

## Радиолокационный спутниковый мониторинг невского наводнения 27 сентября 2018 г.

В. И. Горный<sup>1</sup>, Т. А. Давидан<sup>1</sup>, А. В. Киселев<sup>1</sup>, С. Г. Крицук<sup>1</sup>,  
И. Ш. Латыпов<sup>1</sup>, А. А. Павловский<sup>2</sup>, А. А. Тронин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия  
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

<sup>2</sup> Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: A.Pavlovskiy@kga.gov.spb.ru

С момента основания Санкт-Петербурга отдельные районы города подвержены затоплениям (наводнениям), вызванным нагонами морской воды из восточной части Финского залива под действием циклонических процессов. Эти наводнения наносили экономике города значительный ущерб. В 2011 г. введён в строй комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Тем не менее низинные прибрежные участки города продолжают затопляться. Площади затопляемых территорий до настоящего времени оцениваются расчётным путём с использованием математической модели наводнения и цифровой модели рельефа территории Санкт-Петербурга. 27 сентября 2018 г. уровень подъёма воды на гидрологическом посту в дельте р. Невы поднялся до 176 см выше ординара. В период наводнения над городом прошёл европейский спутник Sentinel-1, выполнивший радиолокационную съёмку акватории восточной части Финского залива. Это позволило впервые зарегистрировать структуру волнения во время невского наводнения и закартировать затопленные территории маршей — прибрежных болотно-водных угодий. Для картирования была использована методика обнаружения изменений на радиолокационных сценах, полученных 15 и 27 сентября 2018 г., и цветовое кодирование. Полученные результаты показали возможность включения спутникового радиолокационного мониторинга в комплекс методов послепроектного мониторинга определения границ зон затопления вдоль всего побережья Невской губы и Финского залива в границах Санкт-Петербурга.

**Ключевые слова:** Санкт-Петербург, наводнение, затопление, картирование, спутник, радиолокатор, мониторинг

Одобрена к печати: 30.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-243-247

С момента основания Санкт-Петербурга значительные его районы и территории пригородов часто подвергались затоплению в результате подъёма воды в р. Неве и восточной части Финского залива. Наиболее крупные наводнения произошли в 1824 г. (7 ноября, 421 см выше ординара), в 1924 г. (23 сентября, 380 см), в 1777 г. (10 сентября, 321 см), в 1955 г. (15 октября, 293 см), в 1975 г. (29 сентября, 281 см) (Павловский, 2016). В 2011 г. был введён в эксплуатацию Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) длиной 25,4 км, состоящий из 11 каменно-земляных дамб, двух судопропускных и шести водопропускных сооружений (<https://dambaspb.ru>). При этом низинные территории Санкт-Петербурга даже в пределах защищённой акватории остаются подверженными наводнениям. Правительством России предусмотрен ряд мер по защите территорий от затоплений и подтоплений, в том числе по картированию зон проявления данных опасных природных явлений (Об определении..., 2014). В соответствии с этим постановлением для территории Санкт-Петербурга была определена зона затопления территорий, прилегающих к Финскому заливу (Павловский, 2016). Для этого использовались границы затопления, полученные с помощью гидродинамической модели Финского залива и Невской губы и цифровой модели рельефа Санкт-Петербурга.

27 сентября 2018 г. в устье р. Невы наблюдался подъём воды, превысивший возле Горного института уровень в 160 см над ординаром, что считается наводнением (рис. 1). В связи

с риском затопления в этот же день в 11:47 по московскому времени (МСК) были закрыты судопропускные сооружения КЗС. Максимум подъёма воды в 176 см у Горного института пришёлся на период с 04:30 до 5:00 МСК 27 сентября.

