

С.М. Клубов^{1,2,3}, В.Ю. Третьяков⁴, В.В. Дмитриев⁵, А.Р. Никулина⁶

МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОСБОРОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ ОБЩЕГО АЗОТА И ФОСФОРА В НЕВСКУЮ ГУБУ И ВОСТОЧНУЮ ЧАСТЬ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

АННОТАЦИЯ

Невская губа и восточная часть Финского залива подвержены токсическому загрязнению и эвтрофированию, происходящему из-за избыточного антропогенного поступления общего азота и фосфора. В Санкт-Петербурге мониторинг содержания общего азота и фосфора в речном стоке выполняется только в р. Неве и ее рукавах, поэтому необходимо определение модулей стока общего азота и фосфора с водосборов тех водотоков, на которых не производится мониторинг. Для этого необходимо выделение данных водосборных бассейнов. В статье рассматривается авторская модификация методики выделения водосборных бассейнов водотоков г. Санкт-Петербурга. Она основана на использовании цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной в результате оцифровки топографических карт. Использование наиболее популярных глобальных цифровых моделей рельефа SRTM, ASTER GDEM, полученных в результате дистанционного зондирования поверхности затруднено из-за искажений от крыш зданий, различных сооружений, древесной и кустарниковой растительности, а также других объектов: насыпей, путепроводов, заводских труб и т. п. В связи с этим глобальные цифровые модели рельефа SRTM, ASTER GDEM искаженно показывают высоту земной поверхности. Эти искажения могут приводить к ошибкам при определении границ водосборных бассейнов. Цифровая модель рельефа, созданная в результате оцифровки топографической карты, позволяет получить истинные значения высот земной поверхности. Новая ЦМР была создана нами путем оцифровки топографической карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. в м-бе 1: 200 000 с созданием векторного слоя точек истинных высот в Балтийской системе. В ArcGIS с помощью интерполяции слоя точек высот методом универсального кригинга была создана ЦМР с размерами ячеек 100 на 100 м. Выделение водосборных бассейнов выполнено с помощью инструмента ArcGIS Watershed. Также для выделения водосборов применялись инструменты ГИС QGIS и Saga.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая модель рельефа, выделение водосборов, спутниковые снимки

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, экологический факультет, Рижский пр.-т., д. 11, Санкт-Петербург, Россия, 190103, *e-mail:* klubov_stepan@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* klubov_stepan@mail.ru

³ 3 ГБУ ДО ДТ «У Вознесенского моста» Адмиралтейского района Санкт-Петербурга, Гражданская ул., д. 26, Санкт-Петербург, Россия, 190031, *e-mail:* klubov_stepan@mail.ru

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* v_yu_tretyakov@mail.ru

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* v.dmitriev@spbu.ru

⁶ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия Васильевского острова, д. 33-35, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* st075731@student.spbu.ru

Stepan M. Klubov^{1,2,3}, Victor Yu. Tretyakov⁴, Vasily V. Dmitriev⁵, Anna R. Nikulina⁶

METHODOLOGY FOR DEFINITION OF BOUNDARIES OF SAINT PETERSBURG WATERSHEDS TO DETERMINE THE INTAKE OF TOTAL NITROGEN AND PHOSPHORUS INTO THE NEVA BAY AND EASTERN PART OF THE FINNISH GULF

ABSTRACT

The Neva Bay and eastern part of the Finnish Gulf are affected by toxic contamination and eutrophication due to superfluous anthropogenic income of total nitrogen and phosphorus. Monitoring of the total nitrogen and phosphorus content within Saint Petersburg is carried out only in the Neva River and its spill-streams. Therefore, it is necessary to evaluate modules of the total nitrogen and phosphorus outflow from watersheds of the watercourses without monitoring river stations. For this reason, it is necessary to definite boundaries of the watersheds. The paper presents proprietary technology for the watershed boundary definition within Saint Petersburg and its outskirts. The methodology is based on usage of the digital terrain model, which was created as result of topographic maps digitalization. Usage of the most popular global digital terrain models such as SRTM, ASTER GDEM makes difficulties under the conditions of big cities. The models were developed on the basis of remote sensing of the Earth's surface. Therefore, the values have distortions due to the signal reflection from roofs, structures, trees, scrubs, and so on. Thus, the global models include noisy data. The distortions can lead to mistakes at definition of watershed boundary. Topographic maps digitalization allows elaborating of digital terrain models without distortions of altitude values. We have made the new digital terrain model of Saint Petersburg and the outskirts by means of Saint Petersburg and Leningrad Region topographic map digitalization. The map was published in 2001. Its scale is equal to 1: 200 000. The feature point layer of the altitudes in the Baltic system was created on the base of the map. The digital terrain model was created in ArcGIS by universal kriging interpolation. Dimension of the model cell side is equal to 100 meters. Definition of the watersheds boundaries was carried out by means of the ArcGIS tool Watershed. In addition, we use for the definition some tools of QGIS and SAGA.

KEYWORDS: digital terrain model, definition of watershed boundaries, satellite images

ВВЕДЕНИЕ

Гидрографическая сеть Санкт-Петербурга насчитывает около 47 водотоков [Нежиховский, 1981]. Все водотоки Санкт-Петербурга расположены на водосборном бассейне Балтийского моря, оценкой загрязненности которого в последние десятилетия

-
- ¹ Russian State Hydrometeorological University, Faculty of Ecology, 11, Rizhsky ave., St. Petersburg, Russia, 190103, *e-mail*: klubov_stepan@mail.ru
- ² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: klubov_stepan@mail.ru
- ³ 3 State budgetary institution of additional education, Palace of Child Youth Art «At the Voznesensky Bridge» of the Admiralteysky district, 26, Grazhdanskaya str., St. Petersburg, 190031, Russia, *e-mail*: klubov_stepan@mail.ru
- ⁴ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: v_yu_tretyakov@mail.ru
- ⁵ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: v.dmitriev@spbu.ru
- ⁶ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 33-35, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia, *e-mail*: st075731@student.spbu.ru

активно занимаются страны Балтийского региона¹. Антропогенное эвтрофирование Балтийского моря происходит из-за поступления азота и фосфора со стоком впадающих в него рек.

