

ГЕОМОРФОЛОГИЯ, ГЕОГРАФИЯ

Научная статья
УДК 551.435.7
doi: 10.17223/25421379/34/8

АДАПТАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «МЕТОДА ФРАЙБЕРГЕРА» ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ДРЕЙФА ПЕСКА (НА ПРИМЕРЕ НАДЫМСКОГО ПРИОБЬЯ)



Екатерина Леонидовна Маликова¹, Дмитрий Геннадьевич Маликов²

^{1,2} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ malikovael@igm.nsc.ru

² dgmalikov@igm.nsc.ru

Аннотация. Результаты полевых работ и анализ данных метеонаблюдений позволили оценить потенциал переноса песка (DP), а также его производные (RDD , RDP) в Надымском Приобье. Расчет показал, что территория Надымского Приобья является регионом с относительно низкой энергией ветра. При этом в теплое время ветровая энергия практически вдвое сильнее, чем в холодное. Выявлено преобладающее восточное направление миграции песков (RDD), которое согласуется с ориентацией эоловых форм на дюнном массиве. Почти все эоловые формы сосредоточены в юго-восточной части раздвуха, куда песок перемещается под действием северных и северо-западных ветров. Наиболее активное продвижение дюны происходит в летнее время. Также был рассчитан индекс однонаправленности (RDP/DP) из средней скорости ветра, который показал унимодальный ветровой режим в регионе. Проведенные расчеты показателей потенциала дрейфа позволили оценить интенсивность эолового переноса песка в регионе. Вместе с тем были замечены некоторые региональные особенности применения стандартной методики и предложены возможные варианты исправления полученных погрешностей.

Ключевые слова: эоловый рельеф, ветровой режим, метод Фрайбергера, потенциал дрейфа песка, результирующее направление дрейфа, результирующий потенциал дрейфа

Источник финансирования: государственное задание ИГМ СО РАН № 122041400243-9.

Для цитирования: Маликова Е.Л., Маликов Д.Г. Адаптация и использование «метода Фрайбергера» для оценки потенциала дрейфа песка (на примере Надымского Приобья) // Геосферные исследования. 2025. № 1. С. 109–123. doi: 10.17223/25421379/34/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/34/8

ADAPTATION AND USE OF THE "FRYBERGER METHOD" FOR SAND DRIFT POTENTIAL ASSESSMENT (ON THE EXAMPLE OF THE NADYM OB AREA)

Ekaterina L. Malikova¹, Dmitriy G. Malikov²

^{1,2} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ malikovael@igm.nsc.ru

² dgmalikov@igm.nsc.ru

Abstract. The desertification problem is very acute in currently. The intensification of aeolian processes in the north of Western Siberia was greatly influenced by human economic activity: sand mining, pipelines, road building, etc. At the same time, climatic factors (wind is the main one) and the material composition of sediments play a paramount role in this matter. The wind regime and its directional variability have a great influence on the morphology and preservation of aeolian landforms. Accurate data on sand transport rates are very difficult to obtain, so many different methods based on environmental assumptions have been proposed to match experimental data. Among them, the method developed by Fryberger is the most widely used. This method is a modification of an equation developed to describe the effect of wind energy on sand drift in a relative rather than absolute manner. This method is also a useful tool for assessing the direction and intensity of wind transport of sand and the extent of dune formation. It is widely used all over the world. In addition to arid regions, this method is used for sand blowing on the coasts of oceans and large lakes, in the Arctic and Antarctic, and even, in an adapted form, to the dune fields of Mars. Despite the widespread use of this method around the world in Russian geomorphology, it turned out to be practically unnoticed. In the proposed work we would like to provide a description of Fryberger method and an indication of the most obvious problems and errors that can affect the obtained

result and lead to erroneous conclusions. The territory of the Nadym Prioby (north of Western Siberia) is considered as a model object for research. For this area, the sand drift potential index and its derivatives (*RDD*, *RDP*) were calculated. The calculation showed that the Nadym Ob area is a region with relatively low wind energy. Moreover, in warm seasons, wind energy is almost twice as powerful as in cold seasons. A predominant eastern direction of sand migration (*RDD*) has been identified, which is consistent with the orientation of aeolian forms on the dune massif. Almost all aeolian forms are concentrated in the southeastern part of the dune massif, where sand is moved by the northern and northwestern winds. The most active movement of the dune occurs in the summer. The directional variability (*RDP/DP*) was also calculated from the average wind speed, which showed a unimodal wind regimes in the region. The calculations of sand drift potential indicators made it possible to estimate the intensity of aeolian sand transport in the region. At the same time, some regional peculiarities in the application of the standard methodology were noted and possible options for correcting the errors obtained were proposed.

Keywords: northern West Siberia, aeolian relief, drift potential, resultant drift direction, resultant drift potential

Source of financing: state assignment of IGM SB RAS №122041400243-9.

For citation: Malikova E.L., Malikov D.G. (2025) Adaptation and use of the "Fryberger method" for sand drift potential assessment (on the example of the Nadym Ob Area. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 109–123. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/34/8

Введение

Ветер является основным фактором, формирующим эоловый рельеф. До конца XIX в. большинство ученых считали ветровой перенос наносов менее важным, чем перенос водой или ледниками. В начале XX в. наблюдался несколько больший интерес к эоловым процессам и отложениям, ими сформированным. Однако большая часть ранних работ носила описательный характер, и только в середине 1930-х гг. были достигнуты серьезные результаты в понимании механики эолового переноса и образования дюн [Pye, Tsoar, 2009].

Ветровой режим или количество энергии ветра и ее изменчивость по направлению оказывают значительное влияние на морфологию и сохранение эоловых форм рельефа. В частности, ранее было показано, что частота, величина и модальность направления ветров оказывают существенное влияние на форму и морфодинамику дюн [Bagnold, 1941, 1953; Fryberger, 1979; Tsoar, 1989; Lancaster, 1991].

Точные данные о скорости переноса песка получить очень трудно, и было предложено множество разных формул, основанных на допущениях об окружающей среде, чтобы соответствовать экспериментальным данным [Greeley, Iversen, 1985]. Альтернативные методы, основанные на переносе песка ветром или потенциале переноса песка, были предложены несколькими авторами за последние четыре десятилетия [Nickling, Wolfe, 1994; Bullard, 1997]. Среди них наибольшее распространение получил метод, разработанный Фрайбергером [Fryberger, 1978, 1979], в настоящее время принят в условиях пустынь мира. Метод Фрайбергера (Fryberger) является модификацией уравнения, разработанного для относительного, а не абсолютного описания влияния энергии ветра на снос песка [Lettau, Lettau, 1978]. Также этот метод является полезным инструментом для оценки направлений и интенсивности переноса песка ветром и масштабов дюнообразования.

Проблема опустынивания в настоящее время стоит очень остро. На активизацию эоловых процессов на севере Западной Сибири сильно повлияла хозяйственная деятельность человека: добыча песка, трубопроводы, строительство дорог и т.д. [Земцов, 1976; Сизов, 2015]. В то же время первостепенное значение в этом вопросе играют климатические факторы (главным из которых является ветер) и вещественный состав отложений. Для оценки интенсивности этого процесса в аридных регионах широко применяется метод расчета потенциала дрейфа по методу Фрайбергера (Fryberger), который широко применяется по всему миру [McKee, 1979; Bullard et al., 1996; Tsoar, 2001; Wang et al., 2002; Al-Awadhi et al., 2005; Zhang et al., 2015; Zhang, Zhang, 2022]. Помимо собственно аридных районов, данную методику применяют для песчаных раздувов на побережьях океанов и крупных озёр [Carson, MacLean, 1986; Pearce, Walker, 2005; Ludwig et al., 2017; Knight, Burningham, 2019] в условиях Арктики и Антарктики [Muhs, Budahn, 2006; Cohen-Zada et al., 2017], и даже, в адаптированном виде, к дюнным полям Марса [Lee, Thomas, 1995; Bridges et al., 2017].

