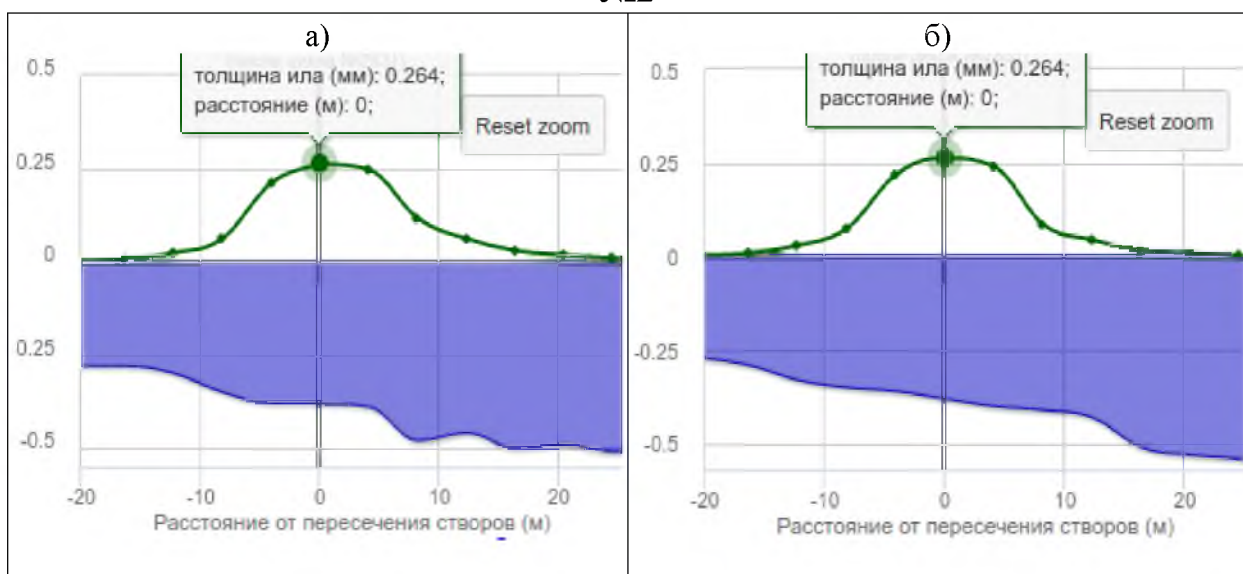


Рисунок 2.10 — Толщина осадка вдоль продольного (а) и поперечного (б) створов, образовавшегося в результате выбросов из скважины №1

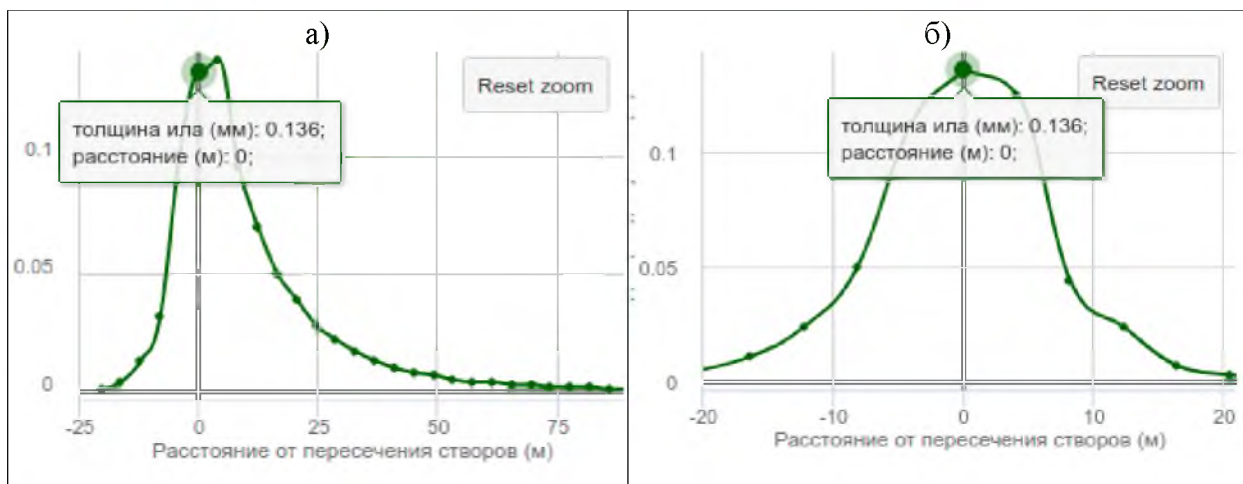


Рисунок 2.11 — Толщина осадка вдоль продольного (а) и поперечного (б) створов, образовавшегося в результате выбросов из скважины №2

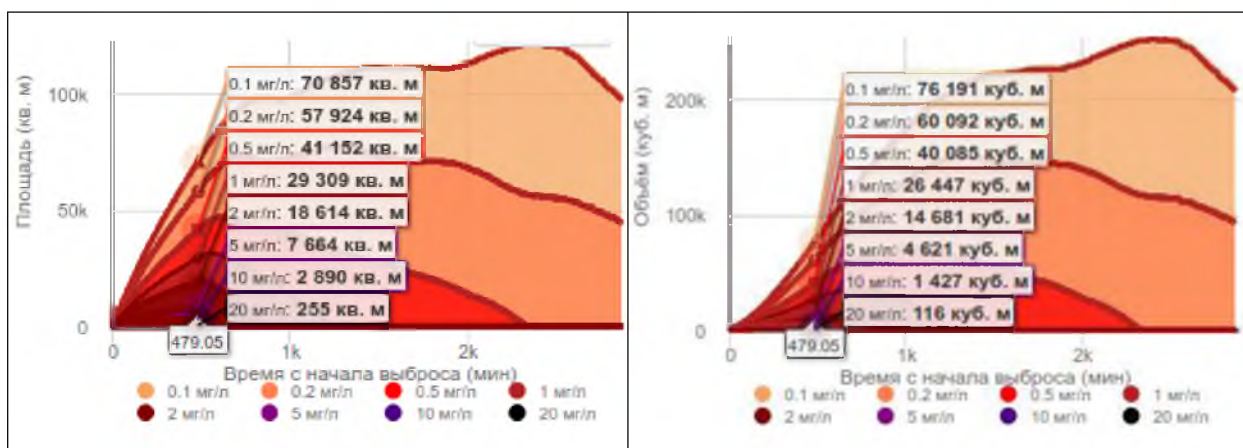


Рисунок 2.12 — Площади и объёмы для заданных пороговых концентраций взвеси, образовавшейся в результате выбросов из скважины №1

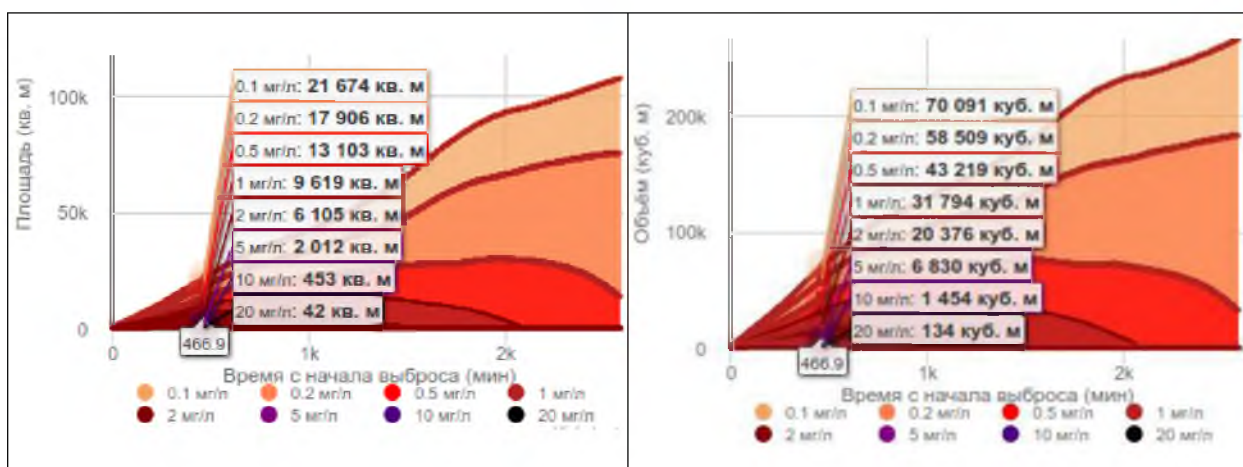


Рисунок 2.13 — Площади и объёмы для заданных пороговых концентраций взвеси, образовавшейся в результате выбросов из скважины №2

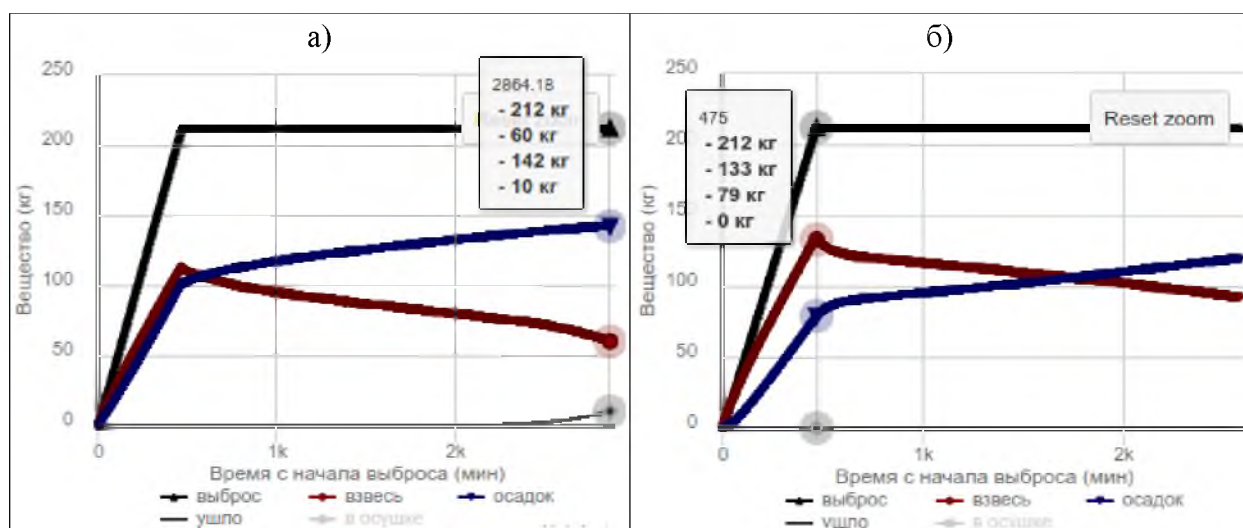


Рисунок 2.14 — Изменение количеств вещества в различных состояниях, при выбросах из: а) скважины №1 и б) скважины №2

Сравнение с аналитическими решениями (1.12) в рамках ГТД-модели (1.10) проводилось при отсутствии и наличии адвекции.

Распределение концентрации взвеси по КА-модели (параметры - по умолчанию) практически не отличается от получаемого по (1.12) при глубинах более 10 м и Δx менее 5 м.

С уменьшением глубины облако становится более плоским, так как сказывается предусмотренное в КА-модели усиление горизонтальной диффузионной составляющей скорости за счет уменьшения вертикальной.

При уменьшении разрешения (при Δx более 5 м) облако закономерно становится более плоским за счет усреднения.

Впрочем, следует признать, поскольку в ГТД-модели допускается изменение параметров A и $K_t(t)$ в достаточно широких пределах [18], то соответствие между моделями получить не трудно.

На многочисленных примерах моделирования показано, что CAD2Q9-SIST воспроизводит отклонения горизонтальной турбулентной диффузии от изотропии, присущие прибрежным зонам [18], что позволяет получать реалистичные характеристики распределения взвеси в таких зонах.

2.3 Сравнение с традиционными методами расчёта загрязнения

В настоящем подразделе рассматриваются результаты имитационного и аналитического расчётов загрязнения при сбросе очищенных сточных вод в р. 2-я Кочеты по исходным из проектной документации на ремонт автодороги в станице Динская Динского р-на Краснодарского края. Имитационное моделирование выполняется с использованием веб-приложения CAD2Q9-SIST, аналитическое – по методу Фролова-Родзиллера (ВНИИ-ВодГЕО).

В соответствии с [2,3] при сбросе сточных вод содержание взвешенных веществ в контрольном створе не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем: на $0,25 \text{ мг/дм}^3$ в водных объектах первой категории и на $0,75 \text{ мг/дм}^3$ в водных объектах второй категории. Контрольные створы должны быть расположены ниже по течению не далее 500 м от источника загрязнения. По данным проектной документации ремонтируемая дорога относится к дорогам III-й категории [4]. Расчётная среднемесячная величина осадков в месте накопления составляет $38,18 \text{ л/с}$.