Эвтрофирование может приводить к «цветению» и ухудшению качества воды, появлению анаэробных зон, нарушению структуры биоценозов и исчезновению ряда видов гидробионтов, в т. ч. ценных промысловых рыб. В период своего интенсивного развития сине-зеленые водоросли выделяют сильнейшие токсины: алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др., представляющие опасность для живых организмов и человека. Концентрация токсинов увеличивается при их продвижении по трофической пирамиде от нижних ярусов к верхним. Потребление загрязненной токсинами пищи может вызвать у людей цирроз печени, дерматиты, отравление и гибель животных [Frumin, Gildeeva, 2017]. Поступающие в Финский залив со стоком рек соединения азота и фосфора антропогенного происхождения являются одной из причин эвтрофирования Балтийского моря [Stepanova, Frumin, 2014]. Водообмен Балтийского моря с Северным морем крайне замедлен. Период полного обновления воды составляет 40–50 лет. Эта природная особенность Балтийского моря обуславливает его чрезвычайную чувствительность к антропогенному воздействию [Потапова и др., 2005]. В конце XX в. в связи с увеличением темпов экономического развития во всем Балтийском регионе [Лачининский, Семенова, 2015] проблема загрязнения Балтийского моря встала достаточно остро [Мосин, 2011].

Для решения одной из главных проблем Балтийского моря — его эвтрофирования необходимо участие всех стран Балтийского региона [Косов, Грибанов, 2016]. В связи с необходимостью международного сотрудничества в области охраны Балтийского моря 15 ноября 2007 г. в Кракове министрами охраны окружающей среды стран Балтийского моря был согласован План действий для Балтийского моря (ПДБМ) [HELCOM, 2007].

В соответствии со своими международными обязательствами по Плану действий по Балтийскому морю Россия обязана вести регулярные наблюдения за состоянием поверхностных вод на водосборном бассейне моря. В Санкт-Петербурге Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС) осуществляет регулярные наблюдения за качеством воды водных объектов [Серебрицкий, Григорьев, 2018]. СЗУГМС ежемесячно проводит исследования качества воды на 13 водотоках в черте Санкт-Петербурга. На основании результатов гидрохимических наблюдений СЗУГМС ежегодно проводится оценка поступления общего азота и фосфора со стоком рек Санкт-Петербурга. Как видно из рис. 1, оценивается только поступление общего азота и фосфора со стоком р. Невы и ее рукавов. Однако в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга впадают еще более 25 водотоков. При этом неизвестно, сколько общего азота и фосфора поступает в Невскую губу и восточную часть Финского залива со стоком этих водотоков. Соответственно, существующая оценка поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков Санкт-Петербурга не является полной. Поэтому цель нашего исследования заключается в определении модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга.

¹ Резолюция круглого стола «Роль муниципалитетов в регионе — Локальные планы по Выполнению Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (ПДБМ)». Электронный ресурс: http://www.helcom.ru/baltic_sea_d_ay/2018 (дата обращения 29.03.2023).

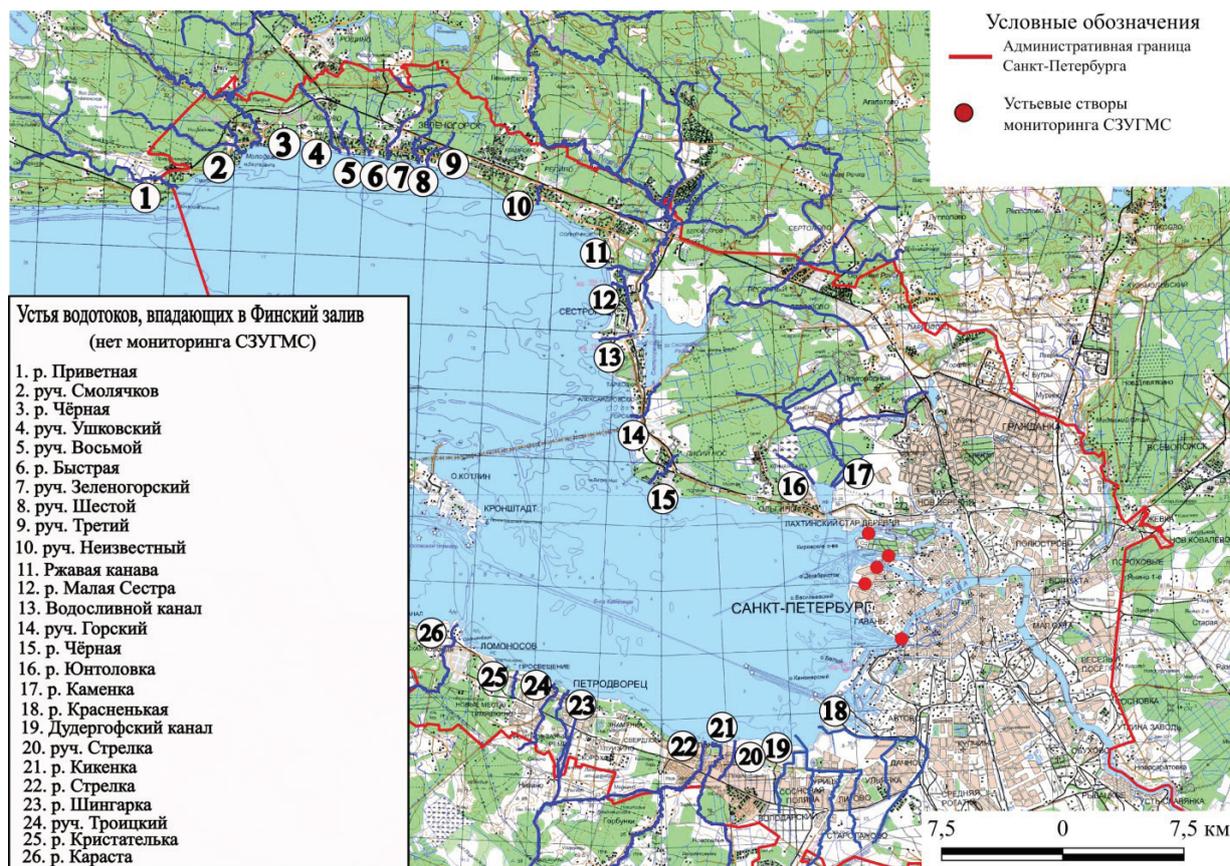


Рис. 1. Мониторинг поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков г. Санкт-Петербурга