Несмотря на широкую распространённость данной методики в отечественной геоморфологии, она оказалась незамеченной. Единственный известный нам случай применения метода Фрайбергера в российской литературе – монография О.И. Баженовой с соавторами [Баженова и др., 2023], посвященная экзогенному рельефообразованию в степях Даурии. В этой работе приведены результаты расчета потенциала дрейфа для территории Даурии, однако не описан механизм расчета и нет детального анализа полученных данных.

В предлагаемой работе мы бы хотели привести описание метода Фрайбергера и указать на наиболее явные проблемы и погрешности, которые могут повлиять на полученный результат и привести к ошибочным выводам. В качестве модельного объекта рассматриваются территории Надымского Приобья (север Западной Сибири).

Для указанной территории рассчитаны показатель потенциала дрейфа песка и его производные, а также предложены возможные механизмы, вносящие искажения в полученные результаты.

Характеристика района исследования

Север Западной Сибири занимает большую часть Западно-Сибирской равнины (рис. 1, а): от Карского моря до средней Оби. Располагается территория на заболоченных участках тундры, северной и средней тайги [Климатическая..., 1982]. На этой территории относительно широко распространены песчаные отложения. Обширные территории песков расположены на берегах реки Оби и в бассейнах ее притоков,

где их протяженность достигает сотен километров [Земцов, 1976].

Климат резкоконтинентальный, зима суровая и продолжительная, лето короткое. Также короткие осень и весна. Наблюдаются поздние весенние и ранние осенние заморозки, резкие колебания температуры в течение года. Безморозный период очень короткий. Среднегодовая температура изучаемой территории $-5,5^{\circ}\text{C}$, среднемесячная января $-23,7^{\circ}\text{C}$, июля $+15,7^{\circ}\text{C}$. Абсолютный минимум составил -58°C , абсолютный максимум $+35^{\circ}\text{C}$ [Научно-прикладной..., 1998]. Средняя скорость ветра в г. Надыме 3–4 м/с, скорости ветра 15 м/с бывают редко, максимальная 30–31 м/с. Летом преобладают ветры северных румбов, зимой – южных [Климатическая..., 1982; Расписание погоды...].

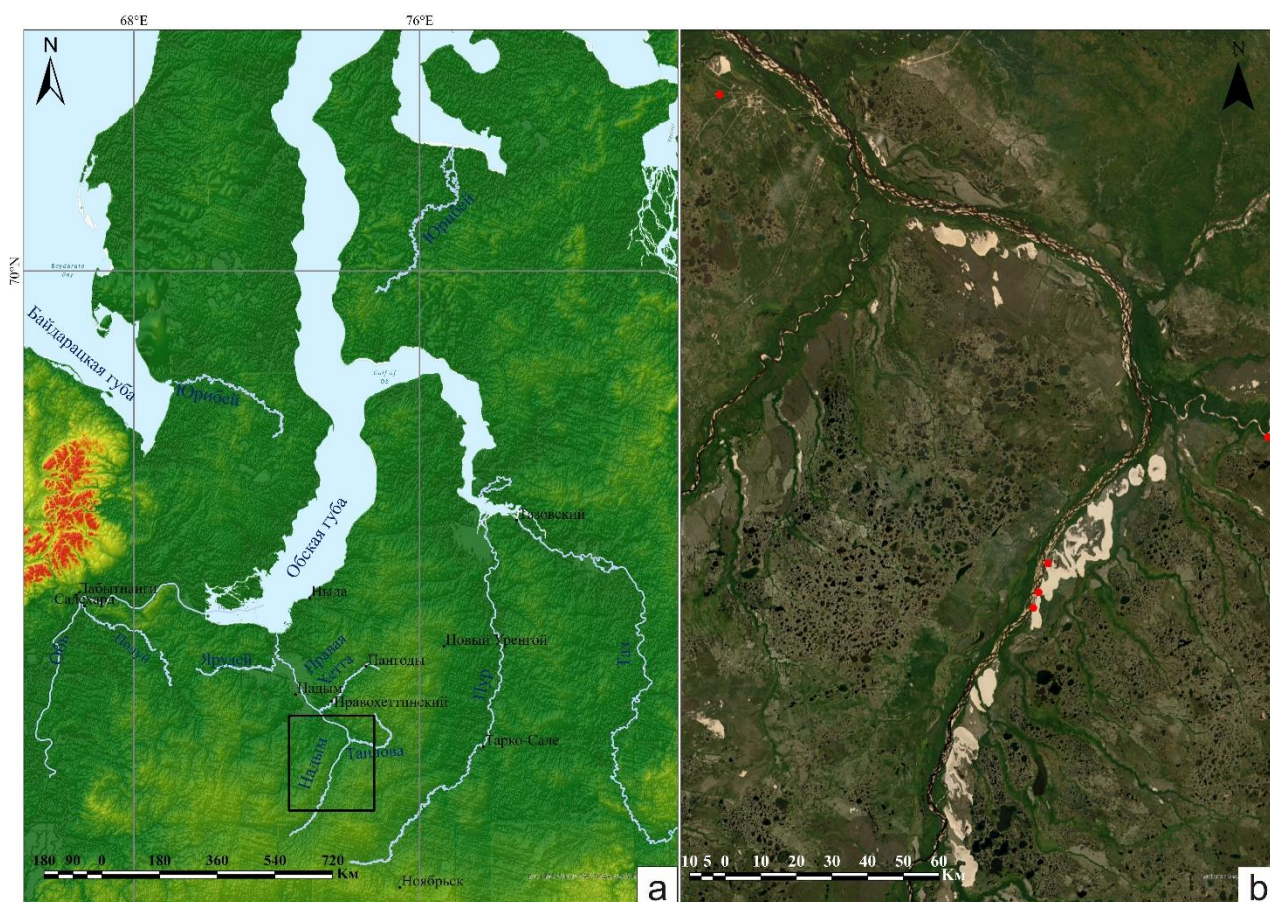


Рис. 1. Район работ: а – SRTM, б – космоснимок ArcGIS Earth

Точками отмечены места отбора проб на гранулометрический анализ

Fig. 1. Work area: а – SRTM, б – ArcGIS Earth satellite image

Dots indicate sampling locations for granulometric analysis

Территория имеет избыточный режим увлажнения. Количество осадков от 450 до 500 мм в год и отмечается увеличение показателя к юго-востоку. Снежный покров образуется в октябре, средняя мощность покрова 75 см. Около 60 дней в году – с метелями [Орлова, 1962].

Данный регион находится в зонах сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Особенностью региона является современное образование многолетнемерзлых пород, когда изменяются условия теплообмена.

Это происходит из-за периодических колебаний климата, а также из-за развития растительного покрова. В границах I и II террас рек Пура и Надыма, которые сложены песчаными отложениями, многолетнемерзлые отложения распространяются островным способом [Баулин и др., 1967; Инженерная геология СССР, 1976].

