

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА БУХТЫ ВОЕВОДА**Катрасов С. В., Бугаец А. Н., Жариков В. В.,***Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, г. Владивосток*

Аннотация. С помощью модели Delft3D Flow выполнено численное моделирование гидродинамического режима бухты Воевода (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море). Руслевой и распределенный приток с примыкающих к акватории бухты территорий смоделирован с помощью гидрологической модели SWAT. Результаты моделирования для каждой ячейки расчетной сетки и каждого расчетного σ -слоя представлены в виде временных рядов солености и горизонтальных компонент скорости течения, на их основании построены пространственные распределения обеспеченных значений скорости течения и солености.

Ключевые слова: моделирование, гидродинамический режим, карты обеспеченных значений.

MODELING OF THE HYDRODYNAMIC REGIME OF THE VOEVOD BAY**Katrasov S.V., Bugaets A.N., Zharikov V.V.***Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

Abstract. Delft3D Flow model was applied to simulation of the hydrodynamic regime of Voevoda Bay (south Primorye, Russki Island, Peter the Great Bay, Russia). The streamflow and distributed inflow from the territories adjacent to the bay is modeled using the SWAT hydrological model. The simulation results for each the computational grid cell and each calculated σ -layer are presented in the form of time series of salinity and horizontal components of the current velocity; on their basis, the spatial distributions of the probability of exceedance for salinity and current velocity are constructed.

Keywords: modelling, hydrodynamic regime, probability of exceedance, spatial distributions.

Введение.

Части и компоненты береговых геоструктур являются основным связующим звеном в контактных географических структурах, формирующихся в зоне стыка «суша–море». Сложные связующие функции элементов береговых геоструктур пока изучены недостаточно [1]. Современная методическая основа и информационное обеспечение подобных исследований пока находятся в стадии формирования и разработки. На современном этапе до сих пор широко применяются методы, основанные на эмпирических и полуэмпирических зависимостях и соотношениях. Имеющиеся данные, в частности, экологического и гидрометеорологического мониторинга, характеризуются фрагментарностью и недостаточной репрезентативностью необходимой для развития и выполнения ранжированных оценок ресурсных свойств и обоснованных выводов о приоритетности возможных видов прибрежно-морского природопользования [1]. В данном исследовании на примере бухты Воевода (о. Русский, Японское море, рис. 1) продемонстрирована возможность расчета параметров гидродинамического режима бухты с учетом влияния стока с прибрежной территории.

Материалы и методы.

В качестве методической основы исследования использованы две модели:

–гидрологическая – модель формирования стока на водосборе бухты, SWAT (<https://swat.tamu.edu/>) [11];

–гидродинамическая – модель динамики гидрологических параметров бухты, Delft3D-Flow (<https://www.deltares.nl/en/>) [12, 14].

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) – гидрологическая модель с непрерывным временным циклом, может быть охарактеризована как физическая, описывает основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почвы, образование и таяние снежного покрова, формирование поверхностного, внутрипочвенного и грунтового стока [9]. В качестве входной информации модель использует только данные метеорологических наблюдений: количество атмосферных осадков, суточные данные об относительной влажности и температуре (максимальной и минимальной) воздуха, скорости ветра, солнечной радиации.

Delft3D Flow – трехмерная модель гидродинамических процессов [12, 14], разработана нидерландским исследовательским институтом Deltares, имеет открытый исходный код, широко применяется в мире для решения различных гидролого-экологических задач. Расчет параметров течений выполняется на основе численного решения уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска.

В работе использован исходный код модели SWAT 2012 v.637. Подготовка моделирования выполнена с помощью ГИС-интерфейса ArcSWAT с использованием цифровой модели рельефа SRTM30, ландшафтной карты острова [5], включающей информацию о типах почв и растительности. База данных гидрологических свойств почв сформирована по данным литературных источников [8]. Речной бассейн, согласно представлениям о естественных характеристиках склонов и водотоков (длинах и уклонах) [6], разделен на частные водосборы размером ~1-2 км². Расчет потенциального испарения выполнен методом Пенмана-Монтейса, русловой трансформации – методом кинематической волны. Параметры модели были заданы по принципу ландшафтного сходства на основе ранее полученных результатов исследований гидрологического цикла малых водосборов на юге Приморья [4, 10, 13, 15].

