Восстановление растительности маршей Колоколкой губы Баренцева моря в 2013–2020 гг. на основе анализа спутниковых снимков Landsat-8

К. В. Иванова

*Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: ivanova.xenia@ya.ru*

В 2010 г. на территорию маршей Колоколкой губы Баренцева моря обрушился шторм, который уничтожил до 90 % растительного покрова. В данной работе изучено начало восстановления растительности в период с 2013 по 2020 г. на основе анализа спутниковых снимков Landsat-8 и нормализованного вегетационного индекса NDVI, непосредственно связанного с показателями надземной фитомассы. Усреднённые показатели NDVI за 2013–2020 гг. варьируют от 0,102 до 0,114. Такие изменения незначительны и не могут дать представления о восстановлении сообществ. Также стоит отметить, что начальные стадии восстановления растительности маршей нестабильны и подвержены межгодовым колебаниям погодных условий. Наблюдается постепенное увеличение площадей маршей, покрытых растительностью (от 166 до 370 га). Площадь маршей, покрытая водой, прежде всего зависит от высоты прилива, поэтому достаточно сильно колеблется (превышение до 24,9 %). Наблюдается последовательная смена стадий развития растительности: уменьшается доля обнажённого субстрата и начальных стадий сукцессии (NDVI от 0,07 до 0,16) от 45,7–63,3 до 31,2 %. Общая площадь, занятая растительностью (низкие и средние марши), к 2020 г. постепенно увеличивается почти в 5 раз (от 10,19 до 49,6 %). При этом возрастает доля средних маршей (NDVI > 0,33) от <1 до 14,5 %. Представленный анализ охватывает первые 10 лет восстановления растительного покрова маршей, дальнейшее изучение динамики растительного покрова позволит оценить потенциал этих важнейших биотопов к самовосстановлению в условиях современных климатических флуктуаций и дать прогностические оценки для подобных территорий Российской Арктики.

Ключевые слова: марши, динамика растительности, NDVI, Восточноевропейские тундры, Арктика

Одобрена к печати: 02.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-207-213

Введение

Изучение динамики состава и структуры растительного покрова Арктики под влиянием флуктуаций климата становится всё более актуальным, поскольку, с одной стороны, растительные сообщества этого региона отчётливо реагируют на климатические изменения, а с другой — именно растительность представляет собой наиболее чувствительный индикатор процессов, происходящих в природных экосистемах (Bhatt et al., 2017; Bratsch, 2016; Fraser et al., 2014; Kennedy, 2012; Laidler et al., 2008; May et al., 2017; Pouliot et al., 2009; Raynolds, Walker, 2016 и др.).

Приморские марши — это низменные, местами заболоченные, аккумулятивные равнины, формирующиеся под действием приливов, волн и нагонов, сложенные илистыми или песчано-илистыми наносами, покрытые преимущественно галофитной растительностью (Геоморфологический..., 2002). Несмотря на ограниченные площади, занимаемые растительными сообществами маршей арктической зоны, они имеют огромное природоохранное значение. Приморские марши — это кормовая база и места гнездования большого количества водоплавающих птиц, таких как белощёкая казарка, малый лебедь, белолобый гусь и многих других. В настоящее время эти биотопы находятся под угрозой деградации из-за эрозии прибрежной зоны вследствие усиления штормовой деятельности, а также повышения уровня моря и высокой вероятности загрязнения нефтепродуктами при аварийных ситуациях

на приморских месторождениях или судах, перевозящих нефть. О благополучии приморских маршей можно судить по отсутствию участков обнажённого субстрата, доминированию типичных арктических видов и отсутствию признаков эрозии или загрязнения (Gubbay et al., 2016).