Материалы и методы

Экспедиционные работы проходили на севере Западной Сибири в 2017–2018 гг., в долине р. Надым и ее притоков (см. рис. 1, б). Территория Надымского Приобья, находящаяся в подзоне северной тайги Западно-Сибирской равнины. В качестве модельного объекта был выбран песчаный массив, находящийся в 30 км от г. Надым. Он вытянут с севера на юг на 2 км, с запада на восток на 1 км, высотой до 12 м [Маликова, 2022]. Его изучали многие исследователи [Устинова, 2007; Москаленко, 2012; Гончарова и др., 2015; Сизов, 2015, 2020; Сизов, Лоботросова, 2016; Зыкина и др., 2017; Соромотин и др., 2021; Сизов, Лобжанидзе, 2022].

В ходе экспедиционных работ были изучены серии береговых обнажений, расположенные вверх по течению р. Надым, отобраны образцы, взятые на участках активного проявления эоловых процессов. По ним был изучен гранулометрический состав отложений. Измерение гранулометрического состава было выполнено по 13 образцам из 5 геологических разрезов. Анализ выполнен на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Mastersizer 3000 (Malvern). Для расчетов всех климатических параметров были использованы данные метеонаблюдений с метеостанции «аэропорт Надым» с 1955 по 2022 г. [Расписание погоды...; Сизов, 2015] и результаты гранулометрического исследования разрезов.

Для оценки устойчивости почв к дефляции был рассчитан показатель **противодефляционной устойчивости почв** (Π_d). Для расчета противодефляционной устойчивости почв Г.А. Ларионов [1993] предложил формулу

$$\Pi_d = 24,7 + 0,9i - 0,3b - 0,4d + 10,1\Gamma^{0,85}, \quad (1)$$

где i – содержание ила (фракция <0,001 мм) в %; b – содержание мелкого песка (0,05–0,25 мм) в %; d – содержание крупного песка (>0,25 мм) в %; Γ – % содержания Гумуса в почве. В предлагаемой работе взято среднее значение содержания гумуса в иллювиально-гумусовых и иллювиально-железисто-гумусовых подзолистых почвах района исследования ~1,8 % [Тигеев, 2014].

Исходя из значений Π_d , определяются пороговые скорости ветра необходимые для активизации процессов дефляции. Согласно расчетам Г.А. Ларионова [1993], чем

выше противодефляционная устойчивость почв, тем выше пороговая скорость ветра, необходимая для активизации дефляции.

Метод Фрайбергера и его особенности

Для расчета потенциала дрейфа ($DP - Q$ в исходной формуле) используется следующее уравнение для каждого направления ветра [Fryberger, 1979]:

$$Q = V^2(V - V_t)t, \quad (2)$$

где V – скорость ветра, измеренная на высоте 10 м, V_t – ударная пороговая скорость ветра для песка со средним диаметром 0,25–0,30 мм на высоте 10 м (традиционно V_t считают равной 2 узлам или ~6 м/с, либо определяется для конкретного осадка), и t – количество времени, в течение которого дул ветер, в процентах. Часть уравнения (2): $V^2(V - V_t)$, известная как весовой коэффициент, делится на 100, это делается для простоты построения песчаных роз и удобства расчетов [Fryberger, 1979]. Потенциал дрейфа (DP) является суммой значений Q для всех направлений и выражается в векторных единицах (VU). Потенциал дрейфа представляет собой относительную способность ветра перемещать песок. В то же время DP не является истинной мерой перемещения отложений, а скорее относительным показателем потенциала переноса отложений, определяющим исключительно потенциал ветровой энергии [Pearce, Walker, 2005], и он полезен для сравнения этого параметра в различных регионах. Потенциал дрейфа рассчитывается для каждого направления ветра, и по результатам расчетов строятся песчаные розы (рис. 2).

Далее определяется результирующее направление дрейфа (RDD) для каждой розы. Оно рассчитывается как векторная сумма потенциалов дрейфа для отдельных направлений. RDD дает гипотетическое чистое направление, в котором песок будет двигаться с течением времени. Результирующий потенциал дрейфа (RDP) также был рассчитан для каждой розы и представляет собой величину RDD или чистого потенциала движения песка и задается в векторных единицах [Fryberger, 1979]. В исходной работе [Fryberger, 1979] не приводятся конкретные формулы для расчета результирующих направления и потенциала.

В результате, в ряде последующих работ возникали разночтения в конкретных формулах для расчета этих показателей. Наиболее часто показатели рассчитываются по формулам [Al-Awadhi et al., 2005]:

$$RDD = \text{Arctan}\left(\frac{C}{D}\right), \quad (3)$$

$$RDP = \sqrt{(C^2 + D^2)}. \quad (4)$$

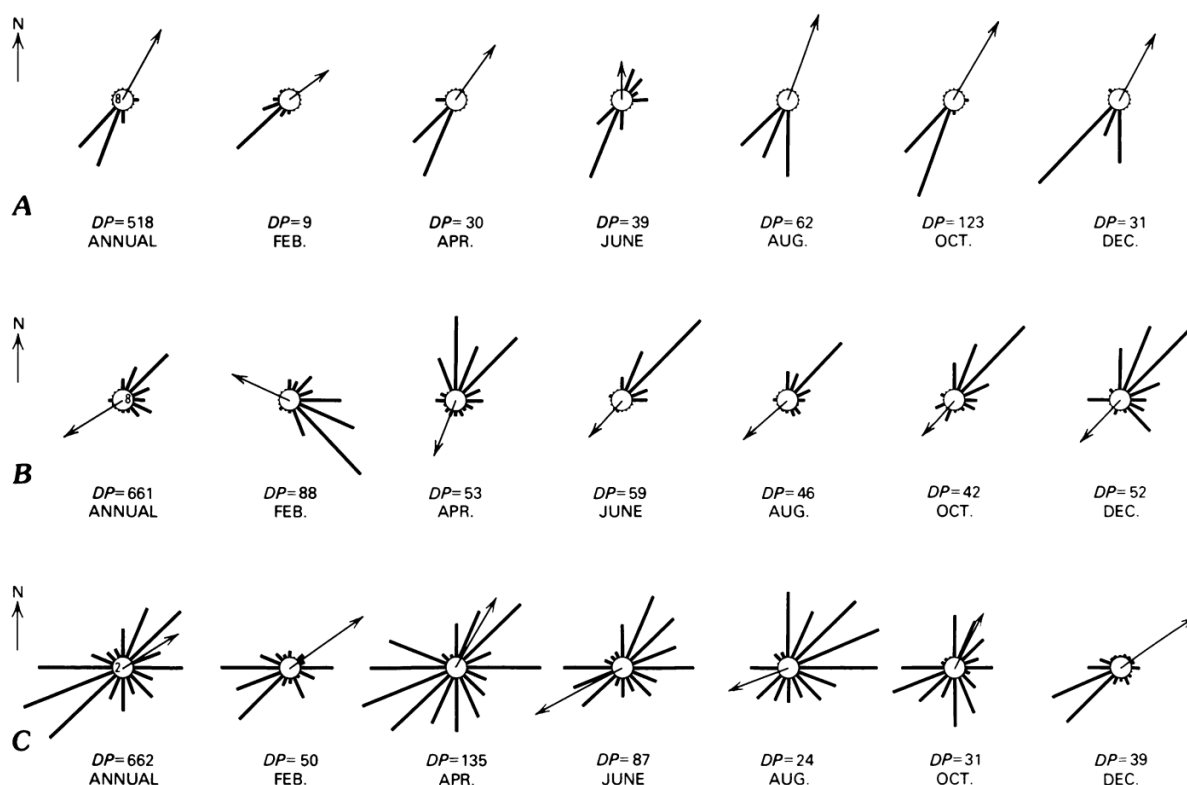


Рис. 2. Типичные ветровые режимы высокой энергии трех основных типов дюн по: [Fryberger, 1979]