В этом случае для очистки ливневых вод допускается использовать простейшие очистные устройства типа «BloPlast SOF 40 BP» или эквивалентные с характеристиками [35]:

- производительность водовыпуска – 40 л/с ($0,04 \text{ м}^3/\text{с}$);
- концентрация взвеси после очищения (осветления) не должна превышать $2,9 \text{ мг/дм}^3$;
- размеры частиц в сбрасываемой воде должны быть такими, чтобы скорость их осаждения не превышала $0,4 \text{ мм/с}$ в водотоках и $0,2 \text{ мм/с}$ в водоёмах (возьмём $0,2 \text{ мм/с}$ для нашего случая слабопроточного водного объекта).

Устройства типа «BloPlast SOF 40 BP» относятся к безнапорным типам очистных устройств, когда скорости выпуска осветлённых вод в водоток незначительно отличаются от скорости потока в водном объекте [9]. Источник взвеси – оголовок трубы водовыпуска очистного сооружения, которую можно

отнести к сосредоточенным (точечным) источникам загрязнения.

По сути р. 2-я Кочеты на данном участке – слабопроточный русловой пруд, пересекаемый плотиной, по которому проходит ремонтируемая дорога.

По данным проектной документации среднегодовой расход воды на данном участке реки 2-я Кочеты определяется пропускной способностью водопропускных сооружений под плотиной и составляет $1,20 \text{ м}^3/\text{с}$. Осветлённые сточные воды поступают в русло реки из водопропускных труб под плотиной.

Поэтому можно считать, что источник загрязнения расположен у выходных оголовков водопропускных труб. Производительность очистных сооружений «BloPlast SOF 40 BP» составляет 40 л/с , при этом концентрация взвешенных веществ в очищенном стоке – не более $2,9 \text{ мг/л}$ [35].

Согласно [3] при сбросе сточных вод содержание взвешенных веществ в контрольном створе не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем на: $0,25 \text{ мг/дм}^3$ (высшая и первая рыбохозяйственные категории) и $0,75 \text{ мг/дм}^3$ (вторая рыбохозяйственная категория).

Контрольный створ должен располагаться не далее 500 метров от места сброса сточных вод. Информацию о рыбохозяйственной категории водного объекта можно получить по запросу из государственного рыбохозяйственного реестра (<https://fish.gov.ru/otraslevaya-deyatelnost/organizacziya-rybolovstva/gosudarstvennyj-rybohozyajstvennyj-reestr/>). Из ответа на запрос следует, что исследуемый участок р. 2-я Кочеты относится к рыбохозяйственным объектам второй категории. Таким образом, превышение концентрации в контрольном створе не должно быть более $0,75 \text{ мг/дм}^3$.

Для расчёта течений с использованием веб-приложения CAD2Q9-SIST могут потребоваться данные о ветровом режиме [19,20]. По многолетним данным метеостанции Краснодар (за период 1966÷2021 г.г.), репрезентативной для данного района, здесь преобладает ветер восточного направления со скоростью $2,4 \text{ м/с}$. На основании сведений, представленных выше, в таблицах 2.1÷2.3 сформированы входные данные о поступающей взвеси, используемые далее при моделировании.

Таблица 2.1 — Данные о поступлении взвеси после осветления (очистное сооружение «BloPlast SOF 40 BP»)

Производительность по стоку, л/с	Концентрация после очистки, мг/л	Производительность по взвеси, мг/с
40	2,9	40x2,9=116

Таблица 2.2 - Данные о фракционном составе, гидравлической крупности и содержании мелкодисперсных частиц , попадающих в воду

Размер частиц по градациям, мм ^{*)}	0,15 – 0,05	0,05 – 0,01	0,01 – 0,001
Содержание в грунте, % ^{*)}	25	25	25
Гидравлическая крупность, см/с ^{**)}	$1,9936 \cdot 10^{-2}$		$8,8604 \cdot 10^{-5}$
^{*)} по данным проектной документации; ^{**) для нижней границы градации (по аналогии с примером Ж1 из [5]); при температуре воды 20°C и плотности частиц $\rho_s = 2,65 \text{ т/м}^3$.}			

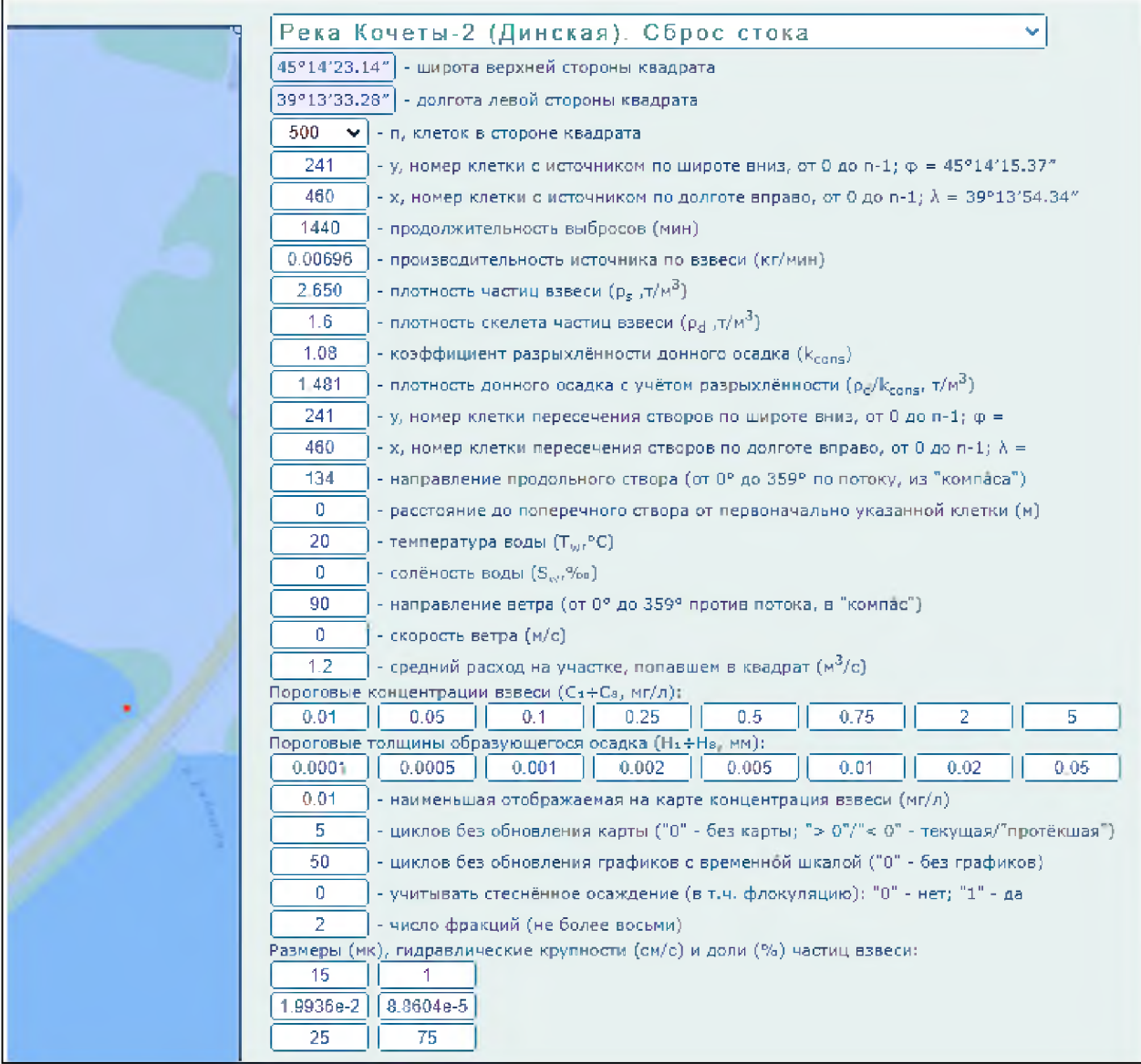
Таблица 2.3 — Плотность образующегося осадка при коэффициенте разрыхления 1,08 ^{*)}

Плотность грунта естественного залегания, т/м ³ ^{*)}	Плотность образующегося осадка, т/м ³ ^{**)}
1,6	1,481
^{*)} по данным проектной документации (берём ρ_d – плотность скелета частиц); ^{**) при коэффициенте разрыхления 1,08 (по аналогии с примером Ж1 из [5])}	

На рисунке ниже показан фрагмент формы веб-приложения с входными данными для моделирования распространения загрязнения. Требуется пояснения поле «продолжительность выбросов» (1440 мин, 1 сутки). Представляется очевидным, что длина шлейфа загрязнённой воды может увеличиваться при увеличении продолжительности выбросов, если во выбросах содержатся медленно осаждающиеся частицы, как в нашем случае (частицы размером 0,001 мм). То же самое относится к зависимости расстояния от продолжительности выбросов, которое будет пройдено облаком загрязнённой воды при прекращении выбросов.

Устройства очистки сточных при продолжительных осадках могут накапливать количества воды, которые затем могут поступать в водный объект в течение продолжительного времени.

В процессе имитационных экспериментов мы будем увеличивать продолжительность выбросов, чтобы определить максимально большой отрезок времени, в течение которого можно сбрасывать осветлённые воды, чтобы не превышать нормативы загрязнения.



Река Кочеты-2 (Динская). Сброс стока

45°14'23.14" - широта верхней стороны квадрата

39°13'33.28" - долгота левой стороны квадрата

500 - n, клеток в стороне квадрата

241 - y, номер клетки с источником по широте вниз, от 0 до n-1; $\varphi = 45^\circ 14' 15.37''$

460 - x, номер клетки с источником по долготе вправо, от 0 до n-1; $\lambda = 39^\circ 13' 54.34''$

1440 - продолжительность выбросов (мин)

0.00696 - производительность источника по взвеси (кг/мин)

2.650 - плотность частиц взвеси ($\rho_s, \text{т/м}^3$)

1.6 - плотность скелета частиц взвеси ($\rho_d, \text{т/м}^3$)

1.08 - коэффициент разрыхлённости донного осадка (k_{cons})

1.481 - плотность донного осадка с учётом разрыхлённости ($\rho_d/k_{\text{cons}}, \text{т/м}^3$)

241 - y, номер клетки пересечения створов по широте вниз, от 0 до n-1; $\varphi =$

460 - x, номер клетки пересечения створов по долготе вправо, от 0 до n-1; $\lambda =$

134 - направление продольного створа (от 0° до 359° по потоку, из "компаса")

0 - расстояние до поперечного створа от первоначально указанной клетки (м)

20 - температура воды ($T_{\text{wt}}, ^\circ\text{C}$)

0 - солёность воды ($S_{\text{wt}}, \text{‰}$)

90 - направление ветра (от 0° до 359° против потока, в "компас")

0 - скорость ветра (м/с)

1.2 - средний расход на участке, попавшем в квадрат ($\text{м}^3/\text{с}$)

Пороговые концентрации взвеси ($C_1 + C_2$, мг/л):

0.01 0.05 0.1 0.25 0.5 0.75 2 5

Пороговые толщины образующегося осадка ($H_1 + H_2$, мм):

0.0001 0.0005 0.001 0.002 0.005 0.01 0.02 0.05

0.01 - наименьшая отображаемая на карте концентрация взвеси (мг/л)

5 - циклов без обновления карты ("0" - без карты; "> 0"/"< 0" - текущая/"протёкшая")

50 - циклов без обновления графиков с временной шкалой ("0" - без графиков)

0 - учитывать стеснённое осаждение (в т.ч. флокуляцию): "0" - нет; "1" - да

2 - число фракций (не более восьми)

Размеры (мк), гидравлические крупности (см/с) и доли (%) частиц взвеси:

15 1

1.8936e-2 8.8604e-5

25 75

Рисунок 2.15 — Фрагмент формы Web-приложения с входными данными для моделирования распространения взвеси в р. 2-я Кочеты

Следует заметить, что в упрощённых методах не предусмотрен учёт продолжительности вбросов, чем подтверждается справедливость

рекомендации применять упрощённые методы лишь для предварительной грубой оценки расчёта загрязнения [9].

Рельеф дна и течения. На рисунке ниже показан рельеф дна участка р. 2-я Кочеты после оцифровки: квадрат со стороной 497м, 500х500 клеток, размер клетки (Δx) – 0,99 м, средняя глубина – 1,32 м, максимальная глубина – 2,0 м, площадь водного зеркала – 72522 м², объём воды – 95862 м³, длина по тальвегу – 554 м.