Fig. 1. Monitoring of total nitrogen and phosphorus income with outflow of Saint Petersburg watercourses

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика определения модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Финский залив с территории Санкт-Петербурга, представлена в виде блок-схемы на рис. 2. В соответствии с нашей методикой (рис. 2), на первом этапе выполняется оцифровка горизонталей топографической карты. Нами была использована топографическая карта г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. м-ба 1: 200 000. Использование топографических карт обозначенного масштаба ограничено применением к удаленным от центра города территориям с относительно выраженным рельефом. Для территории, занятой многоэтажной жилой застройкой, была использована карта-схема высот г. Санкт-Петербурга (рис. 5).

Путем оцифровки горизонталей топографической карты был создан шейпфайл векторных линейных объектов, в таблице атрибутов которого записаны значения высот горизонталей. С использованием инструментов QGIS вдоль этих линейных объектов через каждые 100 м были расставлены точки. Таблица атрибутов слоя точек содержит значения высот горизонталей. В ArcGIS интерполяцией слоя точек методом «Universal kriging» был создан растр ЦМР с размерами ячеек 100 на 100 м. Использование данного метода интерполяции позволяет использовать существенно нерегулярную сетку исходных значений. Также выбор такого метода интерполяции обусловлен тем, что в нем

автоматически определяется радиус поиска (расстояние, на котором еще существует взаимосвязь между значениями).

Полученный в результате интерполяции растр затем был модифицирован следующим образом: были созданы буферные зоны водотоков шириной 100 м, и в пределах этих зон значения высот в ячейках растра ЦМР были уменьшены на 10 м. Ячейки матрицы ЦМР ASTER GDEM содержат значения, рассчитанные по данным отражения солнечной радиации от поверхностей водотоков. Разумеется, зачастую сигнал от поверхности воды «перемешивается» с сигналом от берегов. Для создания в среде ГИС адекватной реальности сети линий стока необходимо учесть существующую гидрографическую сеть. Поэтому необходимо уменьшать значения высот ячеек, через которые протекают существующие водотоки. Впоследствии на основании создаваемого слоя ячеек стока создается матрица водосборных бассейнов, которая потом конвертируется в векторный полигональный слой.

Выделение водосборных бассейнов выполнено инструментом ArcGIS «Watershed». Созданная в результате интерполяции ЦМР была модифицирована с использованием инструмента «Fill».

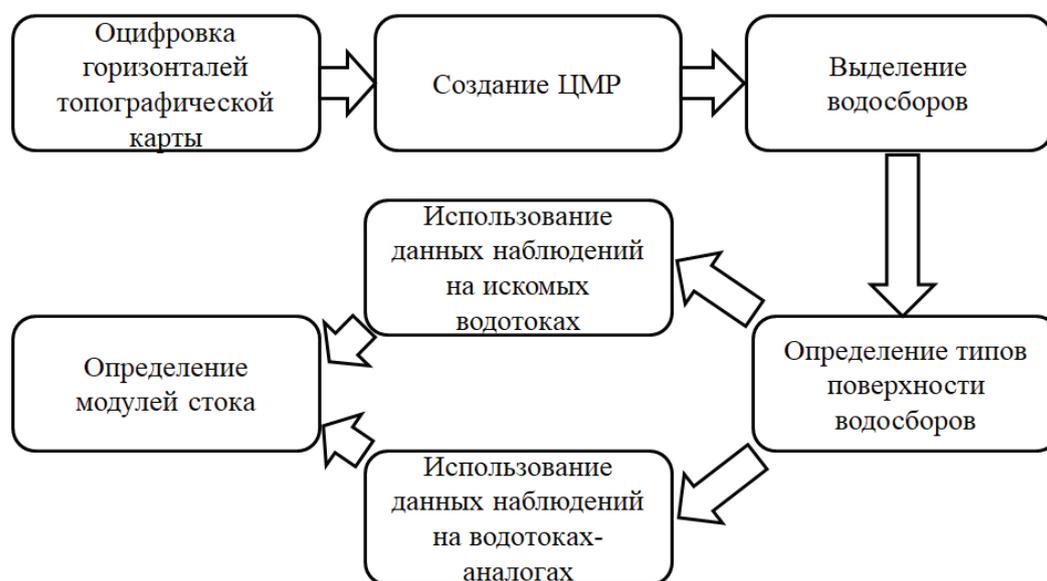


Рис. 2. Блок-схема методики определения модулей стока
 Fig. 2. Block diagram of the outflow modules evaluation methodology

В результате был получен растр направлений стока «Flow Direction». Выделение водосборных бассейнов выполнялось на основании растров «Flow Direction» выше по течению от узловых точек, расставляемых «вручную» в устьях водотоков. Созданные в результате растры принадлежности ячеек к частным водосборам преобразовывались в векторные полигональные слои с помощью инструмента ArcGIS «Conversion tools». Далее полигоны частных водосборов объединялись в полигоны водосборов разных водотоков.

После выделения границ водосборного бассейна необходимо определить типы подстилающей поверхности в его пределах. Классификация с обучением участков разных типов подстилающей поверхности выполнена в QGIS с помощью модуля «Dzetsaka classification dock» на основе композитного изображения. Для создания композитного изображения была использована комбинация красного (B4), зеленого (B3) и ближнего инфракрасного (B8) каналов спутниковых Sentinel-2. Пространственное разрешение ячеек растров использованных каналов и итогового композита составило 10 на

10 м. Для проведения классификации с обучением был создан векторный слой эталонных участков поверхности:

1. Участки, поросшие травянистой и кустарниковой растительностью;
2. Грунтовые поверхности;
3. Асфальтовые поверхности;
4. Зеленые зоны (парки, скверы и т.д.);
5. Крыши зданий;
6. Водная поверхность.

После завершения процедуры классификации с обучением была проведена верификация полученного растра типов поверхности и его последующая векторизация для расчетов площадей поверхностей разных типов.