Годовые и двухмесячные песочные розы изображают распределение эффективных ветров на каждой станции: А – узкий унимодальный – барханоидные дюны возле мыса Пеликан, Юго-Западная Африка; В – бимодальный – линейные дюны недалеко от Форта-Гуро, Мавритания; С – комплексные – звездчатые дюны возле Гудамиса, Ливия. Число в центральном круге каждой розы является понижающим коэффициентом. DP (потенциал дрейфа, в векторных единицах) указан для каждой розы. Стрелки указывают результирующее направление дрейфа (RDD)

Fig. 2. Typical high energy wind regimes of the three major dune types from: [Fryberger, 1979]

Annual and bi-monthly sand roses depict the distribution of effective winds at each station: A – narrow unimodal – barchanoid dunes near Cape Pelican, Southwest Africa; B – bimodal – linear dunes near Fort Gouraud, Mauritania; C – complex – stellar dunes near Goudamis, Libya. The number in the center circle of each rose is a decreasing factor. DP (drift potential, in vector units) is indicated for each rose. Arrows indicate the resulting direction of drift (RDD)

Значения C и D рассчитываются по формулам

$$C = \sum(VU) \cos \theta, \quad (5)$$

$$D = \sum(VU) \sin \theta, \quad (6)$$

где θ – средняя скорость ветра заданного класса ориентации [Al-Awadhi et al., 2005; Louassa et al., 2018; Zamani et al., 2020]. В то же время, в ряде других работ [Zhang et al., 2015; Abbasi et al., 2019; Zhang, Zhang, 2022] за значение θ принимается угол направления, с которого дует ветер (от 0 до 360°). Поскольку записи ветра выражают направление, с которого дует ветер, то направление эолового дрейфа (RDD) составляет 180° от DP таким образом, чтобы получить результирующее направление дрейфа, к полученному по формуле (3) добавляют 180° [Jewell, Nicoll, 2011], но этот момент обсуждается не во всех исследованиях по теме.

Последний показатель, который можно рассчитать благодаря методу Фрайбергера, – это так называемый индекс однонаправленности (RDP/DP), который представляет собой отношение результирующего потенциала дрейфа к потенциалу дрейфа. Значение индекса однонаправленности отражает фактическую изменчивость направления ветра, так что более низкие значения RDP/DP указывают на значительную изменчивость направления эффективных ветров, а более высокие значения указывают на то, что ветер дует с одного и того же направления (находится в диапазоне от 0 до 1).

Потенциал дрейфа (DP) позволяет классифицировать ветровую среду следующим образом [Fryberger, 1979]: ветровая среда с низкой энергией ($DP < 200VU$), ветровая среда средней энергии ($200 < DP < 400VU$) и высокоэнергетическая ветровая среда ($400VU < DP$). Ветровой режим в любом дюнном поле является основным

фактором, определяющим преобладающую форму дюн; унимодальный ветровой режим определяется малой изменчивостью ветра ($0,7 < RDP/DP$), что приводит к образованию барханов и поперечных дюн; бимодальный режим ветра ($0,3 < RDP/DP < 0,7$) связан с линейными дюнами, тогда как звездообразные дюны возникают в результате значительной изменчивости ветра ($0,3 > RDP/DP$) при сложном ветровом режиме.

Следует иметь в виду, что в исходной модели Фрайбергера [Fryberger 1979] используются стандартизированные данные о ветре для оценки потенциала переноса песка. Полученные в результате оценки потенциала дрейфа и векторы переноса позволяют интерпретировать и классифицировать ландшафты эоловых дюн. В то же время в ряде работ отмечаются ошибки, которые могут возникать при неправильном применении данной методики [Bullard, 1997], равно как и неточности ее самой [Pearce, Walker, 2005].

Так, в статье К. Пирса и И. Волкера [Pearce, Walker, 2005] показано, что в модели Фрайбергера существуют систематические смещения в значениях RDP и RDD . Показано, что ошибки возникают в результате двух основных причин. Во-первых, из-за вариаций в диапазоне секторов направления ветра, принятых в исследовании (8, 16 или 36). Второй, более значимой ошибкой является использования предписанных средних точек класса скорости ветра по сравнению с более статистически репрезентативными значениями (например, среднее или медиана) или минимально классифицированными (целый узел) скоростями ветра в весовом коэффициенте для расчетов DP . Эти погрешности могут приводить к существенному сдвигу векторов RDP на $3\text{--}58^\circ$ к югу [Pearce, Walker, 2005]. Причем влияние этих погрешностей является специфичным для конкретного места и может быть более значительным в регионах со сложным режимом ветров.

Этими авторами также были предложены рекомендации по уменьшению неточностей в модели Фрайбергера [1979]:

1) использование точных, неклассифицированных (с точностью до градуса) данных о направлении ветра, где они доступны, и их разбивку на 16 равных секторов по $22,58^\circ$ направления;

2) использование либо средних статистических значений в классах скорости ветра, либо минимально классифицированных значений целых узлов;

3) понимание того, что там, где доступны только данные по 36 точкам, преобразование в 16 классов направлений может привести к смещению частоты в сторону одной из сторон света и вызовет неточности в оценках DP и RDP в размере, который зависит от режима ветра в конкретном регионе [Pearce, Walker, 2005].

Современные метеоданные для территории Надымского Приобья, полностью удовлетворяют критерию разделения на 16 секторов направления ветра, как и в оригинальной методике Фрайбергера. Однако, в отличие от исходной методики, скорости ветра в отечественной традиции измеряются в м/с, и эти данные нельзя напрямую сопоставлять с расчетами, сделанными в узлах.

Подробно этот вопрос был освещен Дж. Буллард [Bullard, 1997]. Для корректного сопоставления данных нужно осуществлять перерасчет величин в отношениях: 1 узел = 0,5144 м/с и 1 м/с = 1,944 узла. Также в этой работе [Bullard, 1997] осуществлен пересчет классов ветровой энергии, предложенных Фрайбергером, при расчетах в м/с (табл. 1). В предлагаемой авторами работе расчеты дефляционного потенциала проводились с учетом скоростей ветра, измеренных в м/с, с вышеописанными поправками [Bullard, 1997; Pearce, Walker, 2005].

Таблица 1

Калибровка классификации ветровой энергии Фрайбергера [1979] для применения к скорости ветра, зарегистрированной в м/с по: [Bullard, 1997]

Table 1

Calibration of Fryberger's [1979] wind energy classification for application to wind speeds recorded in m/sec from: [Bullard, 1997]

Значения потенциала дрейфа VU		Энергия ветровой среды
Узлы	м/с	
<200	<27	Низкоэнергетическая среда
200–400	27–54	Среда со средней энергией
>400	>54	Высокоэнергетическая среда

Результаты и обсуждение

Для того чтобы оценить интенсивность развития эоловых процессов в Надымском Приобье были обобщены данные полевых наблюдений, наблюдений

с метеостанций и расчеты климатических параметров. По результатам изучения гранулометрического состава отложений в большинстве отобранных проб преобладают фракции мелкозернистого (0,1–0,25 мм) и среднезернистого (0,25–0,5 мм) песка. Такой размер

частиц свидетельствует о силе ветра, необходимой для транспортировки материала, свыше 3,5 м/с [Гаель, Смирнова, 1999]. Однако только при больших скоростях ветра (15 м/с) песчаные частицы способны перемещаться на высоте до 2,9 м, тогда как основная масса материала не поднимается выше 50 см [Гаель, Смирнова, 1999].