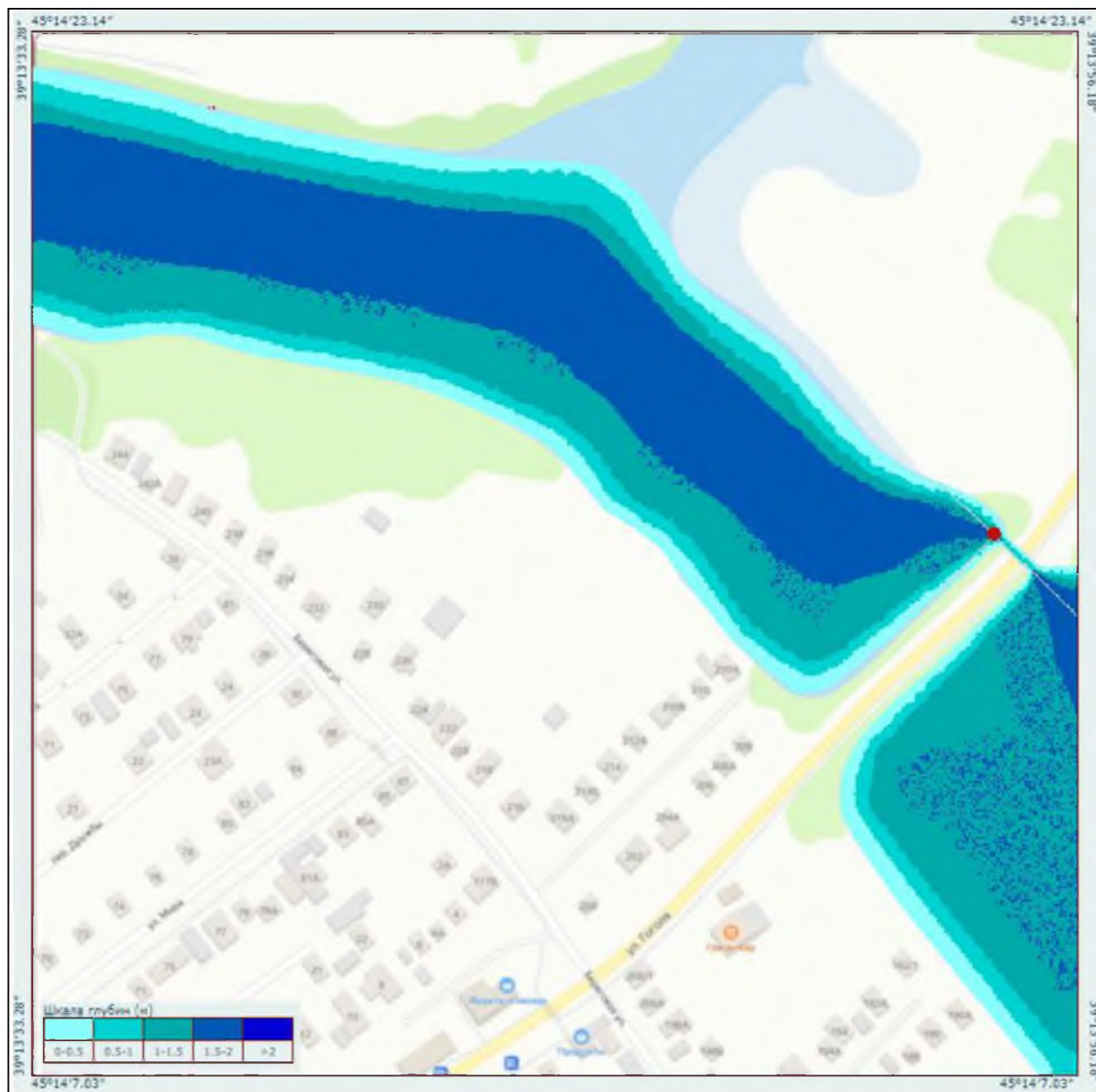


Рисунок 2.16 — Расчётная область после оцифровки глубин. Место выхода воды из водопропускного сооружения обозначено маркером (расположение источника взвеси)

Оцифрованный участок русла используется в качестве расчётной области для моделирования течений и распространения взвеси. Сточные воды вместе с естественным стоком поступают из водопропускных труб под плотиной. При моделировании здесь будет помещён источник взвеси.

На рисунке ниже показано стационарное поле векторов адвекции в реке при расходе воды $1.2 \text{ м}^3/\text{с}$ с рельефом дна, показанным на рисунке 3.2. Ветер не учитывается, чтобы полученные результаты можно было сравнивать с результатами традиционных методов, в которых не предусмотрен учёт ветра.

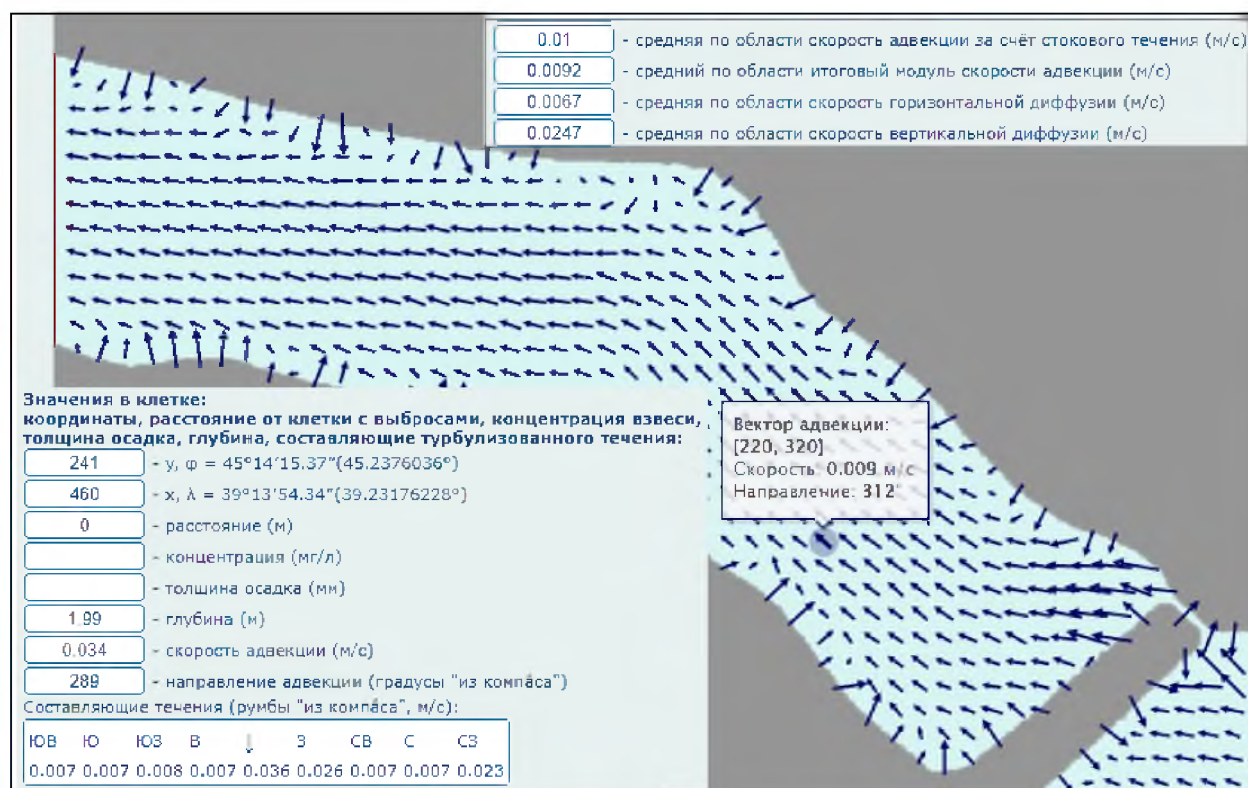


Рисунок 2.17 — Характеристики стоковой составляющей течений

На рисунке показаны также усреднённые характеристики турбулентности потока и локальные характеристики турбулизованного течения в клетке расположения источника взвеси.

Скорости адвекции на поперечных створах (разрезах) показаны на графиках рисунка 2.18.

Один из створов проходит через клетку с выбросами (см. рисунок 2.16), а другой – через клетку 220/320 (рисунок 2.17).

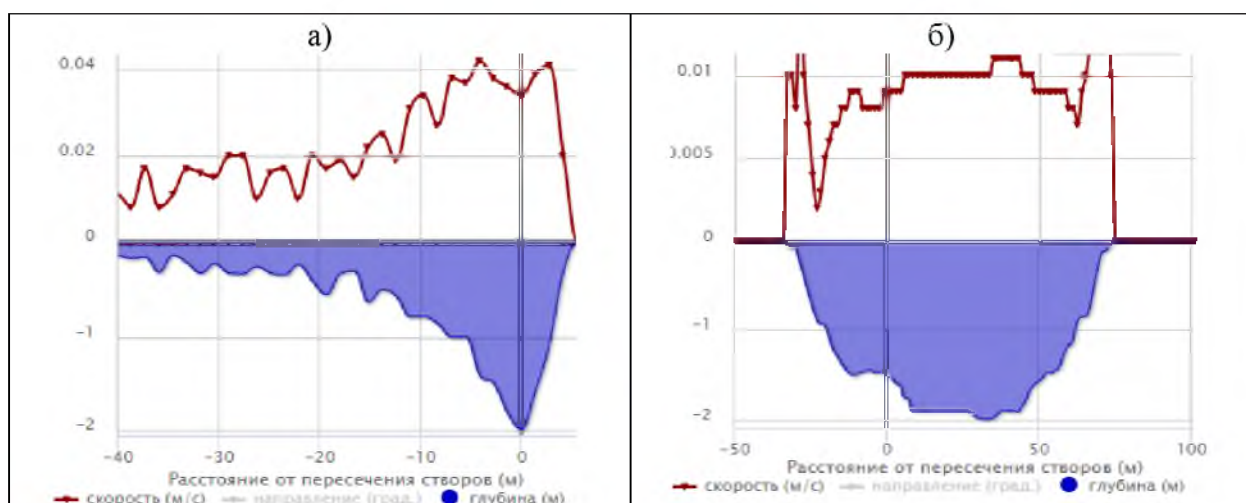


Рисунок 2.18 — Графики скоростей адвекции на поперечных створах, проходящих:

а) через клетку с выбросами; б) через клетку 220/230

Имея поле скорости можно переходить к моделированию распространения загрязнения. Рисунки 2.19 - 2.21 помогут получить представление о динамике поля концентрации взвеси в различные моменты времени после начала вбросов, при суточной продолжительности вбросов (1440 мин).

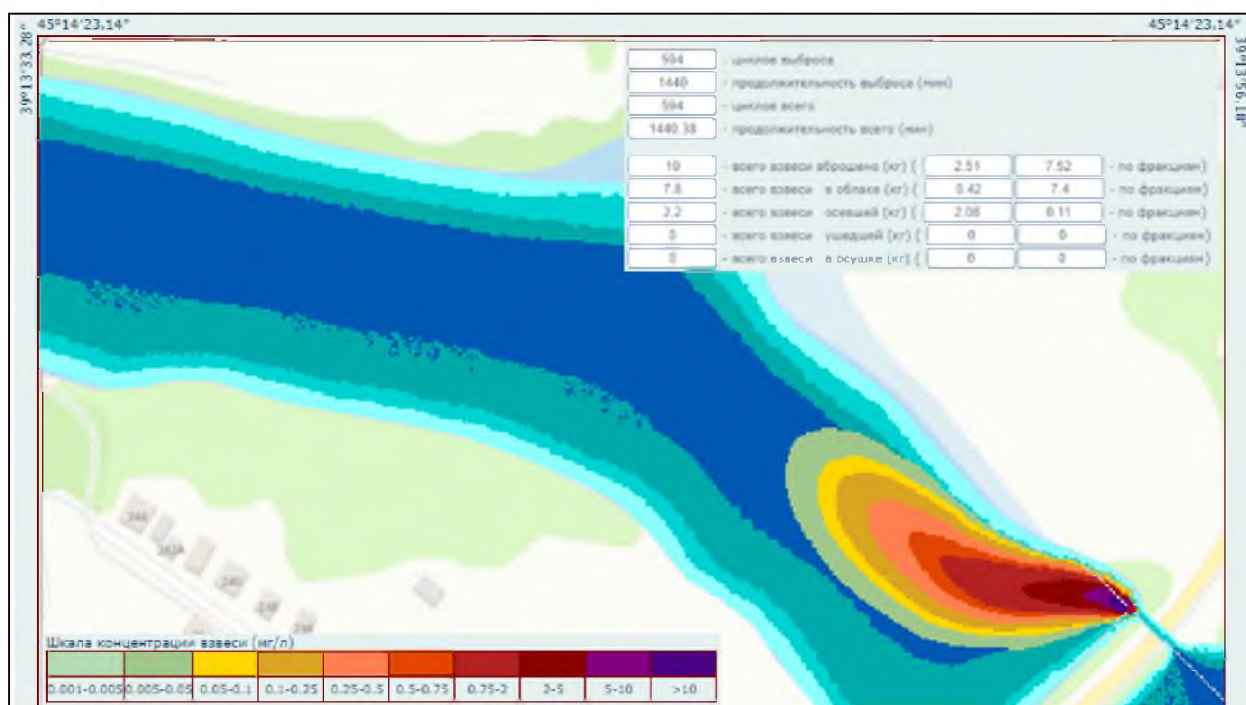


Рисунок 2.19 — Концентрация взвеси в момент окончания вбросов (через 1440 мин после начала). Концентрация 0,75 мг/л распространилась на 84 м от источника.