Пространственная структура водосборов необходима для определения поступления азота и фосфора с водосборов тех водотоков, впадающих с территории Санкт-Петербурга в Невскую губу и восточную часть Финского залива, на которых отсутствуют створы мониторинга. Разные типы поверхностей характеризуются различными значениями коэффициентов поверхностного стока и модулей стока субстанций.

Расчет поступления общего фосфора и азота в Финский залив со стоком водотоков выполнен по формуле (1):

$$Q = 31,5 \cdot C_c \cdot R_c \quad (1),$$

где Q — поступление вещества, т/г.,
 C_c — средняя концентрация вещества в воде, г/м³,
 R_c — средний расход воды за соответствующий период времени, м³/с.

Модуль стока общего азота и фосфора вычисляется по формуле (2):

$$M = Q/W \quad (2),$$

где M — модуль стока, тонн/г.·км²)
 Q — поступление вещества, т/г. (см. формулу 1),
 W — площадь водосборного бассейна, км².

Как уже отмечено (рис. 1), на большинстве впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива водотоков отсутствуют регулярные гидрохимические наблюдения СЗУГМС. На части водотоков проводятся гидрохимические наблюдения водопользователями, осуществляющими хозяйственную деятельность на водосборных бассейнах в рамках производственного экологического контроля. Для водотоков, по которым отсутствуют какие-либо данные гидрохимических наблюдений, нами предлагается использовать данные о химическом составе и расходах воды водотоков-аналогов. Под водотоками-аналогами мы понимаем водотоки, сходные по морфометрическим показателям с исследуемыми водотоками. Сток водотоков-аналогов формируется под воздействием сходных с исследуемыми водотоками процессов на водосборных бассейнах с характеристиками, близкими к характеристикам водосборов исследуемых водотоков. Расположение водотоков-аналогов показано на рис. 3.

Гидрохимические данные и информация о расходах воды водотоков-аналогов присутствуют в Бюллетенях качества поверхностных вод суши и Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, Ежегодниках качества поверхностных вод

суш. Для исследования нами были отобраны данные за 1980–1989 гг. и 2010–2021 гг. Ознакомление с данными производилось в Отделе государственного фонда данных СЗУГМС. Гидрохимические данные за 1980–1989 гг. приводятся по датам отбора проб или датам измерений расходов воды, гидрохимические данные за 2010–2021 гг. представлены в усредненном виде.

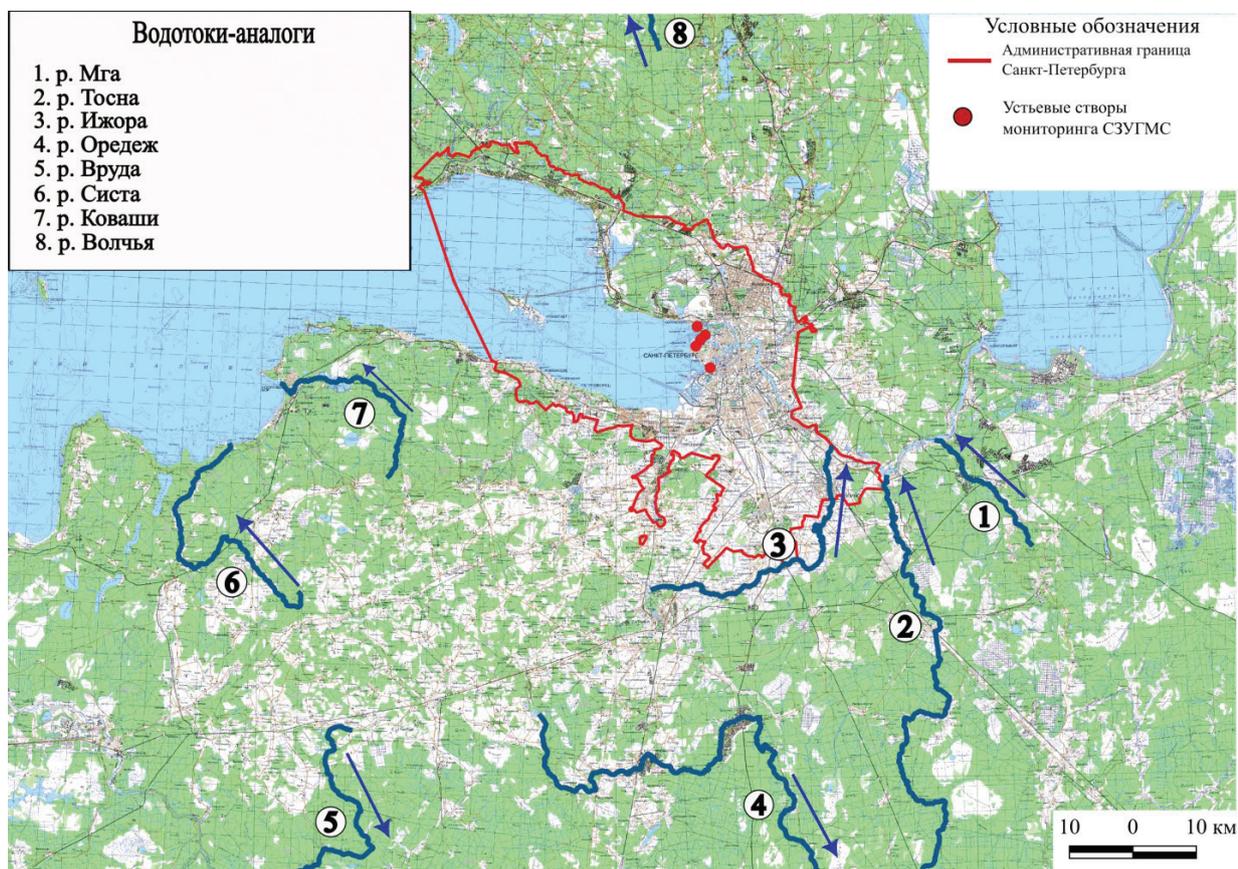


Рис. 3. Карта-схема расположения водотоков-аналогов
 Fig. 3. Schematic map of the analogue watercourses spatial location

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Начальным и ключевым этапом методики определения модулей стока субстанций с водосборов является выделение границ этих водосборов. Выделение водосборов в среде ГИС выполняется на основании цифровых моделей рельефа. Для целей выделения обширных водосборов наиболее популярными глобальными ЦМР являются ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) и SRTM (Shuttle radar topographic mission). Рассмотрим характеристики этих моделей.