Расчет противодефляционной устойчивости почв (табл. 2) также показывает пороги скорости отрыва частиц менее 6 м/с. В то же время в большинстве работ, посвященных расчету этого параметра, показателя потенциала дрейфа [Fryberger, 1979; Al-Awadhi et al., 2005; Louassa et al., 2018 и др.], пороговая скорость ветра принята в 12 узлов (~ 6 м/с), и все результаты сопоставляются с этими значениями. Поэтому в

данном исследовании пороговая скорость ветра также принята в 6 м/с.

Исходя из данных о пороговых скоростях ветра и фактических наблюдений за погодой (<https://rp5.ru>), был рассчитан потенциал дрейфа (DP) и его производные (RDD , RDP), которые позволяют оценить масштабы эолового переноса (табл. 3). Розы ветров и песчаные розы построены по данным метеостанции аэропорта Надым (<https://rp5.ru>) для теплого (апрель–сентябрь) и холодного (октябрь–март) времен года, также был рассчитан ежегодный потенциал дрейфа (рис. 3). Были рассчитаны многолетние значения DP для двух временных отрезков: 2006–2014 гг. (среднее значение $C = 0,61$) и 2015–2022 гг. ($C = 0,16$), а также обобщенные значения за весь период наблюдений с 2006 по 2022 г.

Таблица 2

Противодефляционная устойчивость почв в Надымском Приобье

Table 2

Antideflation resistance of soils in the Nadym Ob area

№ разреза	Глубина/слой	Π_d [Ларионов, 1993]	Пороговая скорость ветра U_0 , м/с
НП 1	1-й слой (верх)	31,9	8
НП 1	1-й слой (низ)	3,45	<6
НП 1	2-й слой	10,8	<6
НП 5	55–60 см	5,45	<6
НП 4	1-й слой	11,3	<6
НП 4	2-й слой	3,5	<6
НП 3	60 см	11,1	<6
НП 3	150 см	10,8	<6
НП 3	250 см	11,3	<6
НП 2	100 см	6,4	<6
НП 2	200 см	6,7	<6
НП 2	270 см	13	<6
НП 2	300 см	5,6	<6

Таблица 3

Результаты расчетов потенциала дрейфа песка по методу Фрайбергера для территории Надымского Приобья в период 2006–2022 гг.

Table 3

Results of calculations of sand drift potential by Fryberger's method for the territory of the Nadym Ob area in the period 2006–2022

Сезон измерения	Период измерения	Всего измерений	Доля ветров ≥ 6 м/с	DP (VU)	RDP (VU)		RDP/DP		RDD	
					θ	φ	θ	φ	θ	φ
Холодный	2006–2014	10 836	16,92	13,64	12,76	2,44	0,93	0,18	44°	1°
Теплый	2006–2014	10 810	26,47	26,05	23,7	2,93	0,9	0,11	98°*	92°*
Годовой	2006–2014	21 646	21,69	19,73	13,99	0,94	0,71	0,5	63°	51°
Холодный	2015–2022	11 638	7,25	4,49	4,4	0,61	0,98	0,13	345°	100°
Теплый	2015–2022	11 566	10,28	6,52	6,16	1,31	0,94	0,2	191°*	143°*
Годовой	2015–2022	23 204	8,76	5,48	5,27	0,89	0,96	0,16	178°*	130°*
Холодный	2006–2022	22 474	11,91	8,99	8,64	1,28	0,96	0,14	12°	18°
Теплый	2006–2022	22 376	18,1	15,78	14,45	2,03	0,91	0,13	49°	110°*
Годовой	2006–2022	44 850	15,0	12,39	11,8	1,1	0,95	0,09	29°	76°

Примечание. * – итоговое значение $RDD = 180^\circ$ от рассчитанного значения по [Jewell, Nicoll, 2011], расчет выполнен по средней скорости ветра (θ) и по углу направления ветра (φ).

Note: * – final value of $RDD = 180^\circ$ from the calculated value according to [Jewell, Nicoll, 2011], the calculation was performed: by mean wind speed (θ), by wind direction angle (φ).