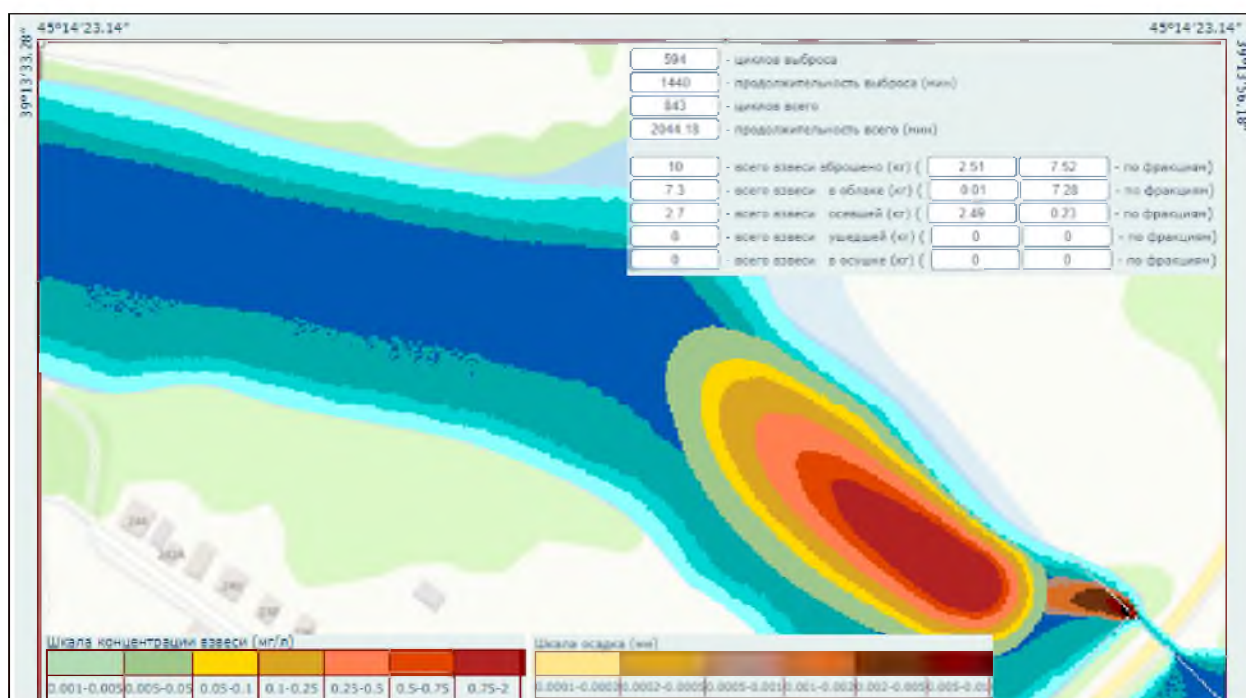


Рисунок 2.20 — Концентрация взвеси через 604 мин после окончания выбросов (через 2044 мин после начала), когда практически полностью выпала в осадок взвесь размером 15 мк.

Концентрация 0,75 мг/л распространилась на 141 м от источника (при суточной продолжительности выбросов).

На рисунке 2.20 зафиксирован момент практически полного осаждения частиц взвеси размером 15 мк, когда в облаке загрязнённой воды по сути содержится лишь взвесь с частицами размером 1 мк.

На рисунке 2.21 показано положение, близкое к наибольшему расстоянию распространения концентрации 0,75 мг/л от источника взвеси (382 м по тальвегу).

В этот момент площадь пятна с концентрацией 0,75 мг/л составляет всего лишь 183 м², а объём воды с такой концентрацией – 349 м³.

Продвинувшись по направлению потока ещё на 12 м критическая концентрация исчезает.

На рисунке 2.22 показано распределение концентрации на продольном и поперечном створах, показанных на рисунке 2.21.

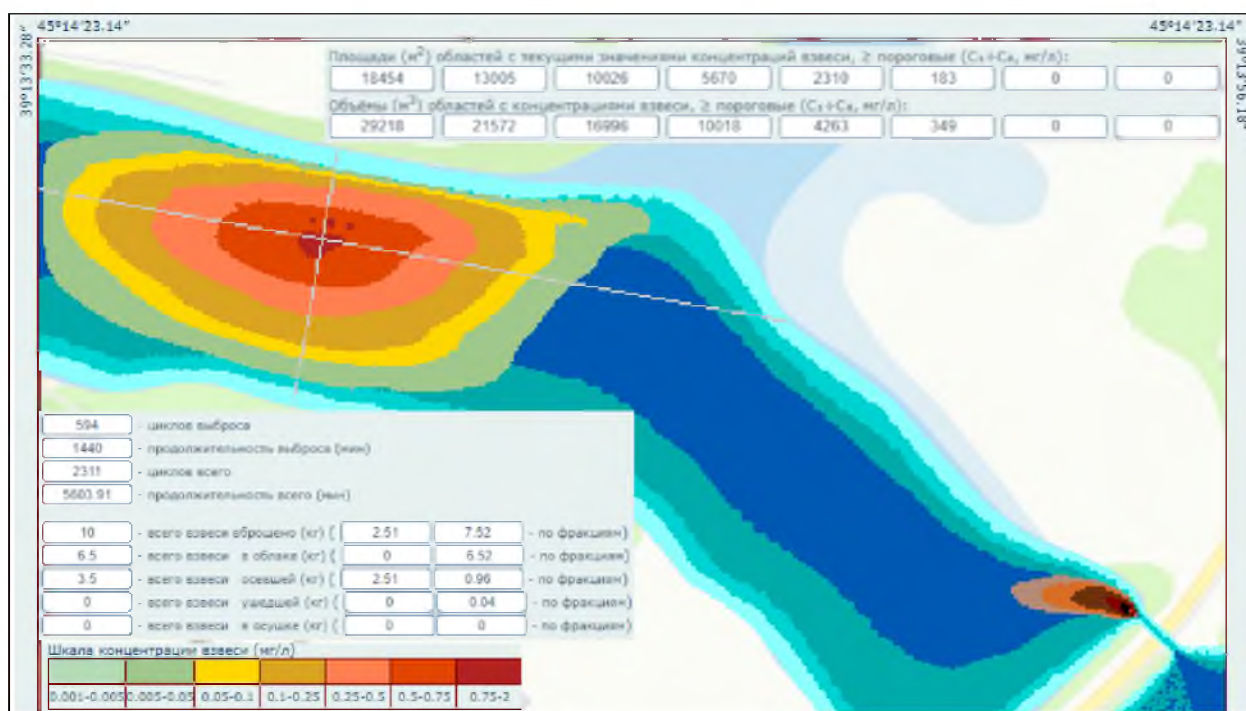


Рисунок 2.21 — Концентрация взвеси через 4164 мин после окончания вбросов (через 5604 мин после начала). Концентрация 0,75 мг/л распространилась на 382 м от источника (при суточной продолжительности вбросов).

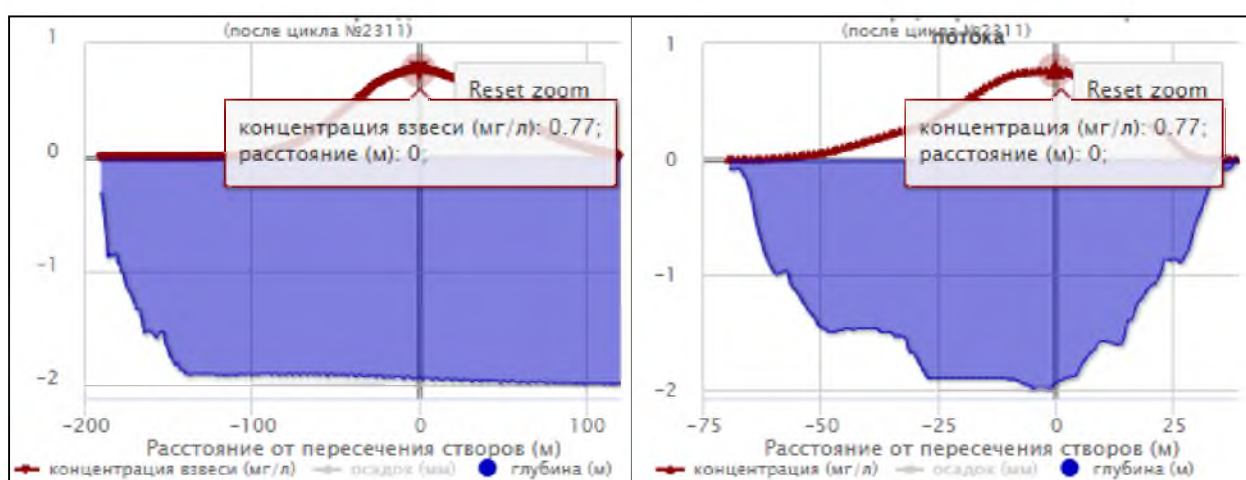


Рисунок 2.22 — Концентрация взвеси на продольном и поперечном створах через 4164 мин после окончания вбросов (через 5604 мин после начала) (при суточной продолжительности вбросов). Пересечение створов расположено в 382 м от источника.

На рисунках 2.23-2.25 показана часть интерактивных графиков, отображаемых в процессе моделирования, которые помогают представить особенности динамики распространения полидисперсной взвеси.

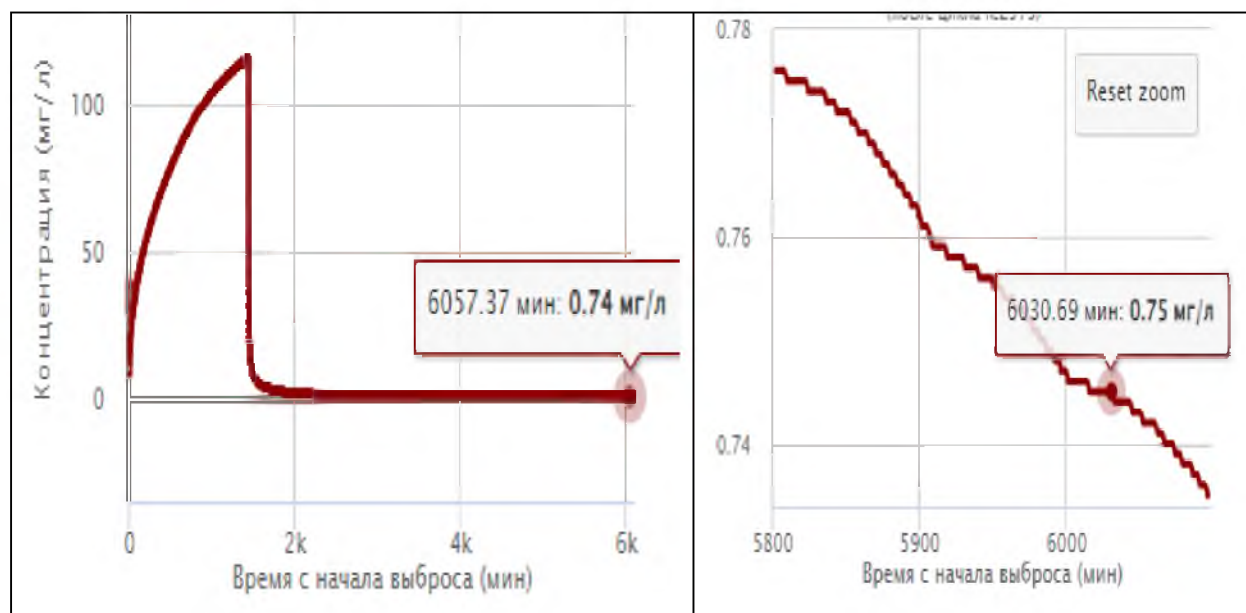


Рисунок 2.23 — Изменение максимальной концентрации в процессе моделирования (при суточной продолжительности выбросов).