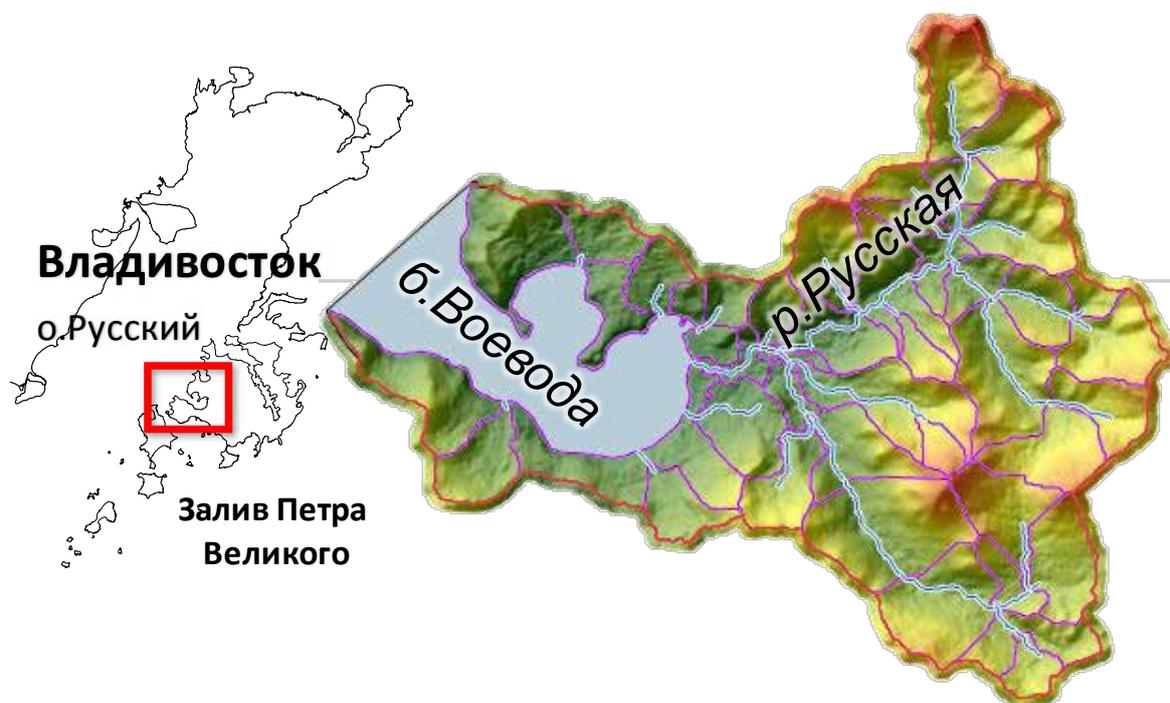


Рис. 1. Карта-схема района исследований: бухта Воевода; водосбор бухты, включающий р. Русскую; модельная водораздельная и русловая сеть SWAT;

Результаты и обсуждение.

Расчеты выполнены непрерывно с суточным шагом по времени (рис. 2). Полученные значения модуля паводочного стока согласуются с данными специальных воднобалансовых измерений на бывшей Приморской воднобалансовой станции [7]. Незначительные весенние паводки и резкие пики расходов воды во время прохождения тайфунов на расчетных гидрографах стока р. Русская в районе впадения в бухту Воевода соответствуют гидрологическим особенностям формирования стока малых рек Дальневосточного типа. Расчетный меженный сток р. Русская составляет 0.02–0.03 м³/с (соответствует измеренному специалистами ТИГ ДВО РАН значению, октябрь 2019). Расчетный максимум суточного расхода воды составил 14.4 м³/с (838 л/(с·км²)), что соответствует данным о гидрологическом режиме малых рек Приморья [7].