Продукт **ASTER GDEM** (Global Digital Elevation Model) разработан совместно Министерством экономики, торговли и промышленности (METI) Японии и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства США (NASA). Первая версия ASTER GDEM была выпущена в июне 2009 г. Эта ЦМР создана на основе данных сенсора ASTER спутника Terra. Сенсор работал в инфракрасном диапазоне. Охват ASTER GDEM простирается от 83° с. ш. до 83° ю. ш., покрывая 99 % суши Земли. ASTER GDEM имеет глобальное разрешение 90 м и разрешение 30 м в пределах территории

Соединенных Штатов Америки. Несмотря на высокое разрешение и большой охват, модель имеет множество ошибок в определении высот в облачных районах [Мальцев и др., 2018].

SRTM (Shuttle radar topographic mission) — международная миссия по получению данных цифровой модели рельефа (ЦМР) территории Земли. Съемка поверхности Земли проведена в феврале 2000 г. с борта космического корабля многоразового использования Shuttle с помощью радарной интерферометрической камеры и двух радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR. В результате была создана матрица высот, охватывающая территорию суши от 60° с. ш. до 54° ю. ш., а также некоторые морские акватории. Данные SRTM представлены существуют в нескольких версиях. Данные SRTM с размером ячеек 1x1 угловые секунды, т. е. с пространственным разрешением 30 м являются более точными, но, к сожалению, доступны лишь на территорию США. На остальную поверхность Земли доступны только данные SRTM с размером ячейки 90x90 м [Мальцев и др., 2018].

Обе описанные ЦМР находятся в свободном доступе^{1,2}.

Наиболее современной и точной ЦМР является **WorldDEM** — высокоточная глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) компании Airbus Defence and Space. WorldDEM создается по интерферометрическим парам радарных снимков спутников TerraSAR-X и TanDEM-X и превосходит все существующие на сегодняшний день ЦМР, полученные по данным дистанционного зондирования Земли.

Отличительной особенностью этой ЦМР является относительная точность 2 м и абсолютная точность 4 м. Пространственный охват распространяется на широты севернее 60° с. ш. без изменения точности. Размер ячейки составляет 12x12 м [Riegler et al., 2015]. Указанная ЦМР является платной³.

Сравнительные характеристики глобальных моделей рельефа и разработанной нами ЦМР представлены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительные характеристики цифровых моделей рельефа
Table 1. Performance comparison of some digital terrain models

Название	ASTER GDEM	SRTM	WorldDEM	Авторская ЦМР
Пространственный охват	83° с. ш. – 83° ю. ш.	60° с. ш. – 54° ю. ш.	90° с. ш. – 90° ю. ш.	Санкт-Петербург и Ленинградская область
Пространственное разрешение	90 м	90 м	12 м	100 м
Метод съемки/получения	Инфракрасная съемка	Радиолокационная съемка	Радиолокационная съемка	Оцифровка изолиний топографической карты
Возможность свободного доступа	Да	Да	Нет	Исходную топографическую карту можно найти в свободном доступе

Для нашего исследования указанные в таблице глобальные ЦМР не подходят. SRTM не подходит из-за пространственного разрешения. WorldDEM не подходит из-за отсутствия свободного доступа. ASTER GDEM требует значительной модификации для применения к

¹ SRTM. Глобальная база данных высот. Электронный ресурс: <https://srtm.csi.cgiar.org/> (дата обращения 17.01.2023).

² ASTER GDEM. Электронный ресурс: https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html (дата обращения 17.01.2023).

³ Геоматика. Цифровые модели рельефа. Электронный ресурс: <https://sovzond.ru/upload/iblock/090/78-82.pdf?ysclid=lftrynmfv639099589> (дата обращения 17.01.2023).

водосборам водных объектов Санкт-Петербурга. Такая модификация была нами выполнена для водосборных бассейнов рр. Волковки и Охты. Перепад высот, например, на водосборе р. Волковки (рис. 4) составляет более 200 м, что значительно больше точности использованной глобальной ЦМР. Модификация связана с искажением высот поверхности Земли от тех объектов, которые на ней расположены. Например, на водосборных бассейнах рр. Волковки и Охты расположена многоэтажная жилая застройка высотой до 26 этажей (около 80 м). Таким образом, ASTER GDEM, как и любая другая глобальная ЦМР, имеет искажения относительно реальной высоты местности в несколько десятков метров (рис. 4). Искажения хорошо видны на фрагменте ЦМР ASTER GDEM в виде белых прямоугольников, совпадающих с очертаниями городской квартальной застройки. Для того, чтобы убрать искажения, исходная ЦМР ASTER GDEM в формате GeoTiff была преобразована в векторный слой точек в ГИС SAGA с использованием инструмента «Grid to points».