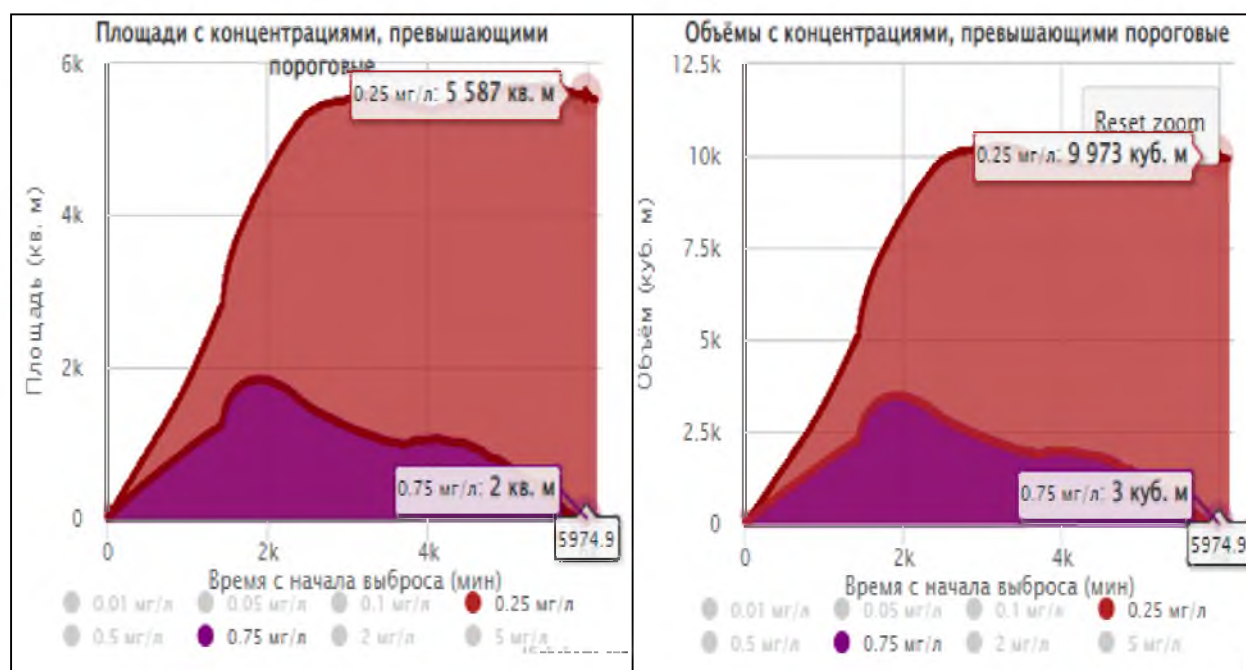


Рисунок 2.24 — Изменение площадей и объёмов воды с различной концентрацией взвеси (при суточной продолжительности выбросов).

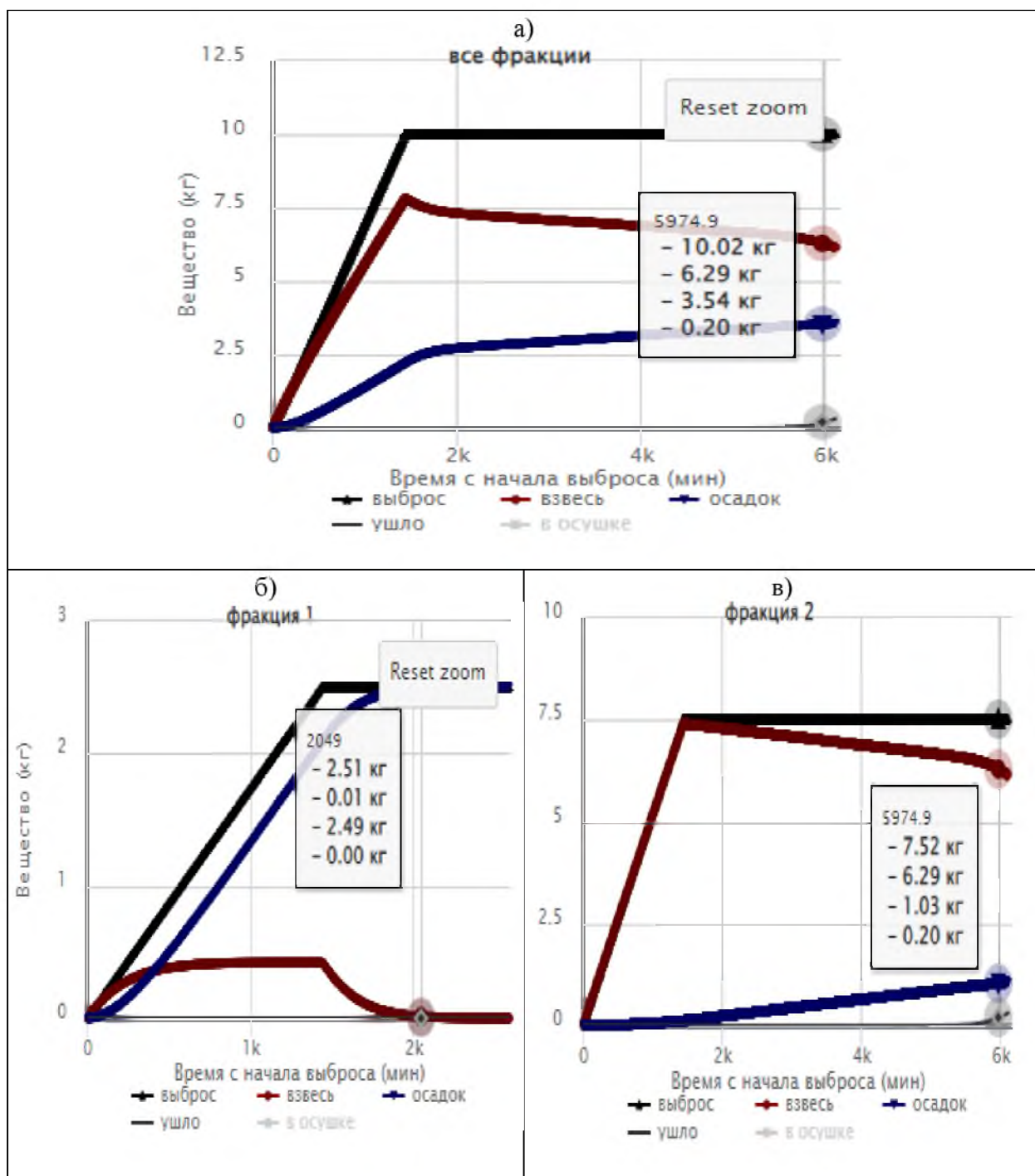


Рисунок 2.25 — Сохранение баланса полидисперсного вещества: а) суммы частиц всех размеров; б) частиц размером 15 мк; в) частиц размером 1 мк (при суточной продолжительности вбросов).

Как изменятся характеристики загрязнения при увеличении продолжительности вбросов до 1,5 суток можно представить по рисункам 2.26-2.29.

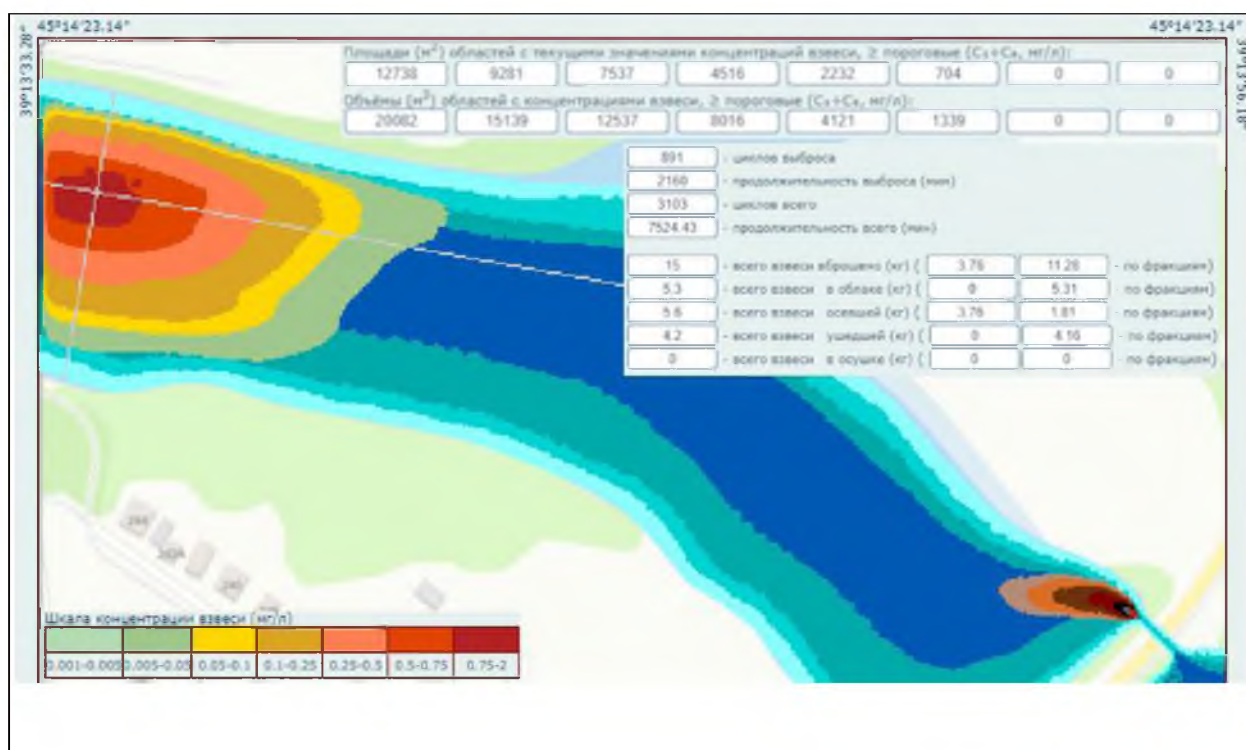


Рисунок 2.26 — Концентрация взвеси через 5364 мин после окончания вбросов (через 7524 мин после начала). Концентрация 0,75 мг/л распространилась на 500 м от источника (при полуторасуточной продолжительности вбросов)

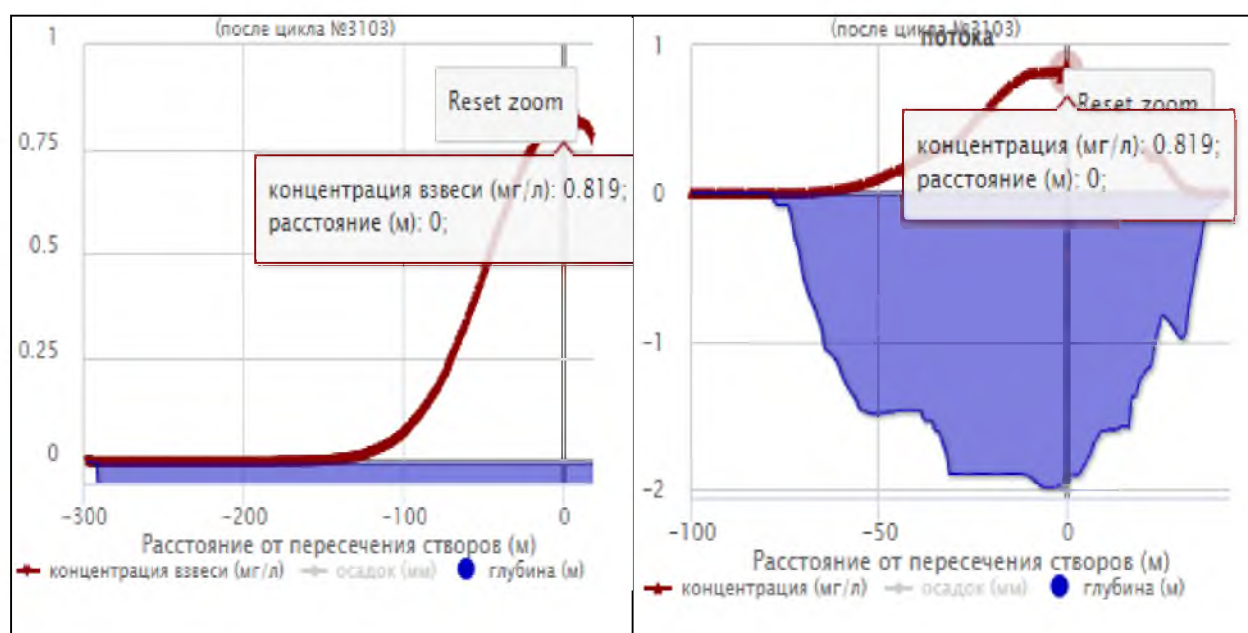


Рисунок 2.27 — Концентрация взвеси на продольном и поперечном створах через 5364 мин после окончания вбросов (через 7524 мин после начала). Пересечение створов расположено в 490 м от источника

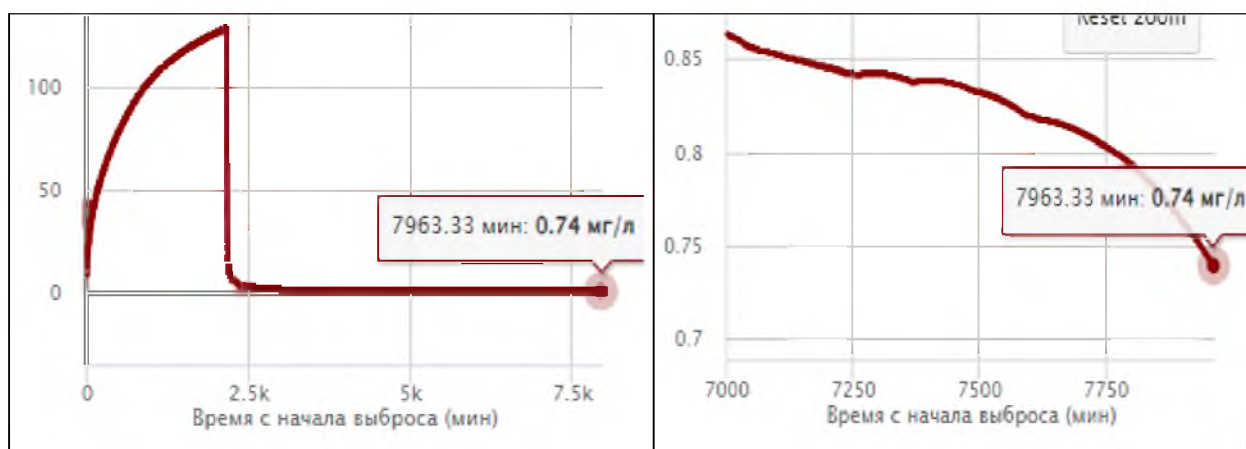


Рисунок 2.28 — Изменение максимальной концентрации в процессе моделирования (при полуторасуточной продолжительности вбросов).

