

ДИНАМИКА ДЮННОГО МАССИВА НА ЛЕВОБЕРЕЖЬЕ РЕКИ ШОЙНЫ

¹Вяткин Е.Д., ^{1,2}Репкина Т.Ю.

¹РГПУ им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

По данным разновременных космических снимков и цифровых моделей рельефа изучена современная динамика дюнного массива на левом берегу р. Шойна за 1978-2022 гг.. Установлено, что динамика неоднородная и сложная, а смещение дюн достигло 200 метров за 44 года. За период 2003 – 2015 гг. выявлена деградация дюнного массива и сокращение его площади, что опровергает распространенное представление о бурном росте дюн. В ходе анализа установлено, что взаимосвязь между преобладающими направлениями ветра и векторами перемещения дюнных гряд неочевидна.

Ключевые слова: *побережье, эоловые процессы, дюны, Белое море, Шойна, дистанционное зондирование*

Дюны занимают около 34 % берегов мирового океана, свободных ото льда [Bird, 2008]. В настоящее время они изучаются во всем мире. Дюнный массив на левом берегу р. Шойна является интересным объектом для изучения приморских дюн Арктики и Субарктики. Движение дюн беспокоит жителей с. Шойна, расположенного вблизи дюнного массива, так как пески постепенно наступают на село, занося дома и создавая трудности для людей. Эта проблема в последние годы привлекла внимание журналистов [Тайны..., 2020], а журналистские публикации и документальные фильмы про «самую северную пустыню» увеличили туристическую популярность этого места. Сложилось мнение, что в последние годы дюны стали двигаться активнее. Таким образом, изучение динамики дюнного массива в устье р. Шойна является важным не только для понимания закономерностей движения приморских дюн, но и для местных жителей.

Цель исследования: изучение динамики дюнного массива на левом берегу р. Шойны и ее взаимосвязи с режимом ветров.

Задачами исследования были: съемка территории с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и построение цифровой модели местности (ЦММ) по полученным данным; подбор разновременных космических снимков изучаемой территории и их анализ; анализ архивных метеорологических данных; анализ взаимосвязи движения дюн с режимом ветров.

Материалы и методы. Временной интервал, возможный для достоверного анализа динамики дюнного массива, составляет около 44 лет (конец 1978 - 2022 гг.).

В июле 2022 года в районе устья р. Шойна в рамках комплексных полевых исследований [Репкина и др., 2022], была выполнена съемка территории с помощью БПЛА DJI Mini-2. Из полученных снимков с помощью ПО Agisoft Metashape Pro была построена ЦММ, увязанная с Балтийской системой нормальных высот. Привязка выполнялась по специальным меткам на местности (опознакам), плановое и высотное положение которых было определено при помощи RTK-комплекта PrinCe i50 (GNSS-приемник и базовая станция). Полученная модель имеет погрешность высоты около 1 метра, что связано с особенностями съемки легкими БПЛА; площадь модели около 7 км² что полностью покрывает дюнный массив.

Информация о планово-высотном положении дюн в 1978 году получена по крупномасштабной топографической карте с сечением изолиний 5 м. По данным этой карты методом интерполяции кригинга был построен GRID, а по нему создана ЦМР с размером пикселя около 10 м.

Также использована ЦММ Arctic DEM 2018 года с размером пикселя 2 м и вертикальной погрешностью менее метра. Модель была приведена к Балтийской системе высот.

Для более детального изучения динамики дюн данные о топографии поверхности были дополнены анализом многоканальных космических снимков Landsat 5 и Landsat 7. На изучаемую территорию есть спутниковые снимки с 1984 г. Поскольку разрешающая способность снимков Landsat составляет 30 м, а скорость перемещения дюн за год, предположительно, меньше этого значения, период между анализируемыми снимками был взят за 5 лет.

На разновременных космических снимках Landsat была опробована методика выделения сухих песков. Для этого применен метод расчета индекса песчаных дюн *SDI* (*sand dunes index*) [Rasheed et al., 2021].

$$SDI = \frac{SWIR - Green}{SWIR + Green}$$

Данный метод позволяет выделить сухой песок с наибольшей отражающей способностью. Однако, точность выявления дюн этим методом была различной на разных КС, и на некоторых снимках визуальное выявление дюнных гряд путем комбинации 4-3-2 каналов для Landsat 7, 6-5-4 каналов для Landsat 5 дали лучшие результаты.

Помимо многоканальных снимков Landsat, были использованы два спутниковых снимка Махаг с разрешением 1 м, отснятых в июле 2003 и августе 2015 года [Google Earth Engine: Timelapse]. Для удобства выделения песчаных дюн на этих снимках была применена цветовая коррекция. Далее гряды дюн и их элементы, не покрытые растительностью, были оконтурены полигонами, а для каждого полигона рассчитана площадь в гектарах. Для выявления смещения дюн для каждого полигона был рассчитан и отображен центр.