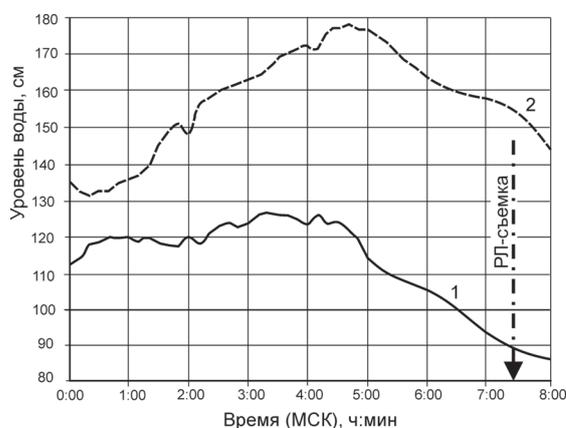


Рис. 1. Изменение уровня воды в период неевского наводнения 27.09.2018: 1 — Кронштадт; 2 — Горный институт (предоставлен ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»)

В 07:25 МСК 27 сентября 2018 г. (через 2 ч 25 мин после максимального подъёма уровня воды) спутник Sentinel-1 выполнил сквозь облачный покров радиолокационную (РЛ) съёмку восточной части Финского залива (рис. 2). В это время скорость ветра западного-северо-западного направления (азимут 283°) достигала здесь 14–15 м/с, а уровень воды в районе Кронштадта снизился до 90 см над ординаром.

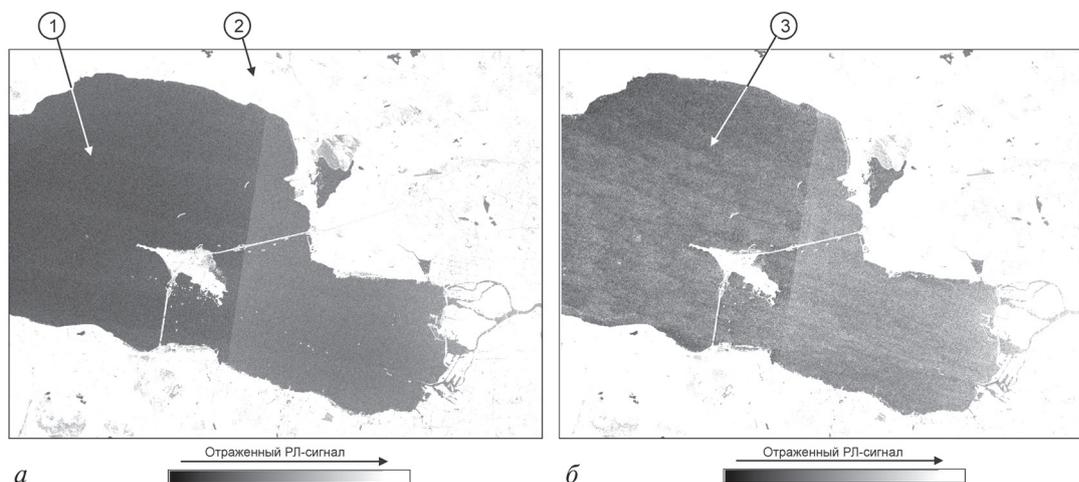


Рис. 2. Космические РЛ-изображения восточной части Финского залива, полученные спутником Sentinel-1: а — 15 сентября 2018 г., 1 — слабое обратное рассеяние от поверхности воды, 2 — интенсивное обратное рассеяние от поверхности суши; б — 27 сентября 2018 г., 07:25 МСК, 3 — структура волнения на акватории Финского залива во время наводнения