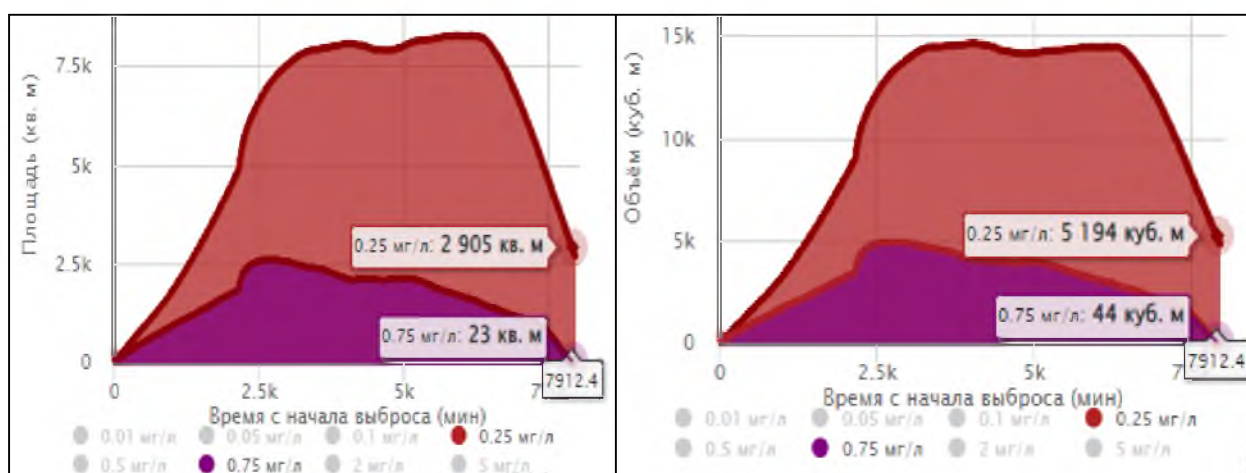


Рисунок 2.29 — Изменение площадей и объёмов воды с различной концентрацией взвеси (при полуторасуточной продолжительности вбросов).

На основании результатов настоящего подраздела можно заключить, что при увеличении продолжительности вбросов сточных вод (данного качества осветления), увеличивается расстояние распространения вод с пороговой концентрацией взвеси ($0,75 \text{ мг/л}$) и при вбросах продолжительностью около полутора суток распространение пороговой концентрации в р. 2-я Кочеты превысит нормативное значение концентрации на поперечном створе, расположенном на удалении 500 м от источника стоков.

Для сравнения с результатами, полученными в предыдущем подразделе, выполним соответствующие расчёты с помощью аналитического метода Фролова-Родзиллера (ВНИИ-ВодГЕО), руководствуясь материалами

методических указаний [9], в которых рекомендуется использовать такие методы для предварительных оценок загрязнения. Обозначения и формулы метода подробно изложены в подразделе 1.2. Входные данные приведены в начале настоящего подраздела.

Итак, требуется определить максимальное значение концентрации $S_{\text{макс}}$ на расстоянии $x = 500$ м от места выпуска сточных вод.

1. Находим коэффициент турбулентной диффузии по формуле (1.5):

$$D = g \cdot H \cdot v_{cp} / (M \cdot C) = (9,8 \cdot 1,32 \cdot 0,01) / ((0,7 \cdot 26,4 + 6) \cdot 26,4) = 0,0002,$$

где $v_{cp} = 0,01$ м/с; $H = 1,32$ м - средняя скорость течения и глубина на рассматриваемом участке по результатам построения рельефа дна (см. подраздел 3.2);

$C = 26,4$ м^{1/2}/с - коэффициент Шези по известной формуле Штриклера-Маннинга ($C = 33 \cdot (H/d_s)$, при $d_s = 5$ мм, по данным о гранулометрическом составе частиц донных отложений из проектной документации).

2. По формуле (1.4) определяем коэффициент α , учитывающий влияние гидравлических условий смешения:

$$\alpha = \xi \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{D/Q_{cm}} = 0,264,$$

где $\xi = 1,5$ (вброс у стрежня);

$\varphi = 554/537 = 1,03$ (о длине реки по тальвегу и по прямой см. подраздел 3.2);

$Q_{cm} = 40$ л/с = $0,04$ м³/с (см. подраздел 3.1).

3. По формуле (1.2) с подстановкой для β по формуле (1.3) определяем коэффициент смешения γ , который показывает, какая часть расхода реки смешивается со сточными водами:

$$\beta = \exp(-\alpha \cdot \sqrt[3]{x}) = \exp(-0,264 \cdot 500^{1/3}) = 0,123;$$

$$\gamma = (1 - \beta) / (1 + \beta \cdot Q_e / Q_{cm}) = (1 - 0,123) / (1 + 0,123 \cdot 1,2 / 0,04) = 0,187,$$

где Q_e - расход воды в реке.

4. Находим кратность разбавления по формуле (1.6):

$$n \approx (Q_{cm} + \gamma \cdot Q_e) / Q_{cm} = (0,04 + 0,187 \cdot 1,2) / 0,04 = 6,61.$$

5. Максимальную концентрацию $S_{\text{макс}}$ на расстоянии 500 м от источника

определяем по соотношению (1.1):

$$S_{\text{макс}} = S_{\text{см}}/n = 2,9/6,61 = 0,44 \text{ мг/л},$$

где $S_{\text{см}}$ – концентрация вбрасываемых сточных вод.

Таким образом, аналитический метод показал существенно более низкое значение концентрации на расстоянии 500 м от источника, то есть более быстрое разбавление. Это не трудно объяснить, зная о приближённости эмпирических коэффициентов аналитических методов, что можно показать на примере скоростного коэффициента Шези, который, в свою очередь зависит от «эффективной шероховатости» (в методе Штриклера-Маннинга - это d_9). При вычислении другими методами получают большое различие между «эффективными шероховатостями» [6] и разница между коэффициентами Шези может достигать 100% [10]. Например, для метода Штриклера-Маннинга возьмём $d_9=0,1$ мм, что вполне приемлемо для илистых грунтов слабопроточных прудов [Караушев]. Тогда C увеличится почти вдвое ($C = 50,73 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$) и максимальная концентрация $S_{\text{макс}}$ на расстоянии 500 м по методу Фролова-Родзиллера превысит критическое значение (будет равна 0,78 мг/л).

Этот пример показывает, что аналитические методы дают достаточно произвольные результаты из-за возможных больших разбросов таких параметров как коэффициент Шези и «коэффициент шероховатости», которые к тому же ещё и зависят друг от друга в пособиях для практических расчётов.

К этому недостатку следует добавить, что в аналитических методах не учитывается седиментация (осаждение) частиц взвеси, и тем более различие в скоростях осаждения частиц различных размеров, которая может существенно изменить результаты, как это было показано при имитационном веб-моделировании.

3 Повышение эффективности веб-имитации

3.1 «Десктопный» вариант веб-приложения

Среди относительно новых технологий применительно к клиентскому имитационному моделированию представляют интерес перенос веб-приложения в качестве настольного (десктопного) на компьютер.

Следует заметить, поскольку наше веб-приложение является одностраничным, то к работе с ним в качестве настольного можно приступить открыв в браузере индексный файл (в нашем приложении - `index.htm`). Однако производительность веб-приложения при таком использовании ничем не будет отличаться от его запуска на веб-сервере, ведь и в том и в другом случае веб-приложение выполняется в среде браузера.

Здесь имеется в виду перенос веб-приложения из среды браузера в среду операционной системы.

У десктопных приложений преимущества состоят в возможности привлечения системных ресурсов компьютера, а у веб-приложений - в меньшей трудоёмкости разработки. Можно совместить эти преимущества путём преобразования веб-приложения в настольную программу. Наиболее часто для такого преобразования используются платформа Node [37] и два фреймворка: Electron и `nw.js`. Когда требуется меньше затрат и усилий, более подходит `nw.js` [38, 39]:

- это платформа, позволяющая разработчикам создавать кросс-платформенные десктопные приложения с использованием веб-технологий, таких как HTML, CSS и JavaScript;
- в нашем случае это позволяет преобразовать веб-приложение в настольное приложение, которые может работать на разных операционных системах без необходимости переписывать код;
- преобразованное веб-приложение можно доработать, получив доступ к ресурсам операционной системы, таким как файловая система, база данных и сетевые возможности;

- мы получаем возможность использования ресурсов Node.js и модулей NPM-репозитория;

- становятся доступны средства простого распространения и установки приложений, поддержка автообновлений.

Вначале устанавливается Node.js, затем - nw.js с помощью npm и после этого начинается работа над веб-приложением с упаковкой его в исполняемый файл с помощью nw.js.

Nw.js объединяет Node.js и Javascript-движок V8, используемый в Chrome, позволяя создавать приложения, которые могут работать как в веб-окружении, так и в нативной среде. Нативная среда – это C++, поскольку Node.js и V8 написаны на этом языке. В Node имеется возможность создавать API для V8 на C++. Можно доработать (преобразовать) веб-приложение, за счёт того, что код на C++ выполняется быстрее, чем код на JS.

Последовательность действий по преобразованию веб-приложения может быть следующей (предполагается, что node.js и npm уже установлены):

- скачиваем с сайта nwjs.io [38] последнюю стабильную версию nw.js (на текущий момент - v0.94.0 NORMAL, бинарный файл с Chromium 131+ Node 22.7.0.), для Linux (использовал Ubuntu 22.04) – `nwjs-v0.94.0-linux-x64.tar.gz`, а для Windows 10 - `nwjs-v0.94.0-win-x64.zip`; затем распаковываем файл в папку проекта и настраиваем доступ глобально, но лучше это сделать из npm: `$ sudo npm install -g nw`;

- для последующей сборки устанавливаем nwbuild (глобально):
`$ npm i -g node-webkit-builder`;

- в папке проекта создаём файл манифеста – это обычный `package.json` для node, в котором: «main»: «index.htm» – индексный файл нашего веб-приложения;

- запускаем наше веб-приложение из консоли, пропуская его через nw:
`$ nw my/web-app`, где `web-app` – папка с веб-приложением.

Преобразование веб-приложения в настольное проходит без каких-либо ошибок. Однако скорость моделирования загрязнения осталась прежней. Это

понятно, потому что используются тот же чистый Javascript и тот же движок V8.

Повышение производительности возможно путём преобразования Javascript-кода в нативный для Node и V8, то есть - в код на C++ [40].

Для компиляции модулей необходимо установить пакет node-gyp. Имеется подробная инструкция по использованию этого пакета [41].

Эксперименты показали, что после преобразования JS-кода в нативный скорость моделирования увеличивается примерно в 2 раза, что намного меньше того, что получено в работе [40], где наблюдалось увеличение в 30 раз. Следует заметить, что эксперименты проводились на простом примере моделирования в небольшой области и всего лишь с одной фракцией. Поэтому этот результат можно рассматривать лишь в качестве принципиальной возможности увеличения вычислительной производительности, а для получения более реалистичных оценок необходимы дополнительные эксперименты.

3.2 Параллелизм, многопоточность и веб-воркеры

КА-модели присуще свойство внутреннего параллелизма, когда вычислительный процесс можно разложить на несколько более простых процессов без каких-либо дополнительных преобразований для этого. Основой для такого свойства является учёт полидисперсности взвеси, при котором перемещение каждого монодисперсного облака смеси происходит независимо друг от друга.