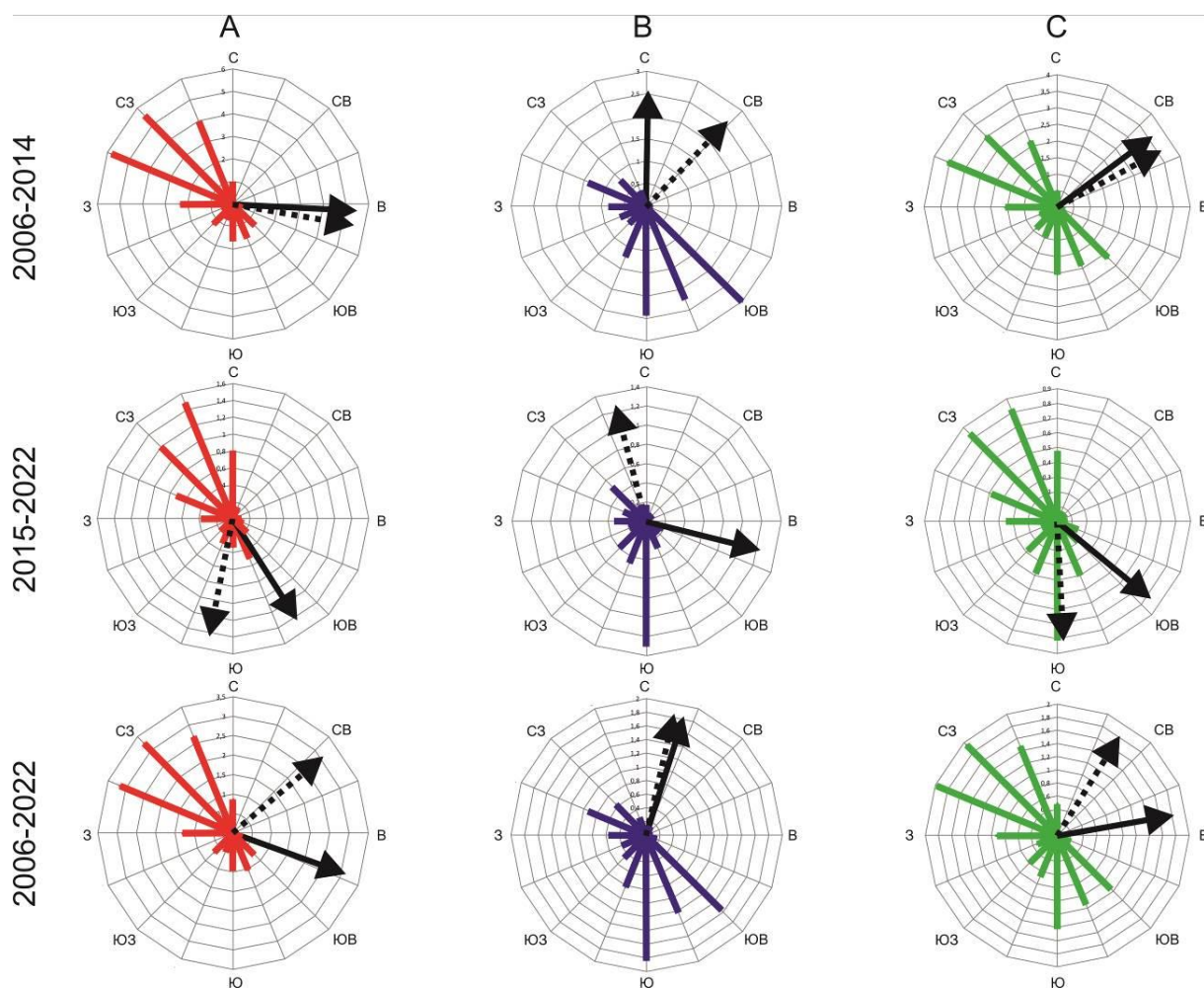


Рис. 3. Песчаные розы для территории Надымского Приобья

A – теплое время года, B – холодное время года, C – годовое распределение. Стрелкой показан показатель RDD, сплошная – при расчете из угла, пунктиром – при расчете из скорости ветра

Fig. 3. Sand roses for the Nadym Priobie territory

A – warm season, B – cold season, C – annual distribution. Arrow shows RDD, solid when calculated from angle, dashed when calculated from wind speed

Результаты расчета потенциала дрейфа DP характеризуют территорию Надымского Приобья как регион с относительно низкой энергией ветра. Среднегодовые значения DP здесь варьировали от 19,73 (2006–2014 гг.) до 5,48 (2015–2022 гг.) векторных единиц. При этом в теплое время года ветровая энергия практически вдвое сильнее, чем в холодное (см. табл. 3). Эти данные хорошо согласуются с динамикой песчаных массивов на изучаемой территории. Расчет показателя фактора климата [Маликова, 2022] и натурные наблюдения за интенсивностью эолового переноса [Сизов и др., 2020] показали, что скорость эолового осадконакопления определяется интенсивностью ветра с апреля по октябрь. В Надымском районе в зимнее время года дюны остаются практически неподвижными, поскольку замерзший и перекрытый снегом песок не подвержен развеванию. Только в

конце зимнего периода, когда из-под снега освобождаются вершины дюн, наблюдается незначительное продвижение песчаных массивов в холодное время года [Сизов и др., 2020]. Эти наблюдения позволяют считать корректным расчет DP для теплого и холодного времени года раздельно.

Проведенные расчеты несколько расходятся с представленными нами ранее [Маликова, Маликов, 2022]. Значения DP рассчитанные за 5-летний период (с 2015 по 2019 г.) для территории Надымского Приобья, характеризуют данный район как регион с высокой ветровой энергией. Это было связано с тем, что в предыдущей работе пороговая скорость ветра была принята в 5 м/с. Как отмечено выше, для более корректного сравнения с данными других исследователей в нашей работе пороговая скорость ветра также принята в 6 м/с. А приведенные нами ранее данные

[Маликова, Маликов, 2022] предлагаем считать неподходящими для корректного сравнения с исходной методикой.

В то же время, возможно, расчёты потенциала дрейфа при пороговой скорости в 5 м/с более приближены к реальным темпам эоловой транспортировки песчаного материала в районе. Однако это требует отдельной работы с натурной фиксацией скоростей эоловой транспортировки, что выходит за рамки данной работы.

Результирующий потенциал дрейфа

Как описано выше [Al-Awadhi et al., 2005], для расчета результирующих направлений (*RDD*) и потенциала (*RDP*) дрейфа учитывают значения показателей *C* и *D*, в основе которых лежит показатель θ . Однако существуют разночтения в интерпретации показателя θ – средняя скорость ветра или угол направления ветра [Al-Awadhi et al., 2005; Zhang et al., 2015; Louassa et al., 2018; Abbasi et al., 2019; Zamani et al., 2020]. Для уточнения этого момента в представляемой работе расчет *RDD* и *RDP* проведен обоими путями.

Расчет значений результирующего потенциала дрейфа, исходя из средних значений скоростей ветра, показывают значения, близкие к показателю *DP*, и составляют от 71 до 98 % от показателя *DP* (см. табл. 3). Если для основы расчета брать угол направления ветра, то значения *RDP* будут значительно ниже, не более 20 % от *DP*. Как показывает практика применения метода Фрайбергера [McKee, 1979; Wang et al., 2002; Al-Awadhi et al., 2005; Pearce, Walker, 2005; Jewell, Nieoll, 2011; Zhang, Zhang, 2022], во всем мире значение *RDP* всегда составляет существенную часть от показателя *DP*. И в этом смысле более корректным выглядит расчет данного показателя исходя из того, что θ – средняя скорость ветра. Подтверждением этого можно считать расчет индекса однонаправленности (*RDP/DP*).

Расчет индекса однонаправленности из средней скорости ветра показал унимодальный ветровой режим региона. Вне зависимости от сезона и хронологического интервала *RDP/DP* превосходит значение 0,7 (табл. 3). Согласно методике, такой ветровой режим должен приводить к образованию барханов и поперечных дюн [Fryberger, 1979]. Если в качестве основы расчетов брать угол направления ветра, то значения индекса однонаправленности становятся существенно ниже и варьируют от 0,09 до 0,18, только в одном случае достигая 0,5 (табл. 3). Столь низкие значения индекса однонаправленности должны способствовать формированию звездообразных дюн при сложном ветровом режиме [Fryberger, 1979].

На исследуемом дюнном раздуве эоловый рельеф в основном представлен полукруглыми и параболическими дюнами, также присутствует одна крупная

кольцевая дюна [Маликова, 2020]. Таким образом, реальное распределение эолового рельефа в районе исследования более соответствует типам, которые должны образовываться при унимодальном режиме ветров. Таким образом, при расчете индекса однонаправленности более правильным представляется брать значение θ как среднюю скорость ветра в заданном классе ориентации.

Результирующее направление дрейфа

Поскольку результирующее направление дрейфа (*RDD*) также зависит от значения показателя θ (формула (3)), в отношении которого есть разночтения, мы провели расчеты по обоим вариантам (средняя скорость и угол направления ветра). Как и в случае с показателем *RDP*, результаты расчета *RDD* показали существенные расхождения. Различия в полученных значениях *RDD* достигают 115°, в среднем же около 30° (табл. 3).

Как видно, полученные расхождения в значениях *RDD* сходны с расчетными значениями ошибок, опубликованными Пирсом и Волкером. Как отмечают авторы, погрешность является специфичной для конкретного места и может быть более значительной в регионах со сложным режимом ветров [Pearce, Walker, 2005]. Для показателя результирующего направления дрейфа показателен тем, что его можно проверить визуально по построенной песчаной розе (рис. 3). Поскольку записи ветра выражают направление, с которого дует ветер, то итоговое направление дрейфа будет направлено в противоположную сторону от направления основной массы лучей песчаной розы [Jewell, Nicoll, 2011].