Характеристика района исследований

Район исследований — система маршей Колоколкиной губы Баренцева моря (рис. 1). Динамика растительности этой территории ранее была изучена за период с 1973 по 2011 г. на основе спутниковых снимков Landsat (Лавриненко, 2012; Лавриненко и др., 2012). Результаты исследования показали значительное сокращение площади растительного покрова, связанное с сильным штормом в конце июля 2010 г. Большой контраст температуры между морем и материком привёл к сильному ураганному ветру. На ближайшей метеостанции Варандей скорость ветра достигала 23 м/с с порывами до 31 м/с, а по некоторым данным — более 35 м/с (точные максимальные скорости остались неизвестными, так как оборудование вышло из строя). 24–28 июля 2010 г., т.е. в дни шторма, прилив достигал высоты 101 см (по данным станции приливных наблюдений Тобседа) и совпал с нагонным подъёмом. На метеостанции Варандей в это же время отмечен максимум уровня моря — 358 см (Шабанова, Огородов, 2019). Таким образом, вся система маршей была покрыта слоем воды, а по мере её ухода территория оказалась погребена под слоем ила, поднятого штормом в Колоколкиной губе.

Рис. 1. Район исследований. На фрагменте снимка Landsat-8 (от 05.08.2013) выделена область маршей, преимущественно покрытая растительностью

Продолжение изучения межгодовой динамики растительности этой системы маршей после 2010 г. актуально, поскольку позволяет проследить восстановление растительного покрова приморских маршей после столь значительных нарушений.

Материалы и методы

Для анализа динамики растительного покрова на приморских маршах были отобраны пять безоблачных снимков Landsat-8 за 2013–2020 гг. со схожей высотой приливов в период максимальной вегетации, а именно — за первую половину августа. Данные за 2016, 2017 и 2019 гг. исключены из анализа из-за значительных изменений погодных условий и, как следствие, величины прилива. Предварительная обработка космических снимков включает радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию.

Растительный покров этого участка был изучен за период до шторма 2010 г. (Лавриненко, 2012), поэтому для анализа изменения структуры растительного покрова данное исследование проводили в пределах того же контура площадью 652 га. Далее в тексте результаты приводятся в процентах от этой площади. Границы участка были определены на основе полевых данных и визуального дешифрирования снимков с наибольшими значениями NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (1987) и наименьшими высотами приливов (45 см). В него входят как ненарушенные маршевые сообщества, так и участки субстрата или открытой воды.

При анализе был использован нормализованный вегетационный индекс NDVI, отражающий продуктивность надземной зелёной фитомассы. Значение индекса варьирует от -1 до 1 . Ранее была выявлена зависимость между значениями этого индекса и типом маршей (Sun et al., 2018), которая легла в основу дифференциации разных типов маршей в районе исследования. Для высоких маршей, которые имеют до 100 % проективного покрытия растительности, значение NDVI выше 0,52; для средних маршей диапазон значений индекса составляет 0,33–0,52; для низких с разреженным растительным покровом (до 50 %) — 0,16–0,33. Участки ила, постоянно подтапливаемые водой, растительный покров которых в основном представлен водорослевыми корками и отдельными экземплярами высших растений, характеризуются низкой величиной индекса — 0,07–0,16.

Обработку и анализ данных проводили в программном обеспечении ArcGis. Площадь, покрытую растительностью, рассчитывали по участкам со значениями NDVI $> 0,07$. Для них же определяли среднее значение вегетационного индекса. Ввиду специфичности условий местообитаний (засоленность и избыточное увлажнение, перепады высот менее 1 м) весь изучаемый участок покрыт маршевой растительностью. Другие сообщества (например, тундровые или псаммофитные группировки) отсутствуют, или доля их мала.

Межгодовая динамика растительного покрова маршей

За период с 2013 по 2020 г. средние значения вегетационного индекса площадей, занятых растительностью, не отличаются сильными межгодовыми колебаниями и варьируют от 0,1 до 0,13 (рис. 2, 3, см. с. 210). Однако важным изменением в течение этого периода представляется соотношение участков маршей, относящихся к разным типам: низким, средним и высоким, а также обнажённого субстрата с начальными стадиями сукцессии. Увеличение доли участков с высокими значениями NDVI и уменьшение с низкими, вероятнее всего, обуславливает отсутствие изменения средних значений.