С другой стороны в современных браузерах встроена возможность использовать многоядерность (многопоточность) процессоров для распараллеливания процессов.

Простейший способ повысить вычислительную эффективность веб-моделирования распространения полидисперсной взвеси - запускать программу одновременно в нескольких окнах с моделированием каждого монодисперсного облака в отдельном окне. Таким способом можно ускорить расчёт шлейфа осадка: слой осадка каждого окна сохраняется в базе данных

IndexedDB, а затем все осадки объединяются посредством простой суперпозиции. Следует упомянуть, что этот метод уже реализован в CAD2Q9-SIST. Эксперименты показали, что таким образом расчёт характеристик образующегося осадка при четырёх фракциях взвеси можно ускорить в приблизительно в два раза (процессор Intel core i3-8100 3.6 GHz, четыре однопоточных ядра).

Однако полностью процесс имитации распространения загрязнения в виде двух составляющих, концентрации взвеси и образующегося осадка, таким упрощенным распараллеливанием воспроизвести не удастся. Необходима синхронизация процессов, происходящих в разных окнах.

Ещё один способ распределения независимых процессов по потокам – использовать технологию Web Workers (веб-воркеры).

Вообще говоря существует три типа веб-воркеров:

- 1) Dedicate-workers, выделенные воркеры;
- 2) Shared-workers, разделяемые воркеры;
- 3) Services-workers, сервис-воркеры.

Возможности использования всех трёх типов для тяжёлых вычислений в клиент-серверной архитектуре рассмотрены в работе [42]. Однако для нашей задачи, ограниченной средой браузера, достаточным будет использование выделенных воркеров.

Спецификация выделенных веб-воркеров (HTML5 Web Workers API для Javascript) поддерживается современными браузерами [12, 43] и позволяет выполнять тяжёлые в вычислительном плане и длительные задачи без блокировки потока пользовательского интерфейса. Веб-воркеры позволяют разделить трудоёмкие процессы между несколькими фоновыми потоками и таким образом более эффективно использовать преимущества многоядерных процессоров. Но в нашем случае возникает та же проблема синхронизации процессов, что и при упомянутом выше способе распределения подзадач по разным окнам браузера. Решается эта проблема достаточно просто с использованием JS-API, предоставляемых спецификацией для веб-воркеров, с

подключением IndexedDB при необходимости последующего анализа данных.

Для веб-воркеров существуют ограничения языка Javascript. Но для нас важным является возможность использования JS-функций таймера `setInterval()/clearInterval()`, которые используются в веб-приложении для запуска очередного цикла расчёта полей загрязнения вместо оператора цикла из-за ограничений браузера.

Экземпляры выделенных веб-воркеров с тяжёлым JS-кодом создаются главным процессом. Обмениваться данными с ними может только он. Схема организации обмена данными основного потока с веб-воркером представлена на рисунке 3.1.

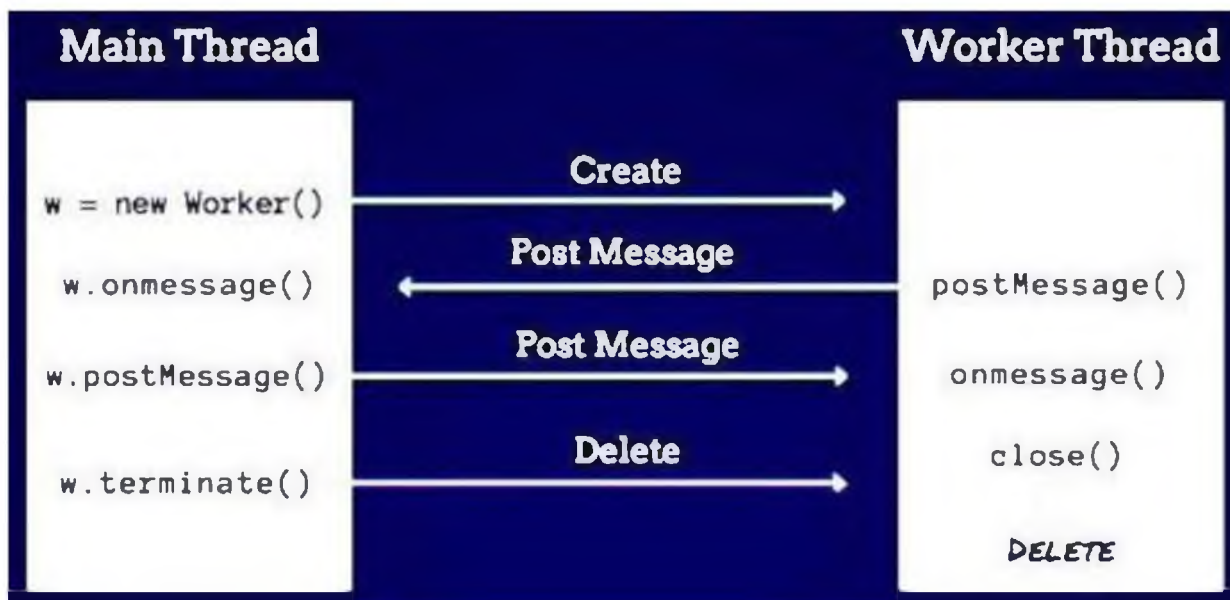


Рисунок 3.1 — Схема обмена данными основного потока с веб-воркерс

Обмен данными JS-кода из среды веб-воркера (Worker Thead) и JS-кода из основного потока в среде браузера (Main Thread) можно представить следующим образом:

- 1) инициализируем Dedicated Worker с помощью конструктора;
- 2) посылаем `postMessage` с данными из Main Thread;
- 3) в Worker Thread срабатывает listener, получаем входные данные;
- 4) Worker выполняет логику веб-приложения;
- 5) Worker с помощью `postMessage` отправляет событие обратно в Main Thread

6) в Main Thread срабатывает listener и усваивается новая порция моделирования.

Алгоритм решения задачи оптимизации веб-приложения с использованием воркеров оказался достаточно простым:

- 1) в веб-приложении на основную страницу устанавливаем кнопки, с помощью которых можно запускать и останавливать процесс моделирования, а также возможность указать количество используемых потоков. С использованием метода `post.Message()` предусматриваем отправку JS-объекта, содержащего двумерные массивы начальных значений концентрации с вбросами заданной фракции, осадка и глубин;
- 2) «тяжёлый» JS-код, рассчитывающий массивы (двумерные поля) концентрации и толщин осадка по каждой фракции помещается в свой воркер. Для этого создаётся экземпляр объекта `Worker`, которому передаётся URL-адрес соответствующего Javascript-файла

```
function initWorker(src) {  
    let worker = new Worker(src);  
    worker.addEventListener("message", messageHandler, true);  
    worker.addEventListener("error", errorHandler, true);  
}
```

- 3) в воркере ведётся собственный подсчёт циклов клеточного автомата. В заданные моменты (через заданное количество циклов) каждый воркер отправляет данные (`w.postMessage`) на основную страницу;
- 4) на основной странице, как только поступают данные последнего воркера, то данные всех воркеров для одинакового времени (числа циклов) складываются (суперпозиция), отображаются (real-time) и записываются в IndexedDB для последующего анализа.

Эксперименты проводились в Google Chrome (v.131) на компьютере с Intel core i3-8100 3.6 GHz. Такой процессор содержит четыре однопоточных ядра, поэтому задавалось не более четырёх потоков, кроме этого соблюдались следующие условия:

- взвеси содержали фракции четырёх размеров;

- задавались крупные частицы с большой скоростью осаждения (чтобы ускорить каждое моделирование и длительность экспериментов в целом);
- расчёты по каждой фракции продолжались до полного осаждения (когда во взвешенном состоянии остаётся всего лишь 2% вещества);
- глубина водоёма задавалась постоянной (при возрастании перепадов глубины увеличивается длительность моделирования);
- расчётная область задавалась в виде квадрата со стороной n клеток. Эксперименты выполнены для пяти n : 10, 50, 100, 250 и 500, при этом запись в IndexedDB не производилась.

Результаты, характеризующие возможности оптимизации, представлены на рисунках 3.2 и 3.3 (по оси X - n , по оси Y – время в секундах).

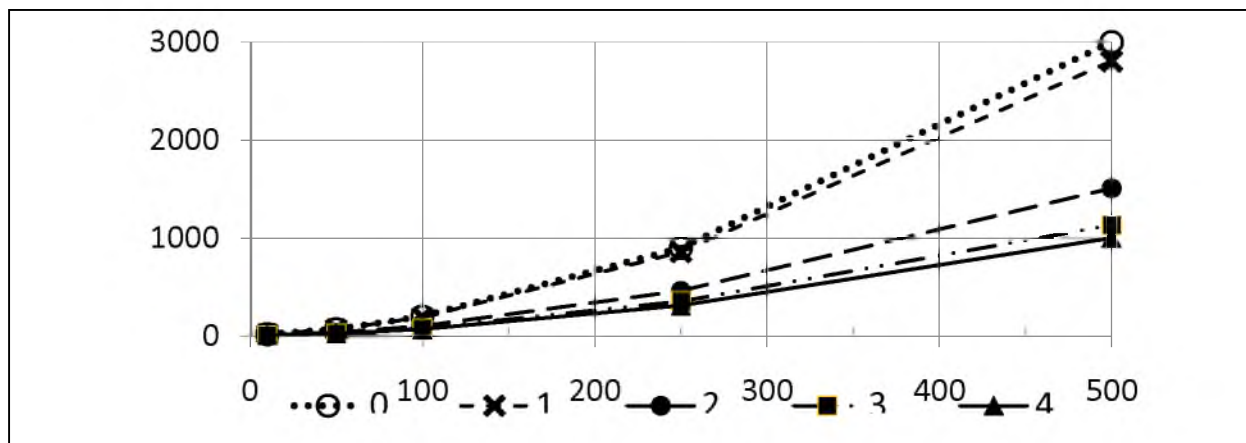


Рисунок 3.2 — Длительность имитации при разном числе веб-воркеров

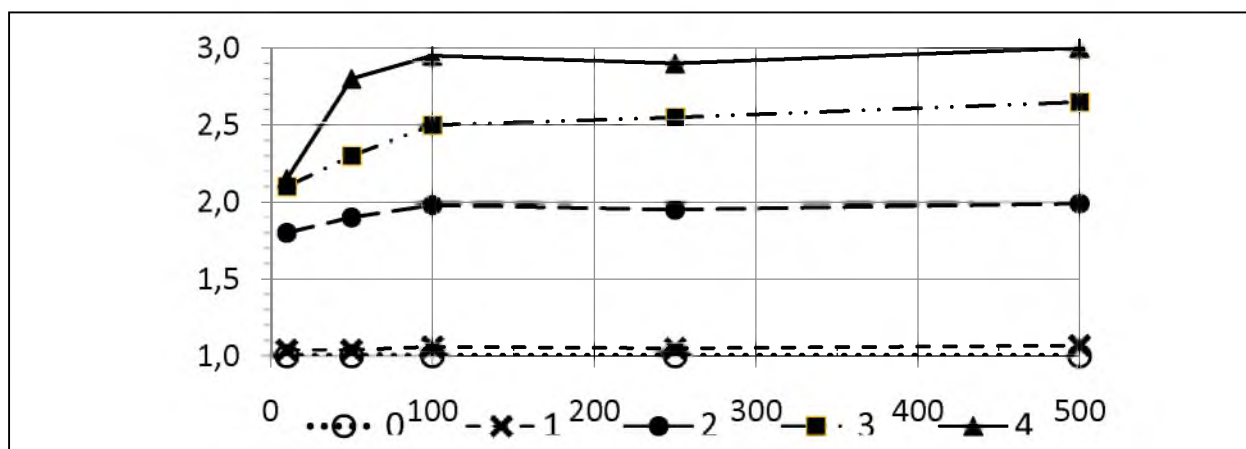


Рисунок 3.3 — Коэффициент ускорения при разном числе веб-воркеров

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что целесообразность использования нескольких воркеров возрастает с ростом объема вычислений, задаваемых параметром n (размер квадрата области моделирования). При больших объёмах вычислений увеличение числа воркеров даёт прирост в скорости моделирования в три раза.

3.3 Экономическая эффективность веб-моделирования

Экономическую эффективность результатов работы выполненной в рамках настоящего исследования можно оценить путём сравнения показателей до оптимизации и после оптимизации веб-приложения. При этом принимаем, что оптимизация приводит к троекратному ускорению выполнения работы.

Стоимость работ имитационного (математического) моделирования по одному пресноводному водному объекту можно взять из прейскуранта ФГБНУ ВНИРО (Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии) по адресу: https://azniirkh.vniro.ru/upload/files/service/2024/pril_1.pdf, которая составляет 56877,5 руб. (без НДС 20 %).