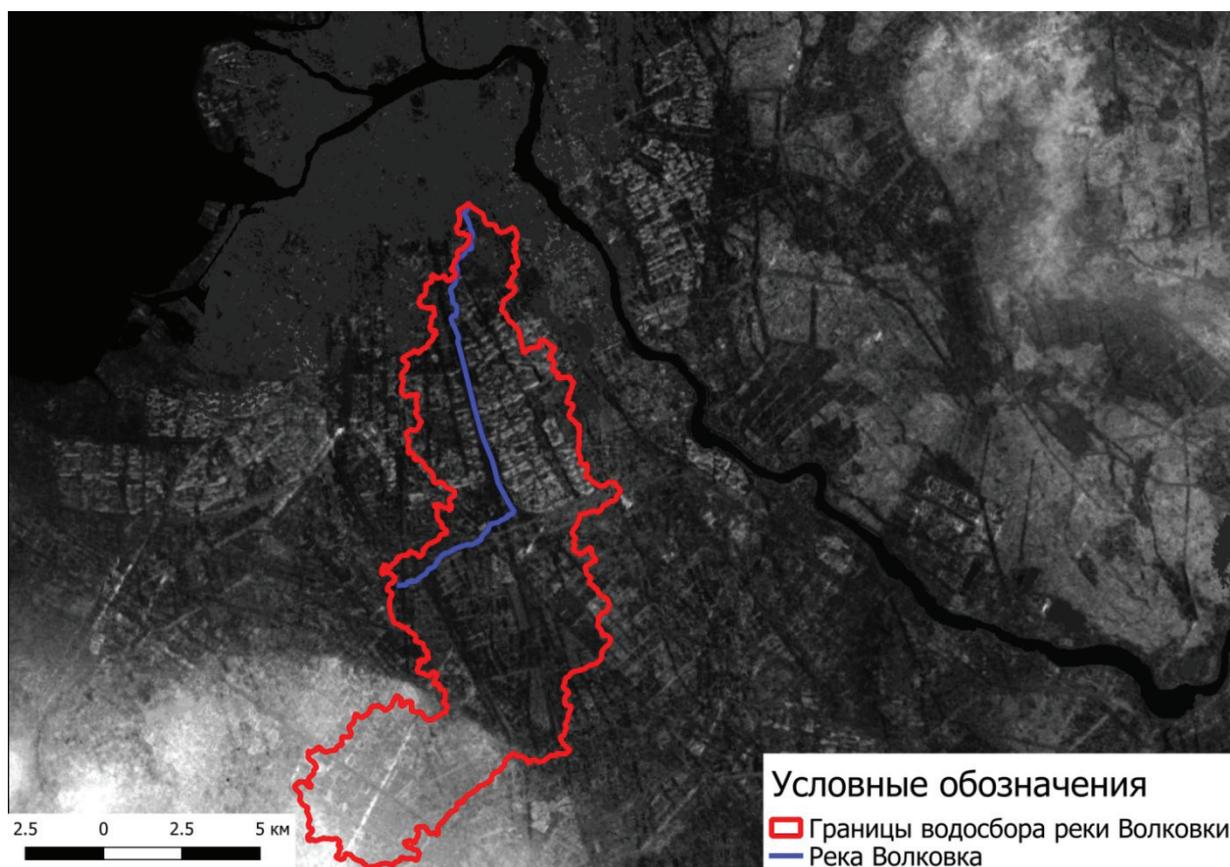


Рис. 4. Границы водосборного бассейна р. Волковки
 Fig. 4. The Volkovka River watershed boundary

Точки созданного векторного слоя унаследовали в качестве атрибута значения высот из исходного растра ЦМР. Точки были распределены по сетке квадратов со сторонами 1 км по отдельным слоям электронной карты. Внутри каждого квадрата с помощью карты-схемы высот поверхности Санкт-Петербурга были определены значения истинных высот поверхности земли на исследуемом участке (рис. 5)¹. После определения значений истинных высот поверхности в пределах квадратов в таблицах атрибутов соответствующих

¹ Карта-схема высот поверхности Санкт-Петербурга. Электронный ресурс: http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb_heights.gif (дата обращения 28.03.2023).

слоев точек были удалены все объекты со значениями, превышающими истинные значения высот поверхности. Слои точек с истинными значениями высот поверхности были объединены в один векторный слой.