Рис. 2. Средние показатели NDVI на маршах Колоколкиной губы и площадь, занимаемая растительным покровом, за период 2013–2020 гг.

Рис. 3. Показатели вегетационного индекса исследуемого участка в разные годы

В годы до крупного шторма 2010 г. площадь растительности колебалась от 54,7 до 97,5 % (Лавриненко, 2012). В 2013 г. растительность занимала только 10 % площади, а к 2020 г. уже 49,6 %.

Для 2013–2015 гг. не наблюдается значимых изменений между растительностью с разными показателями NDVI. Доля обнажённого субстрата с начальными стадиями сукцессии варьирует от 45,7 до 63,3 %. Суммарная доля маршей низкого и среднего уровней не превышает 10,4 %. Прежде всего, это связано с нестабильностью начальных стадий восстановления растительности маршей, подверженных межгодовым колебаниям погодных условий.

Анализ распределения площадей, которые занимают участки маршей с разными значениями показателей NDVI, позволяет проследить процесс восстановления растительности маршей Колоколкой губы (рис. 4, см. с. 211). После шторма 2010 г. растительность сохранилась лишь на двух наиболее возвышенных участках и занимала 43 га, значение NDVI для которых на тот период составило 0,1. На всей остальной площади растительность занесло илом, поднятым из Колоколкой губы, а часть территории затопило водой (показатели NDVI ниже нуля).

Рис. 4. Площади, занимаемые участками маршей с разными значениями NDVI

Площадь маршей, покрытая водой ($NDVI < 0,07$), нестабильна, имеются межгодовые колебания, что может быть вызвано приливами, поскольку даже небольшое повышение уровня моря приводит к затоплению обширных территорий. В 2013–2015 гг. вода покрывает от 26,4 до 44,1 %, к 2020 г. — 19,2 %.

Восстановление растительности маршей можно проследить по смене участков с разными значениями NDVI. Так, доля обнажённого субстрата (преимущественно ил), на котором начинает развиваться растительность ($NDVI$ от 0,07 до 0,16), уменьшается от 45,7–63,3 % в 2013–2015 гг. до 34,4 % в 2018 г. и 31,2 % в 2020 г.

Увеличивается доля низких и средних маршей. Растительность в этом случае представлена малопродуктивными сообществами с разреженным покровом *Puccinellia phryganodes* (Лавриненко и др., 2012). На более возвышенных участках появляется также *Carex subspathacea*, однако сообщества также малопродуктивны. Доля низких маршей постепенно увеличилась от 9,26 % в 2013 г. до 35,1 % в 2020 г.

На одном из уцелевших участков в северо-восточной части маршевой системы зарегистрированы наибольшие значения вегетационного индекса (до 0,47). По-видимому, здесь частично сохранились сообщества, переходные от маршей к тундрам, в которых обычны *Salix reptans*, *Empetrum hermaphroditum*, *Carex rariflora* и другие виды растений (Лавриненко и др., 2012). Растительность вокруг этого участка восстанавливается наиболее активно. Увеличение доли растительных сообществ средних маршей ($NDVI > 0,33$) от менее чем 1 % в 2013–2015 гг. до 14,5 % в 2020 г. свидетельствует о постепенной стабилизации процесса восстановления растительности этой маршевой системы.

Конечно, из-за небольших диапазонов значений индекса для разных классов маршей результаты могут не полностью соответствовать границам растительных сообществ разных уровней маршей, тем не менее показывают общую тенденцию. Можно судить о начале более интенсивного процесса восстановления растительности маршей Колоколковой губы Баренцева моря с 2018 г. Однако из-за суровых условий, в том числе интенсивных приливов, этот процесс идёт очень медленно.