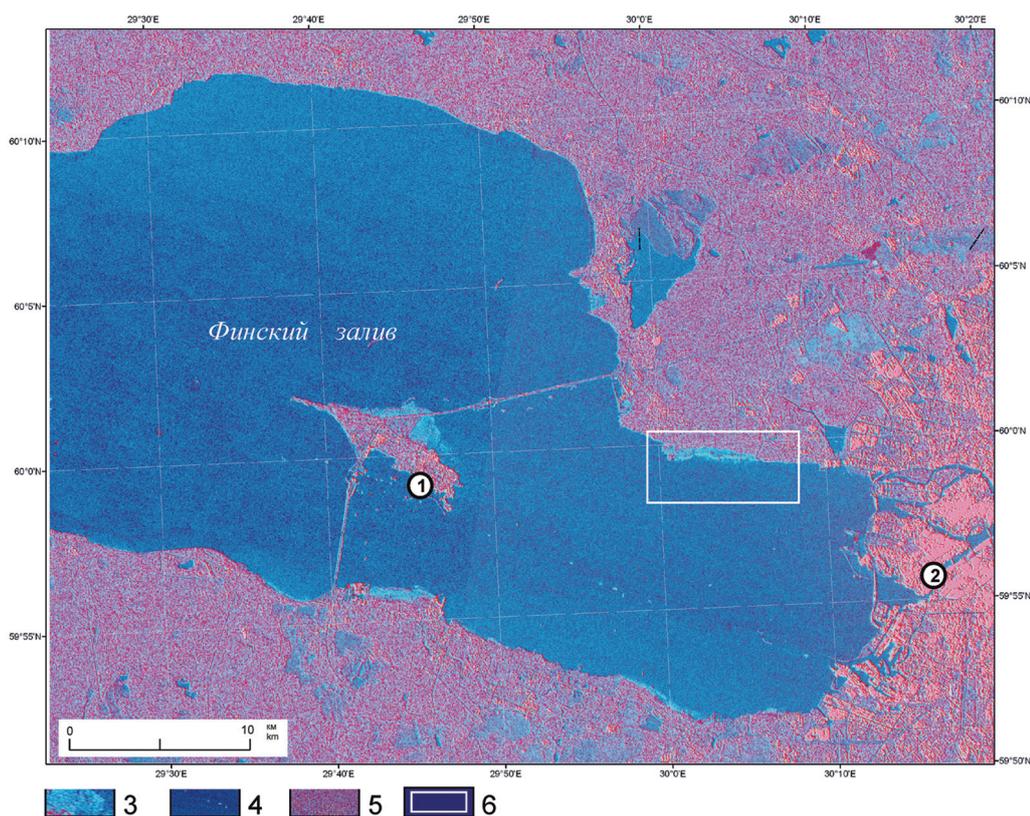
Радиолокатор (центральная длина волны 5,546 см) спутника Sentinel-1 выполнил РЛ-съёмку с геометрическим разрешением 5×20 м\* в режимах VН (вертикально-горизонтальной) (см. рис. 2а) и VV (вертикально-вертикальной) поляризации. Для сравнения, из архива материалов этого спутника на ту же территорию в VН-поляризации была получена РЛ-сцена,

\* <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Definition/>

отснятая 15 сентября 2018 г., когда не наблюдался подъём воды в Невской губе (см. *рис. 2б*). Обе сцены (формат продукта IW SLC) были приведены к единой картографической проекции с пространственным разрешением 18,3×18,3 м.

Хорошо известно (Верба и др., 2010), что при слабом волнении водной поверхности характер отражения РЛ-зондирующего импульса от поверхности акваторий является квази-зеркальным. В результате водная поверхность на РЛ-изображениях имеет низкую амплитуду РЛ-сигнала (см. 1 на *рис. 2а*). Отражение же РЛ-зондирующего импульса от поверхности суши обычно является квазидиффузным, т.е. имеет место существенное обратное рассеяние. Поэтому отражённый от поверхности суши сигнал (см. 2 на *рис. 2а*) имеет амплитуду существенно большую, чем сигнал, отражённый от поверхности воды (см. 1 на *рис. 2а*). При значительном ветре на РЛ-изображениях может наблюдаться структура волнения на поверхности воды (см. 3 на *рис. 2б*), регистрируемая из-за обратного зеркального отражения.

Для облегчения картирования затопленных наводнением территорий применена методика обнаружения изменений (change detection) с последующим цветовым кодированием. Для этого сигнал РЛ-сцены от 27.09.2018 (см. *рис. 2а*) был вычтен из сигнала РЛ-сцены от 15.09.2018 (см. *рис. 2б*). После чего было подготовлено RGB-цветовое композитное изображение из РЛ-сцены от 27.09.2018 (красный цвет) и разностного изображения (зелёный и синий цвета). В результате отчётливо выделились области затопления (см. 3 на *рис. 3*). Анализ снимков высокого разрешения (*рис. 4*) показал, что выделились затопленные береговые марши\*.



*Рис. 3.* RGB-цветовое композитное изображение восточной части Финского залива (по результатам РЛ-съёмки спутником Sentinel-1 от 15.09.2018 и 27.09.2018). Условные обозначения: 1 — Кронштадтский футшот; 2 — Гидрологический пост у Горного института; 3 — затопленные в 07:25 27.09.2018 береговые зоны (голубой цвет); 4 — суда, скопившиеся в акватории восточной части Финского залива из-за закрытия судопропускных сооружений КЗС; 5 — суша; 6 — границы космического снимка высокого разрешения (см. *рис. 4*)

\* Марши — зона аккумулятивного берега со сформировавшимися почвенным и растительным покровами, затопляемая при больших нагонах воды (Геологический..., 1978).