Для сравнения положения дюн на спутниковых снимках и цифровых моделях линиями выделялись центры гряд. На цифровых моделях эти линии проведены по «хребту» дюнной гряды, а на снимках – через центры полигонов, которыми выделены дюны. Недостаток такого метода заключается в том, что центр полигона не всегда может являться вершиной дюны.

Для анализа режима ветра был использован архив данных для метеостанции Шойна (1966 – 2019 гг.) из базы Всемирной Метеорологической организации [National..., 2022]. Для построения розы ветров, при которых возможно перемещение песков, были приняты следующие погодные условия: минимальная скорость ветра – 5 м/с, осадки менее 0.5 мм, температура – выше 0 С° [Данченков, 2021]. То есть все дни, когда песок был сухой, а скорость ветра достаточная для того, чтобы материал переносился.

Результаты. Собрана серия разновременных многоканальных спутниковых снимков Landsat 5 и Landsat 7, подобрана методика их анализа для выявления дюнных гряд. Опытным путем установлено, что применение метода выделения сухих песков по методу расчета их индекса *SDI* не во всех случаях дает необходимую информацию, поэтому наиболее эффективно для выявления дюн применять еще и визуальный анализ комбинации 6-5-4 каналов для Landsat 5 и 4-3-2 для Landsat 7. Также построена ЦМР по крупномасштабной топографической карте съемки 1978 года, получена и приведена к Балтийской системе высот ЦММ Arctic DEM, выполнена съемка местности с помощью БПЛА и построена ЦММ исследуемой территории на июль 2022 года. А также имеется база данных метеорологических наблюдений с 1966 по 2019 годы. Все это дает возможности для дальнейшего изучения динамики эолового рельефа, анализа зависимости повторяющихся ветров и к настоящему времени завершен анализ перемещения дюн за 1978-2022 гг. и за 2003 – 2015 гг.

На ЦМР 1978 года видны три центральные гряды, расположенные друг за другом субмеридианально (вытянувшись на ~3.5 км), одна прибрежная гряда западнее и гряда на юго-востоке. На ЦММ 2022 года видны две центральные гряды дюн, прибрежная западная и юго-восточная гряды. При сравнении этих картосхем хорошо видно, что гряды дюн за 44 года сместились в восточном и восточно-юго-восточном направлениях, от моря в сторону суши. Смещение составляет от 120 до 180 метров. При смещении гряды дюн сохранили свою форму. Две северных части центральной гряды соединились в одну. Динамика прибрежной западной дюны наиболее выражена, расстояние ее перемещения достигает 200 метров, при этом расстояние между западной и центральной грядой сократилось с ~500 до ~400 метров.

На снимках 2003 и 2015 года выделены несколько гряд дюн, вытянувшиеся субмеридионально, параллельно берегу: три центральных гряды, следующие друг за другом (обозначим их как северная, средняя и южная); восточная; прибрежная; южная и северо-восточная. Их площадь в гектарах представлена в (Табл. 1):

Табл. 1 Площадь дюнных гряд и ее изменение в 2003 – 2015 гг.

Гряда	2003 <i>S, га</i>	2015 <i>S, га</i>	Изменение, %
Северная центральная	24.0	20.9	– 12.9
Средняя центральная	23.9	25.9	+ 8.4
Южная центральная	30.9	29.5	– 4.5
Прибрежная	19.1	13.6	– 28.8
Северо-восточная	14.4	9.39	– 34.8
Восточная	8.1	6.1	– 24.7
Южная	5.8	4.7	– 19.0
Всего:	126.2	110.1	– 12.8

Для каждой точки, которыми были отмечены середины полигонов на снимках 2003 и 2015 года, было измерено расстояние и азимут смещения. Далее были получены средние значения смещений для каждой гряды (Табл. 2)

Табл. 2. Смещение дюнных гряд за 2003 – 2015 гг.

Гряда	Среднее смещение, м	Азимут
Северная центральная	57	129
Средняя центральная	56	109
Южная центральная	63	122
Прибрежная	73	123
Северо-восточная	79	108
Восточная	75	132
Южная	81	132
Общее среднее:	66	121

Анализируя эти данные, можно отметить, что за период с июля 2003 по август 2015 года общая площадь сухих песков, идентифицированных как подвижные дюны, сократилась на 16 Га или на 13 %. При этом в северной и средней части центральной гряды наблюдается прирост площади сухих песков. Прибрежная гряда дюн заметно деградирует, потеряв около 29 % площади. Восточная гряда, состоящая из двух отдельных песчаных массивов, также потеряла в площади около 25 %, сместившись на юго-восток к болоту.