Дальнейшее изучение динамики растительного покрова приморских маршей после их полной деградации позволит оценить потенциал этих важнейших биотопов к самовосстановлению в условиях современных климатических флуктуаций и дать прогностические оценки для подобных территорий Российской Арктики.

Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН по теме № AAAA-A19-119032090096-4. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00160).

Благодарю И. А. Лавриненко и О. В. Лавриненко за существенные замечания и советы при проведении исследований и подготовке настоящей работы.

Литература

1. Геоморфологический словарь-справочник / сост. Л. М. Ахромеев; под ред. П. Г. Шевченкова. Брянск: Изд-во Брянского гос. ун-та. 2002. 320 с.
2. Лавриненко И. А. Дистанционный мониторинг маршей побережья Баренцева моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 67–72.
3. Лавриненко И. А., Лавриненко О. В., Добрынин Д. В. Многолетняя динамика и гибель растительности маршей Колоколковой губы Баренцева моря // Растительность России. 2012. № 21. С. 117–128.
4. Шабанова Н. Н., Огородов С. А. Варандей-2010 — сильнейший штормовой нагон за всю историю наблюдений: причины, характеристика и последствия // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»). 2019. С. 214–217.
5. Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. No. 5. P. 055003.
6. Bratsch S. N., Epstein H. E., Buchhorn M., Walker D. A. Differentiating among four Arctic tundra plant communities at Ivotuk, Alaska using field spectroscopy // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 1. Art. No. 51.
7. Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I., Kokelj S. V., Sims R. A. Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the Western Canadian Arctic // Ecosystems. 2014. V. 17. No. 7. P. 1151–1168.
8. Gubbay S., Sanders N., Haynes T., Janssen J. A. M., Rodwell J. R., Nieto A., García Criado M., Beal S., Borg J., Kennedy M., Micu D., Otero M., Saunders G., Calix M. European red list of habitats. Pt. 1: Marine habitats. European Union, 2016. 46 p.
9. Kennedy R. E. New views on changing Arctic vegetation // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. No. 1. Art. No. 011001.
10. Laidler G. J., Treitz P. M., Atkinson D. M. Remote sensing of Arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // Arctic. 2008. P. 1–13.
11. May J. L., Healey N. C., Ahrends H. E., Hollister R. D., Tweedie C. E., Welker J. M., Gould W. A., Oberbauer S. F. Short-Term Impacts of the Air Temperature on Greening and Senescence in Alaskan Arctic Plant Tundra Habitats // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 12. Art. No. 1338.
12. Pouliot D., Latifovic R., Olthof I. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985–2006 // Intern. J. Remote Sensing. 2009. V. 30. No. 1. P. 149–168.
13. Reynolds M. K., Walker D. A. Increased wetness confounds Landsat-derived NDVI trends in the central Alaska North Slope region, 1985–2011 // Environmental Research Letters. 2016. V. 11(8). Art. No. 085004.
14. Sun C., Fagherazzi S., Liu Y. Classification mapping of salt marsh vegetation by flexible monthly NDVI time-series using Landsat imagery // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2018. V. 213. P. 61–80.

Restoration of vegetation cover of marches in the Kolokolkova Bay of the Barents Sea in 2013–2020 using Landsat-8 satellite imagery

K. V. Ivanova

*Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia
E-mail: ivanova.xenia@ya.ru*

A storm hit the territory of marches in the Kolokolkova Bay of Barents Sea and destroyed up to 90 % of the vegetation cover in 2010. We studied the beginning of vegetation restoration in the period from 2013–2020 using Landsat-8 and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Average NDVI for 2013–2020 varies from 0.102 to 0.114. Such changes are insignificant and cannot provide an indication of community recovery. It is also worth noting that the initial stages of vegetation recovery in marshes are unstable and subject to year-to-year fluctuations in weather conditions. There is a gradual increase in the area of marshes covered with vegetation (166–370 ha). The area of the marches covered