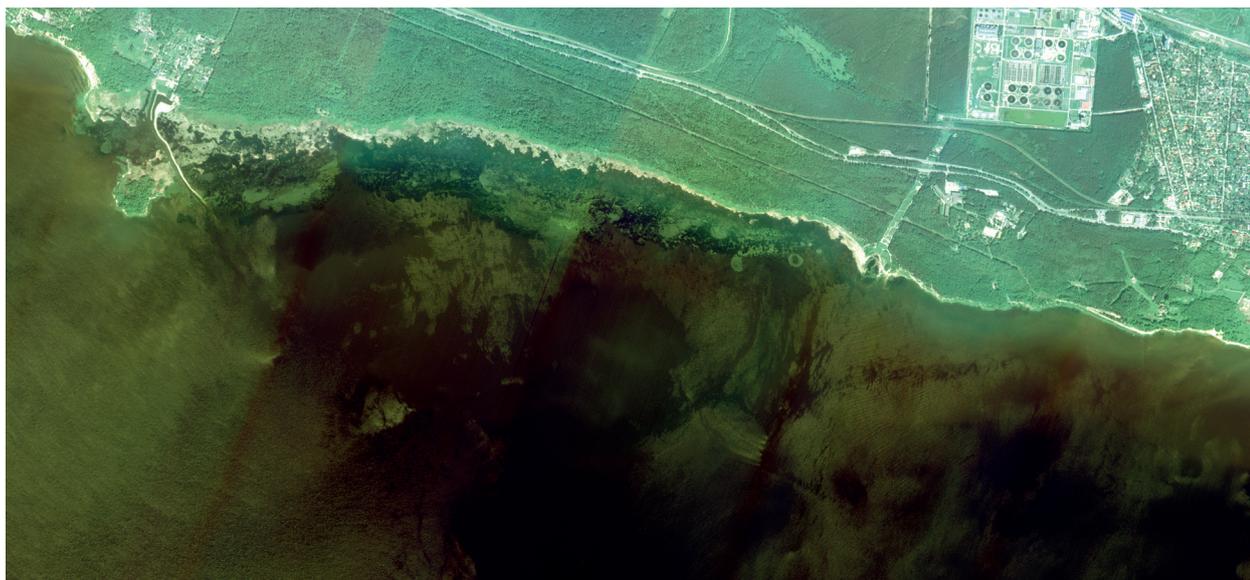


Рис. 4. Снимок с КА «Ресурс-П» от 17.06.2017 11:47 GMT (предоставлен НЦ ОМЗ АО РКС)

Как отмечено выше, подъём уровня воды в восточной части Финского залива в момент РЛ-съёмки 27.09.2018 был незначительным и составил около 90 см в районе Кронштадта (см. 1 на рис. 3). Поэтому территория собственно суши не была затоплена (см. рис. 3). Затопило лишь марши (см. рис. 3 и 4), покрытые хорошо отражающей травянистой галофитной растительностью, высота которой редко превышает 100 см. Таким образом, на РЛ-сцене, полученной 15.09.2018. (см. рис. 2а), эти водно-болотные угодья характеризовались значительным обратным рассеянием. После затопления растительности в момент РЛ-съёмки 27.09.2018 покрытые водой участки давали квазизеркальное отражение и, соответственно, слабое обратное рассеяние. Именно поэтому эти прибрежные зоны выделились в результате применения методики анализа изменений (change detection).

Следует отметить, что, вероятно, впервые удалось получить РЛ-космический снимок невского наводнения, а первые результаты его обработки доказали высокую эффективность методики анализа изменений для картирования затопленных территорий во время таких наводнений. Учитывая, что два Европейских РЛ-спутника Sentinel-1А и Sentinel-1В выполняют съёмку всей земной поверхности два раза в сутки и материалы находятся в открытом доступе, становится возможным регулярный мониторинг невских наводнений. Такой мониторинг позволил бы оперативно картировать с высоким геометрическим разрешением подтопленные прибрежные районы Санкт-Петербурга, расположенные как до КЗС, так и в пределах территории, защищённой КЗС, и на этой основе оценивать ущерб экономике города.