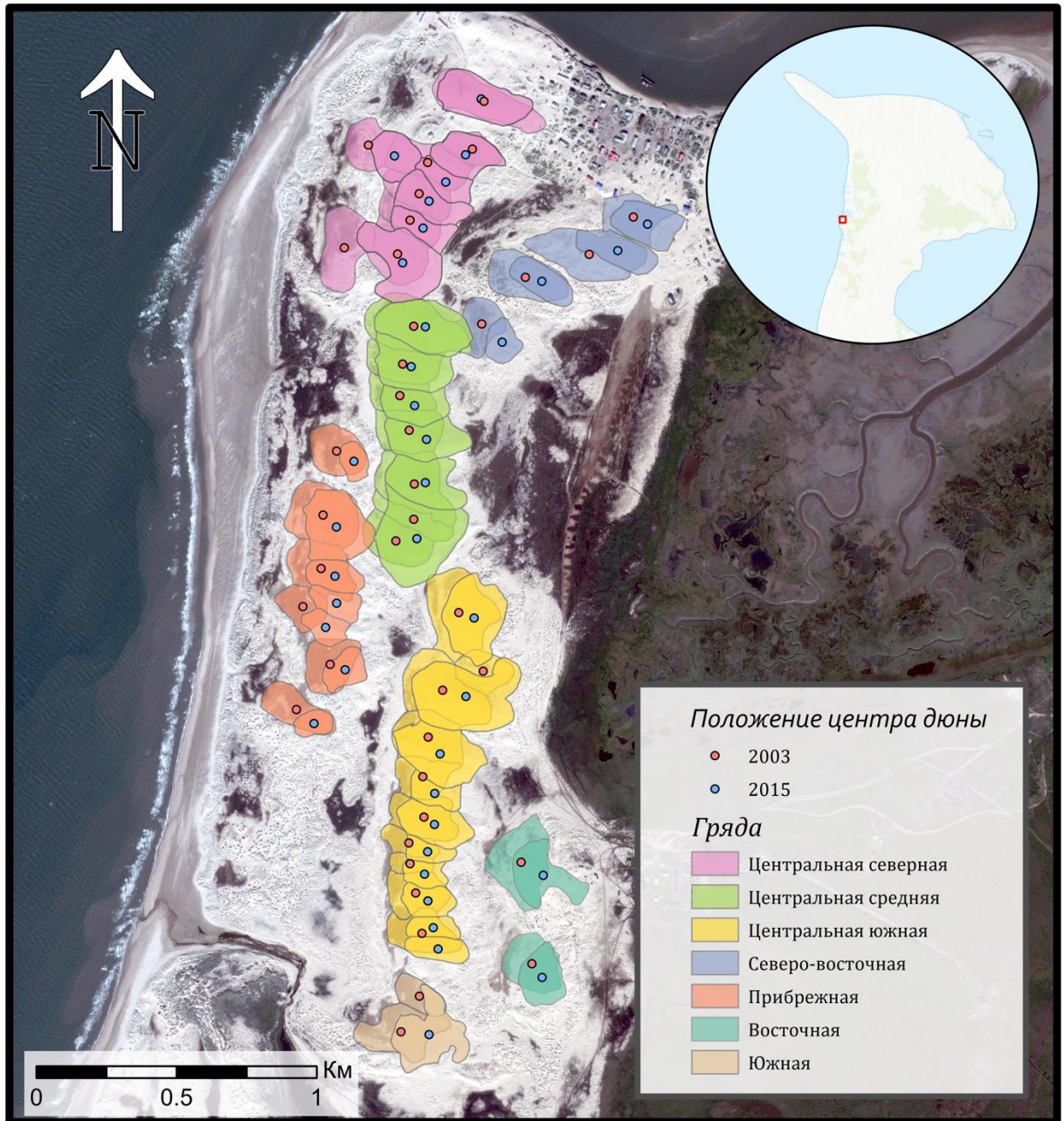


Рис. 1. Положение дюнных гряд в 2003 и 2015 гг.

Смещение дюн за 12 лет в среднем составило 66 метров. Самые маленькие смещения фиксируются у северной и средней части центральной гряды – 57 и 56 м. Самое большое – у прибрежной, восточной и южной. Вектор смещения дюн направлен на восток-юго-восток и юго-восток.

График повторяемости ветров свыше 5 м/с (Рис. 2), которые могут участвовать в переносе песка, показывает, что с 2003 по 2015 год на данной территории преобладали юго-западные и западные ветры, что не соответствует направлению смещения дюн.

Выводы. Прибрежный эоловый рельеф в районе устья р. Шойна быстро изменяется со временем. Гряды дюн смещаются в восточном и восточно-юго-восточном направлениях от моря в сторону болота и поселка Шойна, за 44 года это смещение составило в среднем около 150 метров. Наиболее быстрое смещение дюнных наблюдается в прибрежной части. При перемещении дюны гряды дюн сохраняют свою форму.