with water, first of all, depends on the height of the tide, therefore it fluctuates quite strongly (excess up to 24.9 %). A sequential change in the stages of vegetation development is observed: the proportion of the exposed substrate and the initial stages of succession (NDVI 0.07–0.16) decreases from 45.7–63.3 to 31.2 %. The total area occupied by vegetation (low and medium marches) by 2020 increased by almost 5 times (10.19–49.6 %). At the same time, the share of medium marches (NDVI > 0.33) increases from <1 to 14.5 %. The presented analysis covers the first 10 years of restoration of the vegetation cover. Further study of the dynamics of the vegetation cover will allow assessing the potential of these most important biotopes for self-healing under the conditions of modern climatic fluctuations and predicting estimates for such territories of the Russian Arctic.

Keywords: marsh, dynamics of vegetation, NDVI, Arctic, Eastern European tundra

Accepted: 02.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-207-213

References

1. *Geomorfologicheskii slovar'-spravochnik* (Geomorphological dictionary), Akhromeev L. M. (sost.), Shevchenko P. G. (ed.), Bryansk: Izd. Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002, 320 p. (in Russian).
2. Lavrinenko I. A., Remote monitoring of marches of the coast of the Barents Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 67–72 (in Russian).
3. Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V., Dobrynin D. V., Long-term dynamics and destruction of marsh vegetation in the Kolokolkova Bay of the Barents Sea, *Rastitel'nost' Rossii*, 2012, No. 21, pp. 117–128 (in Russian).
4. Shabanova N. N., Ogorodov S. A., Varandey-2010 storm surge — the strongest surge over the observation history: origin, characteristics, and consequences, *Regularities of Formation and Impact of Marine and Atmospheric Hazardous Phenomena and Disasters on the Coastal Zone of the Russian Federation Under the Conditions of Global Climatic and Industrial Challenges ("Dangerous Phenomena")*, Proc. Intern. Scientific Conf., Rostov-on-Don, 13–23 June, 2019, pp. 214–217 (in Russian).
5. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W., Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables, *Environmental Research Letters*, 2017, Vol. 12, No. 5, p. 055003.
6. Bratsch S. N., Epstein H. E., Buchhorn M., Walker D. A., Differentiating among four Arctic tundra plant communities at Ivotuk, Alaska using field spectroscopy, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 1, Art. No. 51.
7. Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I., Kokelj S. V., Sims R. A., Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the Western Canadian Arctic, *Ecosystems*, 2014, Vol. 17, No. 7, pp. 1151–1168.
8. Gubbay S., Sanders N., Haynes T., Janssen J. A. M., Rodwell J. R., Nieto A., García Criado M., Beal S., Borg J., Kennedy M., Micu D., Otero M., Saunders G., Calix M., European red list of habitats, Part 1: Marine habitats, *European Union*, 2016, 46 p.
9. Kennedy R. E., New views on changing Arctic vegetation, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, Art. No. 011001.
10. Laidler G. J., Treitz P. M., Atkinson D. M., Remote sensing of Arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut, *Arctic*, 2008, pp. 1–13.
11. May J. L., Healey N. C., Ahrends H. E., Hollister R. D., Tweedie C. E., Welker J. M., Gould W. A., Oberbauer S. F., Short-Term Impacts of the Air Temperature on Greening and Senescence in Alaskan Arctic Plant Tundra Habitats, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 12, Art. No. 1338.
12. Pouliot D., Latifovic R., Olthof I., Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985–2006, *Intern. J. Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, No. 1, pp. 149–168.
13. Raynolds M. K., Walker D. A., Increased wetness confounds Landsat-derived NDVI trends in the central Alaska North Slope region, 1985–2011, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11, No. 8, Art. No. 085004.
14. Sun C., Fagherazzi S., Liu Y., Classification mapping of salt marsh vegetation by flexible monthly NDVI time-series using Landsat imagery, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, Vol. 213, pp. 61–80.