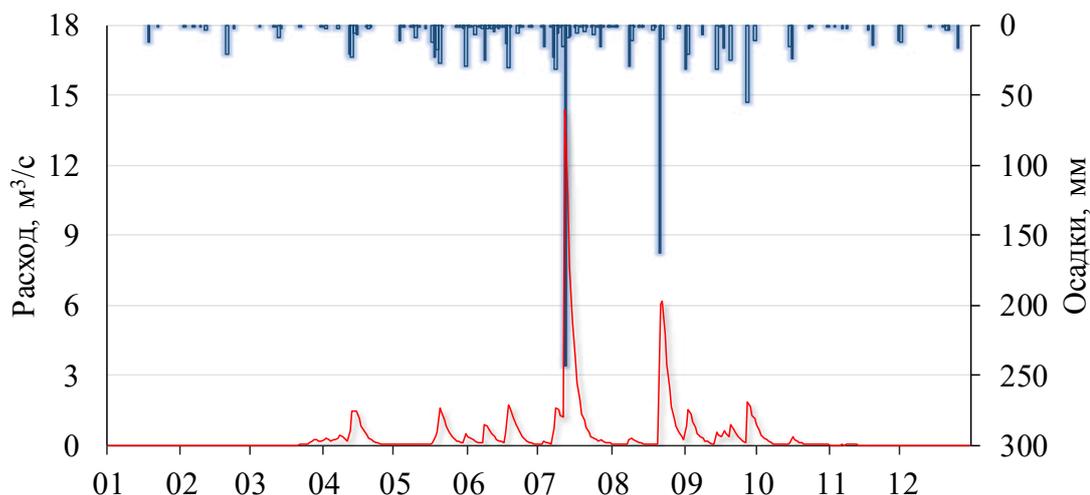


Рис. 2. Измеренные осадки (метеостанция Владивосток) и расчетный гидрограф стока р. Русской за 1990 г. (включает паводок, образованный максимумом суточных осадков по метеостанции Владивосток за период наблюдений).

В качестве основы для построения цифровой модели рельефа дна б. Воевода использованы данные навигационной карты (М 1: 5000, номер 66068). В б. Мелководная дополнительно использованы данные эхолотных промеров. Средствами программного комплекса Delft3d (RGFGRID) для акватории бухты была сгенерирована прямолинейная расчетная сетка разрешением 20 м (101×73 расчетных ячеек). Вертикальное разрешение сетки составляет 3 σ -слоя, границы которых установлены в 10% от поверхности и от дна. Сетка описывает основные особенности геоморфологического строения бухты, конфигурацию побережья и имеет достаточное разрешение для отображения характерных особенностей рельефа дна в бухте Воевода.

Моделирование гидродинамического режима выполнено непрерывно за период 1988–2019 гг. с шагом по времени 15 сек, результаты моделирования выводились с дискретностью 6 часов. Для обеспечения согласования численного решения в пределах расчетной области и изменяющихся во времени граничных условий, для выхода модели на устойчивый режим и минимизации влияния задания начальных условий на результаты моделирования, расчеты за первый год были исключены из анализа. Метеорологическое воздействие на поверхность водосбора и бухты задано на основе архивных данных гидрометеорологических наблюдений [11] на метеостанции Владивосток-Гора с учетом требований к входным данным и временного разрешения каждой из моделей.

Суточный приток пресной воды, вычисленный с помощью SWAT, используется в качестве боковых граничных условий в модели Delft3D. Данные о боковом притоке пресных вод заданы для каждой ячейки расчетной сетки, примыкающей к береговой линии в виде суточного гидрографа притока (м³/с) на основе результатов модели SWAT. Оригинальная программа использована для создания файлов бокового притока в формате Delft3D из

выводных файлов модели SWAT. В местах впадения модельных водотоков SWAT задан суточный гидрограф стока в замыкающих створах этих водотоков. Для задания распределенного притока к акватории бухты, сток с каждого расчетного элемента гидрологической модели SWAT, непосредственно примыкающего к акватории бухты, был равномерно распределен между ячейками расчетной сетки модели Delft3D, примыкающих к данному расчетному элементу SWAT.

На открытой границе на входе в б. Воевода заданы параметры гармонических постоянных прилива по данным поста Владивосток. Коэффициент шероховатости дна в бухте Мелководная задан в соответствии с данными обследования ($50\text{--}65\text{ м}^{0.5}/\text{с}$), в остальной части б. Воевода ($30\text{--}50\text{ м}^{0.5}/\text{с}$) в соответствии с данными навигационной карты и описанием, приведённым в [3]. Соленость на открытой границе задана по материалам [2] как постоянные по глубине сезонные климатические значения (декабрь–февраль 34.43 PSU; март–май 33.0 PSU; июнь–август 32.6 PSU; сентябрь–ноябрь 32.82 PSU). Соленость речных вод и вод распределенного стока задана равной 0.1 PSU. Скорость и направление ветра на весь расчетный период заданы с дискретностью 3 часа. Относительная влажность воздуха, балл облачности, температура воздуха, атмосферные осадки, выпадающие непосредственно на акваторию б. Воевода заданы с суточным разрешением.