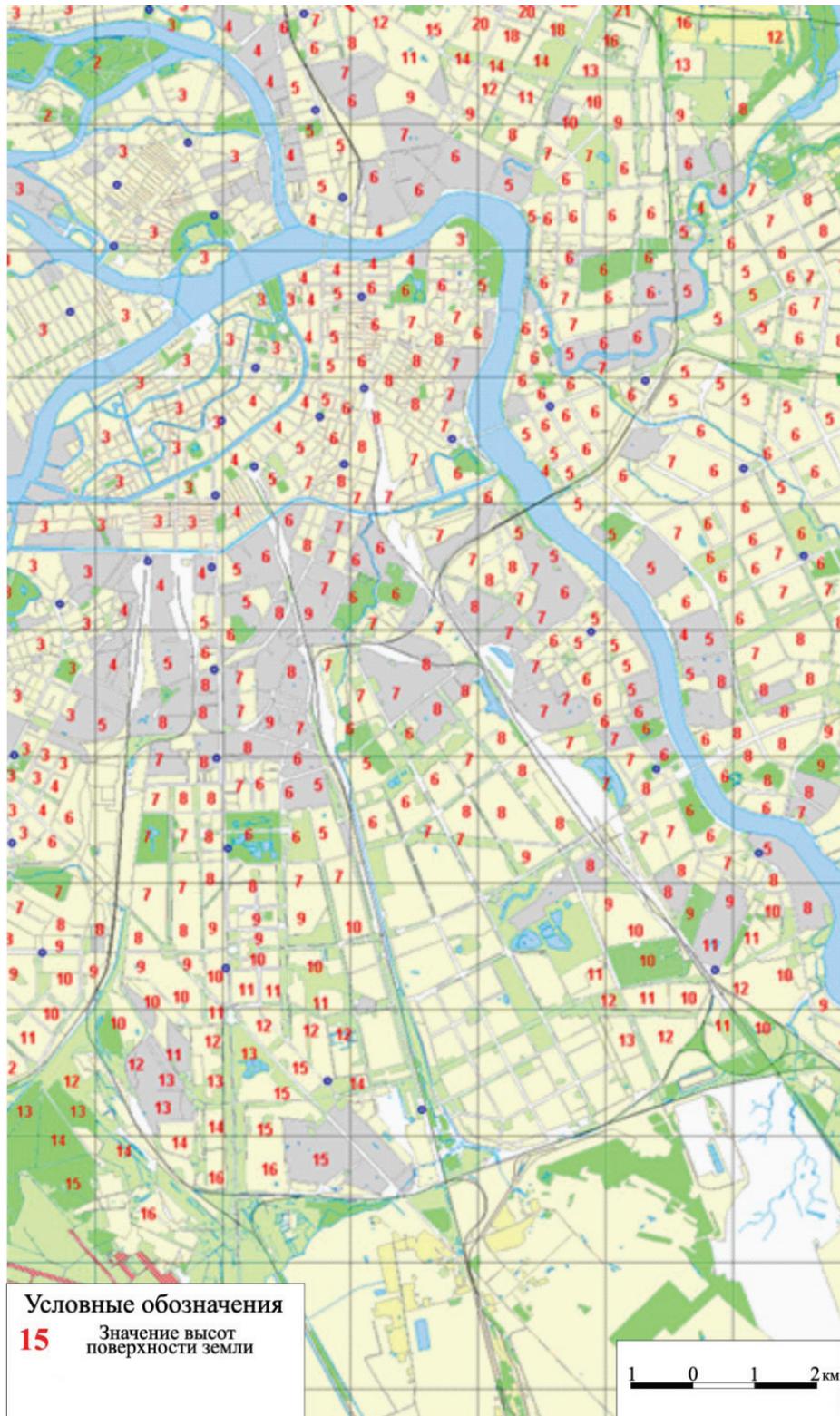


Рис. 5. Фрагмент карты-схемы высот поверхности Санкт-Петербурга
Fig. 5. Fragment of Saint Petersburg surface altitude map

Затем была выполнена модификация полученного векторного слоя для учета русел водотоков. Были созданы буферные зоны шириной 100 м вокруг линейных объектов водотоков. Слой полигонов буферных зон использовался для выборки точек высот поверхности по взаимному расположению объектов двух слоев в QGIS. Попавшие внутрь буферных зон точки были сохранены в новый слой и удалены из исходного слоя. Таким образом, были созданы 2 векторных слоя точек:

1. Точки высот внутри буферных зон водотоков;
2. Точки истинных высот поверхности.

В таблице атрибутов слоя точек внутри буферных зон водотоков было выполнено уменьшение значений высот с помощью инструмента «Калькулятор полей» QGIS. Точки в руслах водотоков были «углублены» на 5 м. После этого слой «углубленных» точек был объединен со слоем точек истинных высот Земли. По данным этого объединенного слоя точек в ГИС SAGA была выполнена интерполяция методом «Обратно взвешенное расстояние», и был получен растр высот, являющийся дважды модифицированной ЦМР ASTER GDEM. Эта модифицированная ЦМР была использована для выделения водосбора р. Волковки и частного водосбора р. Охты ниже плотины Ржевского водохранилища. Водосборные бассейны этих водотоков в высокой степени урбанизированы.

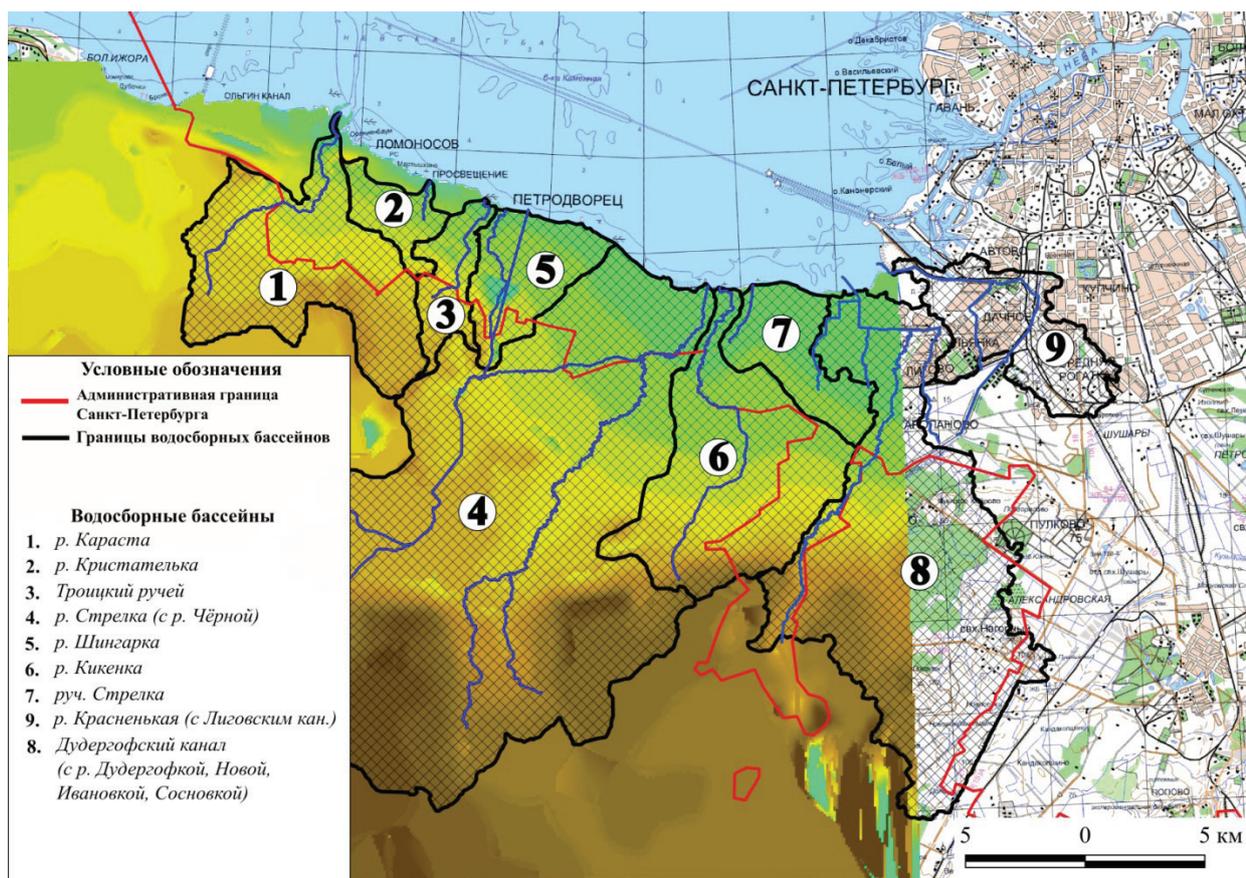


Рис. 6. Границы водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с юга

Fig. 6. Boundaries of the watersheds, watercourses of which inflow into the Neva Bay and eastern part of the Gulf of Finland from the south

Таким образом, для каждого водосборного бассейна требовалось создавать свою собственную ЦМР путем модификации ЦМР ASTER GDEM. Разумеется, такой подход малоэффективен, т. к. необходимо выделить водосборы большого количества впадающих в Невскую губу и Восточную часть Финского зал. водотоков, на которых отсутствует мониторинг стока общего азота и фосфора. В связи с этим нами был выбран другой подход для определения границ водосборов исследуемых водотоков, суть которого изложена в разделе «Материалы и методы исследования» данной статьи. Разработанная нами методика была опробована для водотоков, впадающих в Невскую губу с юга. На основании созданной нами ЦМР было выделено 7 водосборов (рис. 6).