В настоящее время на фоне повышения уровня моря и изменений расходов рек, вызванных глобальным потеплением, представляется целесообразным осуществлять регулярный послепроектный мониторинг границ зон затопления вдоль всего побережья Невской губы и Финского залива в пределах Санкт-Петербурга. Для этих целей, кроме результатов наблюдений Морской гидрометеорологической обсерватории, становится возможным использование материалов спутникового зондирования Земли из космоса.

## Литература

1. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с. URL: [https://fileska-chat.com/file/24462\\_a471e84e2604049a0b89615863ebf23a.html](https://fileska-chat.com/file/24462_a471e84e2604049a0b89615863ebf23a.html).
2. Геологический словарь / ред. З. А. Смирнова, Л. В. Власова. М.: Недра, 1978. Т. 1. 485 с.

3. Об определении границ зон затопления, подтопления. Постановление Правительства РФ № 360 от 18.04.2014 (вместе с «Правилами определения границ зон затопления, подтопления») (ред. от 17.05.2016). URL: <http://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-18042014-n-360/>.
4. Павловский А. А. Об определении зон затопления на территории Санкт-Петербурга // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. Гидрология. 2016. Вып. 43. С. 39–50.

## Satellite radar monitoring of Neva flood on September 27, 2018

V. I. Gornyy<sup>1</sup>, T. A. Davidan<sup>1</sup>, A. V. Kiselev<sup>1</sup>, S. G. Kritsuk<sup>1</sup>,  
I. Sh. Latypov<sup>1</sup>, A. A. Pavlovskii<sup>2</sup>, A. A. Tronin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS  
Saint Petersburg 197110, Russia  
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

<sup>2</sup> State Research and Design Center for Saint Petersburg Master Plan  
Saint Petersburg 199034, Russia  
E-mail: A.Pavlovskiy@kgg.gov.spb.ru

Since the foundation of Saint Petersburg certain areas of the city have been subject to floods caused by seawater surges from the Eastern part of the Gulf of Finland under the action of cyclonic processes. These floods caused significant damage to the city's economy. The Saint Petersburg Flood Prevention Facility Complex was completed in 2011 to protect the city from flooding. Nevertheless, the lower coast areas of the city continue to be flooded. The amount of flooded areas is currently estimated by using the mathematical model of the flood and the digital elevation model of the territory of Saint Petersburg. On September 27, 2018, the water level elevated up to 176 cm above the standard benchmark in the Neva's delta. During the flood period the European satellite Sentinel-1 passed over the city and performed a radar survey of the Eastern part of the Gulf of Finland. This allowed for the first time to register the structure of sea swell during the flood and to map the flooded areas of marches (coastal wetland areas). A "change detection" and color coding methods were used to sense signal differences in the radar scenes received on September 15 and September 27, 2018. The results indicate the possibility to include satellite radar monitoring in the complex of post-project monitoring methods for «online» detection of the flooded zone boundaries along the entire coast of the Neva Bay and the Gulf of Finland within the Saint Petersburg area.

**Keywords:** Saint Petersburg, flood, flooding, mapping, satellite, radar, monitoring

Accepted: 30.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-243-247

## References

1. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-borne Earth surveillance Radar Systems), V. S. Verba (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p., available at: [https://fileskachat.com/file/24462\\_a471e84e2604049a0b89615863ebf23a.html](https://fileskachat.com/file/24462_a471e84e2604049a0b89615863ebf23a.html).
2. *Geologicheskii slovar'* (Geological dictionary), Z. A. Smirnova, L. V. Vlasova (eds.), Moscow: Nedra, 1978, Vol. 1, 485 p.
3. *Government of Russian Federation: Order No. 360*, Date 18.04.2014 (Rev. 17.05.2016), available at: <http://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-18042014-n-360/>.
4. Pavlovskii A. A., Ob opredelenii zon zatopleniya na territorii Sankt-Peterburga (About definition of flooding zones on the territory of Saint Petersburg), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Gidrologiya*, Issue 43, 2016, pp. 39–50.