На основе анализа результатов гидродинамического моделирования, б. Воевода может быть условно разделена на две части. В мористой и средней части бухты (за исключением бухт второго порядка) осуществляется свободный обмен с водами Амурского залива. В бухтах Мелководная и Круглая под влиянием прилива и рельефа дна формируется циклоническая циркуляция. Режим солености определяется водным балансом, который зависит от притока вод открытого моря (Амурского залива), внутреннего водообмена в бухте, притока пресных вод с ее водосбора, осадков, выпадающих непосредственно на акваторию бухты. Во время сильных дождей, связанных с активной циклонической деятельностью и выходом тропических тайфунов, граница влияния стока р. Русская со значениями солености 20–24 PSU в среднем и придонном слое достигает входа в б. Круглую и распространяется вплоть до центральной части б. Воевода (рис. 3). В районе впадения р. Русская соленость в б. Мелководная может снижаться практически до полного преснения.

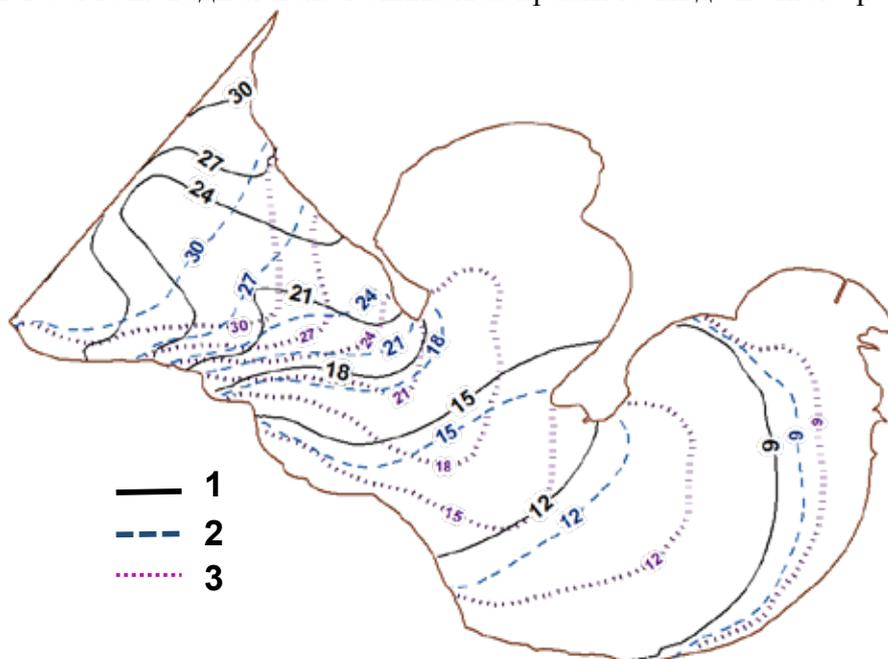


Рис. 3. Пространственное распределение солености 14.07 06:00 при прохождении катастрофического паводка 1990 г. по данным модельных расчетов в поверхностном (1), среднем (2) и придонном (3) σ -слое модели Delft3D.

Результаты моделирования для каждой ячейки расчетной сетки и каждого расчетного σ -слоя были представлены в виде временных рядов солености и горизонтальных компонент скорости течения, на их основании построены пространственные распределения обеспеченных значений скорости течения и солености. Для построения эмпирических кривых обеспеченности были использованы данные только за теплый период (апрель–октябрь). Данный подход позволяет для каждого расчетного слоя модели получить как пространственное распределение обеспеченных значений гидрологических характеристик, так и пространственное распределение обеспеченности для конкретно заданного значения солености или горизонтальной скорости (рис. 4).