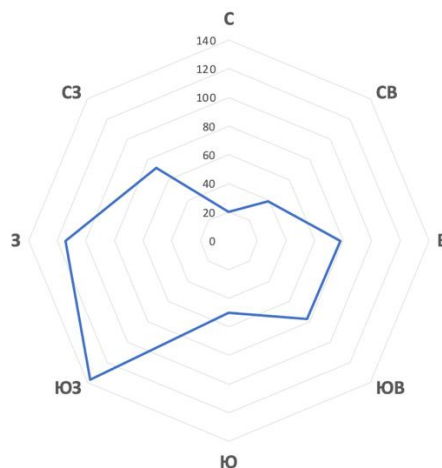


Рис. 2. Роза ветров свыше 5м/с за 2003 – 2015 гг.

За период с 2003 по 2015 год площадь сухих песков дюн сократилась почти на 13% – с 126 до 110 га. Это говорит о том, что в эти годы привнос песка ветрами со стороны моря был меньше, чем его выдувание в сторону суши. Дюнные гряды двигаются на восток и восток-юго-восток. Перемещение гряд неоднородно, самое маленькое наблюдается у гряд центральной группы, а самое большое – у прибрежной, северо-восточной и восточной. Смещение и изменение площади гряд взаимосвязанно. Так для центральной средней гряды характерен прирост площади 8 % и наименьшее среднее смещение – 56 метров, для северной и южной центральных смещение составило 56 и 63 метра, а сокращение площади – на 13 и 4,5 % соответственно. Прирост площади средней центральной гряды связан с тем, что она является областью промежуточной аккумуляции песков. Здесь откладывается материал из северной центральной и прибрежной гряды. Пески с восточной, северо-восточной и южной дюны сносятся на лайду, а гряды заметно деградируют.

Прямой зависимости между движением дюн и повторяемостью ветров, способных переносить пески, не выявлено: в 2003 – 2015 гг. преобладали западный и юго-западный ветры, а дюны сместились в юго-восточном направлении. Возможно, смещение дюн корректируют иные факторы.

Исследования выполнены за счет гранта РФФИ № 22-27-00499.

ЛИТЕРАТУРА

Данченков А.Р. Геоэкологическая оценка морского берега с использованием морфодинамического подхода в условиях особо охраняемой природной территории (на примере Куршской косы). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. 165с.

Тайна Шойны. Правила жизни в заполярном поселке, утопающем в песке. РИА Новости. 06.09.2020. [Электронный ресурс] // URL: <https://ria.ru/20200906/pustynya-1576801353.html>).

Репкина Т.Ю., Леонтьев П.А., Кублицкий Ю.А., Вяткин Е.Д., Крехов А.К., Орлов А.В. Рельеф и внутренне строение дюнного массива на левобережье р. Шойны (Канинский берег Белого моря): результаты полевых исследований // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Выпуск 9. С. 216-221. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-216-221

Rasheed M. J., Mashee Al-Ramahi F.K. Detection of the Impact of Climate Change on Desertification and Sand Dunes Formation East of the Tigris River in Salah Al-Din Governorate Using Remote Sensing Techniques // Iraqi Geological Journal. 2021. Vol.54, No. 1A. P. 69-83. doi: 10.46717/igj.54.1A.7Ms-2021-01-28

Bird E.C.F. Coastal geomorphology: an introduction. Second edition // Chichester; Hoboken, NJ: Wiley, 2008. 411 p.

Google Earth Engine: Timelapse [Электронный ресурс] //

URL: <https://earthengine.google.com/timelapse/>

National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс] //
<https://www.ncei.noaa.gov/>

University of Minnesota. Arctic DEM [Электронный ресурс] //
<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>

DYNAMICS OF DUNE MASSIF ON THE LEFT BANK OF THE SHOINA RIVER

¹*Vyatkin E.D.*, ^{1,2}*Repkina T.Yu*

¹Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia

²Institute of Geography of RAS, Moscow, Russia

The study of modern dynamics of the dune massif on the left bank of the river Shoyna was based on the data of multi-temporal satellite images and digital elevation models. It has been established that the dynamics is heterogeneous and complex, and the displacement of the dunes has reached 200 meters in 44 years. The obtained data prove the degradation of the dune massif and the reduction of its area for the period 2003-2015, which refutes the widespread idea of the rapid growth of dunes. In the course of the analysis, it was found that the relationship between the prevailing wind directions and the vectors of movement of dune ridges is not obvious.

Keywords: *sea coasts, aeolian process, coastal dunes, White Sea, Shoyna, remote sensing*