Водосборы р. Красненькой и Дудергофского канала с притоками были получены на основании модифицированной ЦМР ASTER GDEM. В связи с этим фактом созданная нами ЦМР на основании топографической карты не охватывает эти водосборы. В настоящее время аналогичная работа проводится для выделения границ водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с севера (рис. 1). Результатом нашей работы будет являться определение модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается в оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга.

ВЫВОДЫ

Ключевым этапом представленной нами методики определения модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга, является выделение границ водосборных бассейнов. Нами рассмотрены возможности использования для этой цели глобальных ЦМР: ASTER GDEM, SRTM, WorldDEM. Наиболее подходящей для выполнения нашего исследования оказалась глобальная ЦМР ASTER GDEM. Нами была разработана методика модификации этой ЦМР для повышения точности выделения границ водосборных бассейнов урбанизированных территорий. Модификация заключается в фильтрации истинных значений высот поверхности Земли и искусственном уменьшении значений ЦМР в местах русел водотоков. Однако процесс такой модификации требует значительных трудозатрат и индивидуализации для каждого водосбора. Нами предложено создание ЦМР путем оцифровки горизонталей топографической карты, «расстановки» по горизонталям точечных объектов и их использования для интерполяции значений высот в среде ArcGIS. Разработанная нами методика была успешно применена для выделения границ водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу с юга с помощью гидрологических функций ArcGIS.

Необходимо подчеркнуть, что задача выделения водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга, до сих пор не решена. Представленные нами разработки могут помочь в решении данной задачи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-27-10011) и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by Russian Science Fund (grant No. 23-27-10011) and by Saint Petersburg Science Fund.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Косов Ю.В., Грибанова Г.И.* Стратегия ЕС для региона Балтийского моря: проблемы и перспективы международного сотрудничества. Балтийский регион, 2016. Т. 8. № 2. С. 48–66.
- Лачининский С.С., Семенова И.В.* Позиционирование мирового приморского города Санкт-Петербурга в Балтийском регионе. Балтийский регион, 2015. № 3 (25). С. 62–75.
- Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М.* Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514–530.
- Мосин О.В.* Основные экологические проблемы Балтийского моря и пути их решения. Балтийский регион, 2011. №1 (7). С. 41–53.
- Нежиховский Р.А.* Река Нева и Невская губа. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 84 с.
- Потапова Т.М., Джиноридзе Е.Н., Королева В.П., Богданов В.Л., Шмелева И.В.* Новые сведения о развитии процессов эвтрофикации литоральной зоны восточной части Финского залива. Вестник СПбГУ, 2005. Сер. 7. Вып. 4. С. 76–86.
- Серебрицкий И.А., Григорьев И.А.* Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге. Санкт-Петербург: Сезам-принт, 2018. 448 с.
- Frumin G.T., Gildeeva I.M.* Eutrophication of water bodies — a global environmental problem. Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2483–2488. DOI: 10.1134/S107036321413001.
- HELCOM Baltic Sea Action Plan. HELCOM Ministerial Meeting. Krakow, Poland, 15 November 2007. 101 p.
- Riegler G., Hennig S. D., Weber M.* WORLDDDEM — a novel global foundation layer. Proceedings of Joint ISPRS conference, 2015. V. XL-3/W2. P. 183–187. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-183-2015
- Stepanova E.V., Frumin G.T.* Background nitrogen concentrations in the unmonitored and partially monitored rivers of the Gulf of Finland basin. Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2592–2595. DOI: 10.1134/S1070363214130167

REFERENCES

- Frumin G.T., Gildeeva I.M.* Eutrophication of water bodies — a global environmental problem, Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2483–2488. DOI: 10.1134/S107036321413001.
- HELCOM Baltic Sea Action Plan. HELCOM Ministerial Meeting. Krakow, Poland, 15 November 2007. 101 p.
- Kosov Yu.V., Gribanova G.I.* The EU Strategy for the Baltic Sea Region: Problems and prospects of international cooperation. Baltic Region, 2016. V. 8. No. 2. P. 48–66 (in Russian).
- Lachininskii S.S., Semenova I.V.* Positioning of the world seaside city of St. Petersburg in the Baltic Region. Baltic Region, 2015. V. 25. No. 3. P. 62–75 (in Russian).
- Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M.* Digital relief models and their use in calculating the rate of soil flushing on arable land. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series), 2018. V. 160. No. 3. P. 514–530 (in Russian).
- Mosin O.V.* The main environmental problems of the Baltic Sea and ways to solve them. Baltic Region, 2011. V. 7. No. 1. P. 41–53 (in Russian).

Nezhikovskiy R.A. Neva River and Neva Bay. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981. 84 p. (in Russian).

Potapova T.M., Dzhinoridze E.N., Koroleva V.P., Bogdanov V.L., Shmeleva I.V. New information on the development of eutrophication processes in the littoral zone of the eastern part of the Gulf of Finland. *Vestnik of Saint Petersburg University*, 2005. Ser. 7. Iss. 4. P. 76–86 (in Russian).

Riegler G., Hennig S. D., Weber M. WORLDDDEM — a novel global foundation layer. *Proceedings of Joint ISPRS conference*, 2015. V. XL-3/W2. P. 183–187. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-183-2015.

Serebriy I.A., Grigoriev I.A. Environmental protection, nature management and environmental safety in St. Petersburg. Saint-Petersburg: Sesame Print, 2018. 448 p.

Stepanova E.V., Frumin G.T. Background nitrogen concentrations in the unmonitored and partially monitored rivers of the Gulf of Finland basin. *Russian Journal of General Chemistry*, 2014. V. 84. No. 13. P. 2592–2595. DOI: 10.1134/S1070363214130167.