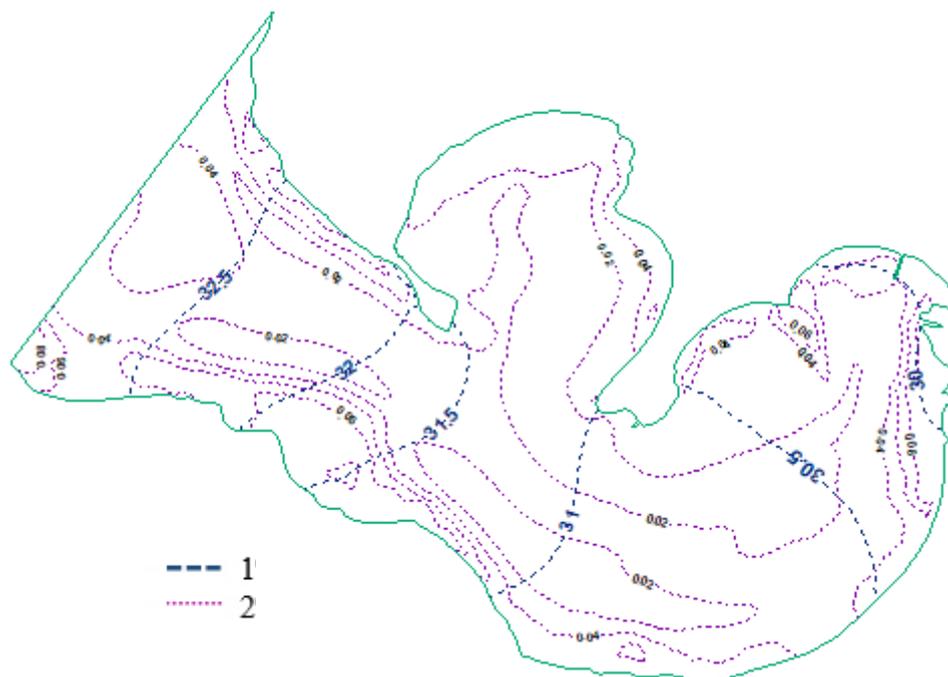


Рис. 4. Изолинии 75% обеспеченности солености (1) и скоростей течений (2).

Выводы.

В качестве краткого резюме отметим, что полученные результаты моделирования в виде карт обеспеченных значений характеристик гидродинамического режима являются перспективной методической основой для долгосрочного планирования и устойчивого развития прибрежных акваторий и территорий. Изолинии обеспеченностей могут быть использованы для вероятностной оценки повторяемости неблагоприятных событий, при которых будут превышены допустимые критерии гарантирующих эффективную эксплуатацию объектов экономики при допустимых для производителя рисках. Разработанные технологии могут быть масштабированы для других подобных объектов.

Список литературы.

1. *Бакланов П.Я., Ганзей К.С., Ермошин В.В.* Береговые географические структуры в прибрежно-морском природопользовании // Доклады Академии наук, 2018, том 478, № 2, с. 229–231.
2. *Барабанчиков Ю.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Волкова Т.И., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., Сагалаев С.Г., Сергеев А.Ф., Тищенко П.П., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М.* Сезонные гидролого-гидрохимические исследования бухты Воевода (Амурский залив, Японское море) // Известия ТИНРО. 2015; 180:161–178. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-180-161-178>

3. Барабанчиков Ю.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Михайлик Т.А., Косьяненко А.А. Условия образования лечебных грязей в бухте Воевода (Амурский залив, Японское море). // Известия ТИНРО. 2018;192: С.167–176. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-167-176>
4. Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Терешкина А.А., Гончуков Л.В., Бугаец Н.Д., Сидоренко Н.Ю., Пшеничникова Н.Ф., Красношеев С.М. Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 68–79.
5. Ганзей К.С., Киселёва А.Г., Пшеничникова Н.Ф. Ландшафты острова русский. Карта. Масштаб 1:25000. Владивосток: Колорит. Владивосток, 2016.
6. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Красношеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 20–29.
7. Горчаков А.М. Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. Л.: Гидрометеиздат. 1983. – 180 с.
8. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200с.
9. Arnold J. G., Allen P. M., and Bernhardt G. A comprehensive surface - groundwater flow model // J. Hydrology, 1993, Vol. 142, P. 47–69.
10. Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka River, the Upper Ussuri River basin // Water Resources. 2019. T. 46. № S2. P. S8–S16.
11. Bugaets A.N., Gonchukov L.V., Sokolov O.V., Gartsman B.I., Krasnoшееv S.M. Information system to support regional hydrological monitoring and forecasting // Water Resources. 2018. T. 45. № S1. P. S59–S66.
12. Delft3D-FLOW, 2016. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Hydro-Morphodynamics. Version: 3.15 Revision: 49020
13. Gonchukov L.V., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Lee K.T. Weather radar data for hydrological modelling: an application for south of Primorye region, Russia // Water Resources. 2019. T. 46. № S2. P. S25–S30.
14. Lesser, G. R., J. A. Roelvink, et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model // Coastal Engineering. 2004. 51(8-9): P.883–915.
15. Motovilov Yu.G., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Kalugin A.S., Moreido V.M., Suchilina Z.A., Fingert E.A. Assessing the sensitivity of a model of runoff formation in the Ussuri River basin // Water Resources. 2018. T. 45. № S1. P. S128–S134.