Для большинства рассматриваемых временных интервалов наблюдается общая закономерность в распределении направления *RDD*. Если в качестве значения показателя θ (формула 3) учитывать угол направления ветра, то во всех случаях в теплое время года направление *RDD* соответствует восточному и юго-восточному направлениям. При расчете, исходя из средней скорости, направление *RDD* варьирует от северо-восточного до южного направления (рис. 3). В холодное время во всех случаях, кроме одного, направление *RDD* соответствует северной ориентации. Исключение составляет *RDD* на восток в период 2015–2022 гг., рассчитанное из направления ветра. При расчете среднегодового значения *RDD* направление, рассчитанное из направления ветра, варьирует от северо-восточного до юго-восточного. Расчет из средней скорости ветра дает вариацию от северо-северо-восточного до южного (см. рис. 2). Визуальная проверка *RDD* по полученным песчаным розам показывает, что более корректным является значение *RDD*, рассчитанное при показателе θ , равном углу

направления ветра. Рассчитанное таким образом направление дрейфа наиболее соответствует полученным песчаным розам.

Еще один момент, на который следует обратить внимание: во всех случаях при расчете *RDD* для теплого времени года к полученному расчетному значению *RDD* приходилось прибавлять 180° [Jewell, Nicoll, 2011]. В таком случае направление дрейфа соответствовало противоположному от того, с которого дует ветер. Для холодного времени года, напротив, более корректным выглядит простой результат расчета *RDD*. Возможно, такие разночтения и отражают специфичные ошибки для конкретного места и регионов со сложным режимом ветров [Pearce, Walker, 2005], которым, без сомнения, является территория Надымского Приобья.

Сопоставление полученных песчаных роз и расчетных показателей потенциала дрейфа с реальной геоморфологической обстановкой и климатом изучаемого района позволяет сделать заключение о корректности сделанных построений. Для территории Надымского Приобья характерно довольно стабильное распределение ветров, различающееся по сезонам. Около 75 % ветров дуют с юга (зимний период), северо-запада и севера (летний период). Современные результирующие направления дрейфа *RDD* (рассчитанные из угла направления ветра) отражают преобладающее восточное направление миграции песков. Это хорошо согласуется с ориентацией эоловых форм на дюнном массиве. Почти все эоловые формы сосредоточены в юго-восточной части раздува, куда песок перемещается под действием северных и северо-западных ветров в теплое время года (рис. 4).

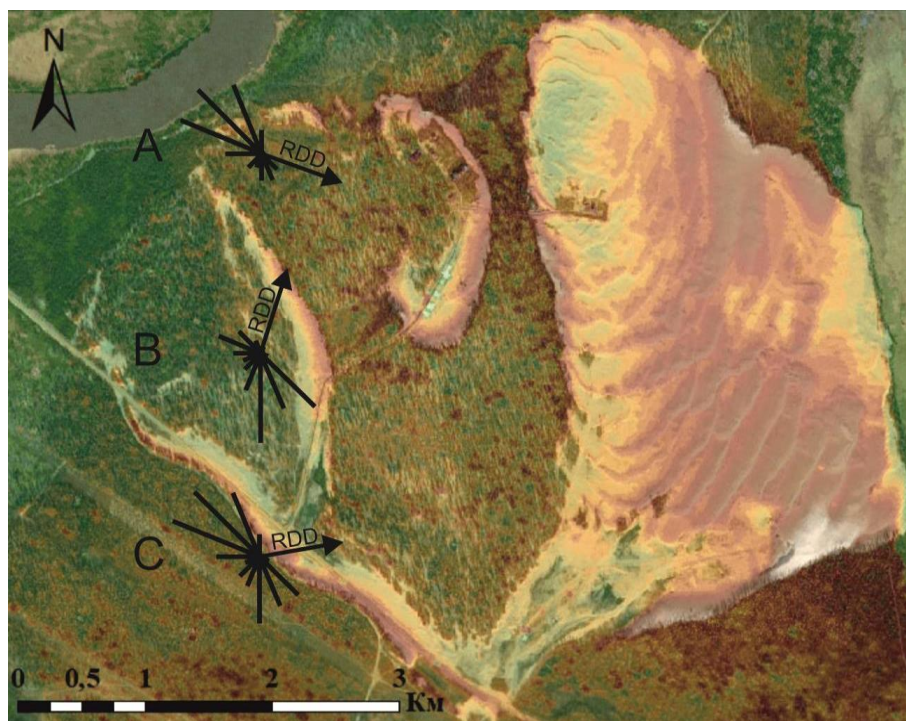


Рис. 4. Тайловая модель (с наложением космоснимка) исследуемого дюнного массива и песчаные розы за 2006–2022 гг.

A – теплое время года; B – холодное время года; C – годовое распределение

Fig. 4. Tile model (with space image overlay) of the studied dune massif and sand roses for 2006–2022

A – warm season; B – cold season; C – annual distribution

Геоморфология дюнного раздува с многочисленными полукруглыми и параболическими дюнами [Маликова, 2020] соответствует унимодальному режиму ветров.

Такой ветровой режим реконструируется при расчете индекса однонаправленности, если значение θ соответствует средней скорости ветра в заданном классе ориентации.

Таким образом, расчет потенциала дрейфа ветра для территории Надымского Приобья с учетом реальной геоморфологии района исследования можно сделать некоторые уточнения для формул (формулы (3)–(6)) расчета результирующего потенциала и направления дрейфа. В исследуем районе формулы (3) и (4) *RDP* и *RDD* принимают вид

$$RDP = \sqrt{(C^2 + D^2)}. \quad (7)$$

Значения C и D рассчитываются по формулам

$$C = \sum(VU) \cos \theta, \quad (8)$$

$$D = \sum(VU) \sin \theta, \quad (9)$$

где θ – средняя скорость ветра заданного класса ориентации.

$$RDD = \text{Arctan}\left(\frac{B}{E}\right). \quad (10)$$

Значения B и E рассчитываются по формулам

$$B = \sum(VU) \cos \varphi, \quad (11)$$

$$E = \sum(VU) \sin \varphi, \quad (12)$$

где φ – угол направления, с которого дует ветер (от 0 до 360°).

В приведенном виде (формулы (7)–(12)) рассчитанные показатели DP , RDP/DP , RDP и RDD принимают вид, наиболее соответствующий реальной геоморфологии дюнных массивов в Надымском Приобье, сезонной изменчивости направления и скорости ветра, общей интенсивности дефляции [Маликова, 2022] и реальным наблюдениям эолового осадконакопления в регионе [Сизов и др., 2020]. Возможно, такая изменчивость обусловлена существенной сезонной изменчивостью климата с кардинальной перестройкой ветров от северных (в летнее время) к южным (в зимнее).

В то же время мы не исключаем возможных ошибок в расчетах. Полученные результаты и сделанные выводы требуют подтверждения на более обширном материале из разных регионов Северной Евразии, особенно заполярных районов. По этой причине мы призываем исследователей проводить расчеты, используя как базовые формулы, предложенные Фрайбергером и его последователями [Fryberger, 1979; Al-Awadhi et al., 2005], с учетом поправок [Bullard, 1997; Pearce, Walker, 2005] и предложенных нами вариантов формул (формулы (7)–(12)).

Заключение

Проведение полевых работ и анализ данных метеонаблюдений позволили оценить устойчивость песчаных массивов к развеванию и потенциал переноса песка (DP) в Надымском Приобье. По результатам изучения гранулометрического состава отложений показано, что в отложениях в регионе преобладают фракции мелкого и среднезернистого песка. Это указывает на низкую пороговую скорость отрыва частиц. Проведение расчетов показателей потенциала дрейфа песчаных массивов позволило оценить интенсивность эолового переноса в регионе, а также отметить некоторые региональные особенности применения данной методики.