В настоящее время услуги по имитационному моделированию с использованием приложения на основе КА-модели и по ценам прейскуранта выполняет АзНИИРХ (филиал ВНИРО), о чём можно убедиться из (дело № А32-3561/2021): <https://sudact.ru/arbitral/doc/ZEYv7ZBpteJ8/>, а также ряд коммерческих организаций экологического профиля в Краснодаре: ООО «Аква-Биоресурсы, ООО «Чистая планета» и др. Средний срок моделирования – 1 месяц.

Таким образом, каждая из организаций пользуясь веб-приложением на основе КА-модели имеет возможность выполнить 12 заказов по моделированию в течение одного года.

Используя оптимизированную версию веб-приложения организация имеет возможность выполнять в течение года 36 заказов.

Показателем экономической эффективности оптимизированной версии

веб-приложения может служить выгода в денежном выражении для одной экологической организации за один год:

Выгода/год, руб. = выручка после оптимизации – выручка до оптимизации
 $= (56877,5 \times 36) \text{ руб.} - (56877,5 \times 12) \text{ руб.} = 2047590 \text{ руб.} - 682530 \text{ руб.} = 1365069$
руб. или: выгода за месяц (за один заказ) $= 1365069/12 = 113755 \text{ руб.}$

Заключение

Web-технологии в настоящее время используются в самых разных областях повседневной деятельности, в том числе связанных с обработкой геопространственных данных. В то же время web-приложения для имитационного (математического) моделирования пространственного распределения загрязнения ещё не получили должного распространения.

В настоящей работе рассматриваются особенности работы с одним из существующих web-приложений, предназначенным для имитационного моделирования пространственного распределения загрязнения взвешенными веществами (взвесьями) в мелководных объектах небольших размеров. Необходимость разработки такого более «лёгкого» приложения вызвана тем, что традиционное использование для моделирования загрязнения в таких водоёмах более сложных программ, основанных на численных моделях гидродинамики, слишком трудоёмко для экологических организаций. В связи с этим экологи иногда вынуждены выполнять расчёты с использованием упрощённых аналитических формул, хотя их разрешается использовать лишь для предварительных оценок.

В первом разделе настоящей работы рассматриваются проблемы, связанные с имитационным моделированием течений в двумерной постановке и транспортировкой взвешенных веществ, переносимых этими течениями. Рассматривается существующий вариант более упрощённого подхода к имитационному моделированию, основанному на клеточных автоматах (КА-модель). В КА-модели для решения двумерной задачи распределения скоростей турбулентного течения используется механизм CAD2Q9 (два измерения, девять соседей).

Второй раздел посвящён рассмотрению особенностей веб-реализации КА-модели. Техническая особенность рассматриваемого веб-приложения состоит в том, что оно работает в среде клиента (браузера) без использования средств сервера. Для программирования используется язык Javascript.

Оказывается, что вычислительной мощности Javascript-движков современных браузеров сегодня достаточно для решения ресурсоёмких вычислительных задач.

К достоинствам рассматриваемого web-приложения следует отнести возможность его использования на бюджетных компьютерах и планшетах с вычислительной эффективностью, позволяющей проводить быстрые имитационные эксперименты. В настоящей работе приведены результаты таких экспериментов при определении характеристик загрязнения стоками со взвесями, поступающими в слабопроточный пруд. Сравнение с аналитическим методом Фролова-Родзиллера (ВНИИ-ВодГЕО), позволило продемонстрировать недостатки таких упрощённых методов, основанных на коэффициентах разбавления (смещения). Показано, что необходимо учитывать полидисперсность поступающей взвеси. Недоучёт скорости осаждения частиц приводит к слишком грубым результатам.

Таким образом результаты второго раздела настоящей работы позволили сделать вывод, что для моделирования загрязнения в мелководных водоёмах целесообразно использовать рассматриваемое веб-приложение с одной стороны вместо упрощённых аналитических методов, а с другой - вместо трудоёмких программ, основанных на численных аппроксимациях уравнений гидродинамики.

В третьем разделе рассматривается возможность оптимизации рассматриваемого клиентского веб-приложения. Необходимость в этом возникает в связи с тем, что эта программа разрабатывалась на «нативном» (или чистом) Javascript без использования новшеств, появившихся после внедрения ECMAScript 2015 (ES6). Достоинство такого подхода – независимость от сторонних библиотек и плагинов, страдающих нестабильностью и наличием ошибок, тогда как чистый Javascript и его функционирование в среде браузера не меняется вот уже более 30 лет. С другой стороны, относительно недавно появились новые веб-технологии за счёт использования которых можно

существенно повысить вычислительную эффективность клиентского имитационного моделирования.

В настоящей работе отобраны для рассмотрения две технологии, использование которых позволяет наиболее эффективно оптимизировать данный вариант веб-приложения:

- 1) преобразование веб-приложения в десктопное с использованием фреймворка `nw.js`, переводящего приложение в среду выполнения Node с Javascript-движком V8, с последующей перекомпиляцией Javascript-кода в код на C++, нативный язык V8;
- 2) распараллеливание выполнения веб-приложения по выделенным веб-потокам (Web Workers), что позволяет более производительно использовать многоядерность процессоров.

Результаты экспериментов позволили сделать выводы о возможности двукратного повышения скорости работы рассматриваемого веб-приложения с использованием первой технологии. Эксперименты со второй технологией показали трёхкратное увеличение скорости. Эти выводы указывают на продуктивные направления для приложения усилий по исследованию возможности оптимизации веб-приложений рассматриваемого типа.

Увеличение скорости работы веб-приложения в три раза даёт возможность региональным экологическим организациям пропорционального увеличения выполнения количества заказов на моделирование от заинтересованных предприятий. Расчёт по действующему прейскуранту показывает, что только одна экологическая организация может получать дополнительно 113,755 тыс. руб. в месяц или 1365 тыс. руб. за год.

Список литературы

1. Методика исчисления размера вреда, причинённого водным биологическим ресурсам. Утв. приказом Минсельхоза РФ от 31.03.2020 №167. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/...> (дата обращения: 14.12.2024)
2. Приказ Минприроды РФ от 29.12.2020 г. № 1118 (с изменениями на 18 мая 2022 года). «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты для водопользователей». [Электронный ресурс]. URL: [http:// rpn.gov.ru/upload/iblock/c04/.../Prikaz-Minprirody-](http://rpn.gov.ru/upload/iblock/c04/.../Prikaz-Minprirody-) [http:// publication.pravo.gov.ru/Document/View/...](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/...) (дата обращения: 14.12.2024)
3. Приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016г. №552 (с изменениями на 10 марта 2020 года) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». [Электронный ресурс]. URL: [http:// normativ.kontur.ru/document...](http://normativ.kontur.ru/document...) (дата обращения: 14.12.2024)
4. ОДМ 218.8.005-2014. Методические рекомендации по содержанию очистных сооружений на автомобильных дорогах. Росавтодор // М.: 2014. [Электронный ресурс]. URL: [http:// files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/4293751647.pdf](http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/4293751647.pdf) (дата обращения: 15.12.2024)
5. СТО 52.08.31-2012. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учёт руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. // СПб, ФГБУ «ГГИ», 2012.- 134 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://omegametal.ru/Index2/1/4293755/4293755870.htm> (дата обращения: 16.12.2024)
6. Барышников, Н.Б. Гидравлическое сопротивление речных русел. - СПб, изд. РГГМУ, 2003. -147 с.
7. Боровков, В.С. Русловые процессы и динамика речных потоков на

урбанизированных территориях. Л.: Гидрометеиздат, 1989. -286 с.

8. Волынов, М.А. Влияние плановой геометрии речного русла на диффузию и дисперсию примеси // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6-3. – С. 535-540.

9. Караушев, А.В., Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод [Книга]. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 176с.

10. Копалиани, З.Д, Жук, М.М. О перспективах создания методов оценки гидрологических и гидравлических характеристик неизученных рек на основе гидроморфологических зависимостей // - СПб.: РГГМУ, - № 5.- 2007- С. 86-97.

11. Котеров, В.Н. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Горизонтальное рассеяние. / В.Н. Котеров, Ю.С. Юрезанская // Журн. выч. матем. и мат. физ. - Т. 50 - № 2. -2010. - С. 375-387.

12. Лабберс, П. HTML5 для профессионалов / П. Лабберс, Б. Олберс., Ф. Салим// - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. - 272 с.

13. Лебедев, Д.И. Web-приложение с элементами геоинформационных технологий (на примере программы для оцифровки батиметрии водного объекта) / Бакалаврская работа. РГГМУ (филиал в г. Туапсе), 2023 - 46 с.

14. Лобанов, А.И. Модели клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. - 2010. - Т. 2, № 3. - С. 273-293.

15. Лятхер, В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование // - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 392 с.

16. Мальцев, К.А. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): учеб. пособие / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова. – Казань: Казанский университет, 2014. – 103 с.

17. Озмидов, Р.В. О зависимости коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии в ветровых течениях от относительной глубины водоёма. - Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1959 - №8 - С. 164-181.

18. Озмидов, Р.В. Диффузия примесей в океане. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 279 с.
19. Полупанов, В.Н. Имитационная модель загрязнения взвешенными веществами мелководных водных объектов / В.Н. Полупанов // сб. ст. по материалам ХСВ Международной научно-практической конференции «Инновационные подходы в современной науке». – № 11(95). – М., Изд. «Интернаука», 2021.
20. Полупанов, В.Н. Программный комплекс «CAD2Q9-SIST». Свид-во о рег. программы для ЭВМ RU 2021611187. Патентное ведомство: Россия, 2021.
21. Пухтяр, Л.Д. Турбулентные характеристики прибрежной зоны моря. / Л.Д. Пухтяр, Ю.С. Осипов. // Труды ГОИН. — 1981. — Вып.158. — С. 36-41.
22. Скребков, Г.П. Метод расчёта распределения скоростей по ширине слабodeформированного участка реки// Метеорология и гидрология- №3 -1972. - С. 75-81.
23. Судольский, Р.В. Динамические явления в водоемах // Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 263 с.
24. Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. / Т. Тоффоли, Н. Марголус. — М.: Мир, 1991. — 280 с.
25. Флэнаган Дэвид. Javascript. Полное руководство. 7-е изд. 2021. - 720 с.
26. Shepard, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data / ACM National Conference. Harvard College Cambridge, Massachusetts, 1968). – pp. 517-524.
27. Van Rijn, L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas / Leo C. van Rijn – Amsterdam: Aqua Publication – I11. 1993, p.690.
28. Wolf-Gladrow D. A. A lattice Boltzmann equation for diffusion // Journal of Statistical Physics. — 1995. — Vol. 79, No 5–6. — P. 1023–1032.
29. Документация QGIS 3.28. [Электронный ресурс]. URL: <https://qgis.org/ru/docs/index.html> (дата обращения 20.10.2024).

30. Использование IndexedDB [Электронный ресурс]. - URL: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/API/IndexedDB_API/Using_IndexedDB (дата обращения 26.05.2024).
31. GeoJSON. [Электронный ресурс]. – URL: <https://geojson.org/> (дата обращения 20.10.2024).
32. Introducing JSON. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.json.org/json-en.html> (дата обращения 20.10.2024).
33. HIGHCHARTS [Электронный ресурс]. – URL: <http://highcharts.com> (дата обращения 20.10.2024).
34. NW.js [Электронный ресурс]. - URL: <https://nwjs.io/> (дата обращения 20.10.2024).
35. Ливневые очистные сооружения «BLOPLAST SOF 40 BP» [Электронный ресурс]. - URL: <https://blorey.tmweb.ru/produktsiya/208/livnevye-ochistnye-sooruzheniya-bloplast-sof-40-bp/> (дата обращения 20.10.2024).
36. Моделирование загрязнения мелководных зон [Электронный ресурс]. - URL: <https://pvn.org.ru/> (дата обращения 20.10.2024).
37. Янг Алекс, Мек Б., Кантелон М. Node.js в действии / Алекс Янг, Брэдли Мек, Майк Кантелон, 2-е изд. — СПб.: Питер, 2018. — 432 с.
38. Nw.js [Электронный ресурс]. - URL: <https://nwjs.io/> (дата обращения 20.12.2024).
39. Десктопные приложения на html, css и js для winows, mac os, linux. Подробный обзор nw.js (бывший node-webkit) – URL: <https://html5.by/blog/nwjs/> (дата обращения 20.12.2024).
40. Node.JS приложения с почти нативной производительностью URL: <https://dzen.ru/a/X3SDDqS1XxqRlaWe> (дата обращения 20.12.2024).
41. Nodejs / node-gyp. URL: <https://github.com/nodejs/node-gyp> (дата обращения 20.12.2024).
42. Костяков И. Многопоточность на фронте: абсурд или прекрасное

архитектурное решение. URL: <https://habr.com/ru/articles/701914/> (дата обращения 20.12.2024).

43. W3C / Web Workers. URL: <https://www.w3.org/TR/2021/NOTE-workers-20210128/> (дата обращения 20.12.2024).