Результаты расчета потенциала дрейфа DP характеризуют территорию Надымского Приобья как регион с относительно низкой энергией ветра. При этом в теплое время года ветровая энергия практически вдвое сильнее, чем в холодное. Эти данные, хорошо согласуются с динамикой песчаных массивов на изучаемой территории. Расчет показателя фактора климата [Маликова, 2022] и натурные наблюдения за интенсивностью эолового переноса [Сизов и др., 2020] показали, что скорость эолового осадконакопления определяется интенсивностью ветра с апреля по октябрь. В Надымском районе в зимнее время года дюны остаются практически неподвижными, поскольку замерзший и перекрытый снегом песок не подвержен развеванию. Только в конце зимнего периода, когда из-под снега освобождаются вершины дюн, наблюдается незначительное продвижение песчаных массивов в холодное время года [Сизов и др., 2020]. Эти наблюдения позволяют считать корректным расчет DP для теплого и холодного времени года отдельно.

Расчеты показателей результирующего направления (RDD) и потенциала (RDP) дрейфа в регионе продемонстрировали, что для выполнения данных операций нужно брать различные исходные данные. Так, при вычислении индекса RDP расчеты нужно производить с учетом средней скорости ветра (формулы (7)–(9)). При расчете индекса RDD в основе должен лежать угол направления ветра (формулы (10)–(12)). Рассчитанные таким образом направление и потенциал дрейфа наиболее соответствуют полученным песчаным розам и реальной геоморфологии района.

Сопоставление полученных песчаных роз, и расчетных показателей потенциала дрейфа с реальной геоморфологической обстановкой и климатом изучаемого района позволяют сделать заключение о корректности сделанных построений. Для территории Надымского Приобья характерно довольно стабильное распределение ветров, различающееся по сезонам. Около 75 % ветров дуют с юга (зимний период), северо-запада и севера (летний период). Современные результирующие направления дрейфа RDD (рассчитанные из угла направления ветра) отражают преобладающее восточное направление миграции песков. Это хорошо согласуется с ориентацией эоловых форм на дюнном массиве. Почти все эоловые формы сосредоточены в юго-восточной части раздува, куда песок перемещается под действием северных и северо-западных ветров в теплое время года (рис. 4).

Проведенное исследование позволило уточнить особенности развития эолового рельефа в Надымском Приобье. В то же время мы не исключаем возможных ошибок в расчетах. Полученные результаты и сделанные выводы требуют подтверждения на более обширном материале из разных регионов Северной Евразии, особенно заполярных районов.

По этой причине мы призываем исследователей проводить расчеты, используя как базовые формулы, предложенные Фрайбергером и его последователями

[Fryberger, 1979; Al-Awadhi et al., 2005] с учетом поправок [Bullard, 1997; Pearce, Walker, 2005] и предложенных нами вариантов формул.

Список источников

- Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М.** Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М. : Наука, 1967. 214 с.
- Баженова О.И., Тюменцева Е.М., Черкашина А.А., Тухта С.А.** Экзогенное рельефообразование в степях Даурии. Новосибирск : СО РАН, 2023. 183 с.
- Гасель А.Г., Смирнова Л.Ф.** Пески и песчаные почвы. М. : Геос, 1999. 255 с.
- Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е.** Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1462–1473.
- Земцов А.А.** Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная части). Томск : Изд-во Том. ун-та, 1976. 343 с.
- Зыкина В.С., Зыкин В.С., Вольвах А.О., Овчинников И.Ю., Сизов О.С., Соромотин А.В.** Строение, криогенные образования и условия формирования верхнечетвертичных отложений Надымского Приобья // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 6. С. 14–25.
- Инженерная геология СССР. Т. 2 / под ред. Е.М. Сергеева.** М. : МГУ, 1976. 495 с.
- Климатическая характеристика зоны освоения нефти и газа Тюменского севера / под ред. К.К. Казачковой.** Л. : Гидрометеиздат, 1982. 200 с.
- Ларионов Г.А.** Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М. : Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
- Маликова Е.Л.** Об эоловых формах рельефа на примере Надымского Приобья // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6, № 3. С. 321–334.
- Маликова Е.Л.** Климатические факторы, формирующие современный эоловый рельеф Надымского Приобья // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2022. Т. 8, № 4. С. 264–277.
- Маликова Е.Л., Маликов Д.Г.** Потенциал дрейфа песка как отражение режима ветров в Надымском Приобье // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России : материалы ежегод. конф. по результатам экспедиционных исследований. Вып. 9. СПб., 2022. С. 167–169.
- Москаленко Н.Г.** Изменения растительности севера Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенных нарушений // Известия Русского географического общества. 2012. Т. 144, № 1. С. 63–72.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, вып. 17: Тюменская и Омская области.** СПб. : Гидрометеиздат, 1998. 703 с.
- Орлова В.В.** Западная Сибирь. Серия: Климат СССР. Вып. 4. Л. : Гидрометеиздат, 1962. 359 с.
- Расписание погоды.** URL: www.rp5.ru (дата обращения: 05.08.2023).
- Сизов О.С.** Геоэкологические аспекты современных эоловых процессов северотаежной подзоны Западной Сибири. Новосибирск : Гео, 2015. 124 с.
- Сизов О.С.** Дистанционное картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа в бассейне р. Надым (север Западной Сибири) // Географический вестник. 2020. № 2(53). С. 6–23.
- Сизов О.С., Вольвах А.О., Вишневский А.В., Соромотин А.В.** Литологические и геоморфологические признаки генезиса верхней толщи четвертичных отложений в нижнем течении р. Надым // Проблемы региональной экологии. 2020. № 3. С. 84–97.
- Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е.** Пространственное распределение естественного и антропогенного эолового рельефа на севере Западной Сибири // Геодезия и картография. 2022. Т. 83, № 8. С. 22–32.
- Сизов О.С., Лоботросова С.А.** Особенности восстановления растительности в пределах участков развееваемых песков северотаежной подзоны Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. 20, № 3. С. 3–13.
- Соромотин А.В., Эзау И.Н., Сизов О.С., Лоботросова С.А., Франк К.А.** Микроклиматические особенности песчаных дюн северной тайги Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 88–100.
- Тигеев А.А.** Особенности почвенного покрова бассейна реки Хыльмигьяха (Надым-Пуровское междуречье) // Вестник Тюменского государственного университета. Науки о Земле. 2014. № 4. С. 39–48.
- Устинова Е.В.** Картографический метод исследования участка полосы трассы газопровода Надым-Пунга // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 2. С. 27–31.
- Abbasi H., Opp C., Groll M., Gohardoust A.** Wind regime and sand transport in the Sistan and Registan regions (Iran/Afghanistan) // Zeitschrift für Geomorphologie. 2019. V. 62. P. 41–57.
- Al-Awadhi J.M., Al-Helal A., Al-Enezi A.** Sand drift potential in the desert of Kuwait // J. of Arid Environments. 2005. V. 63. P. 425–438.
- Bagnold R.A.** The physics of blown sand and desert dunes. London : Methuen (Publ.), 1941. 265 p.
- Bagnold R.A.** Forme des dunes de sable et regime des vents, Actions Eoliennes. Colloques Internationaux. Paris : Centre National de Recherches Scientifiques (Publ.), 1953. P. 23–32.
- Bridges N.T., Sullivan R., Newman C.E., Navarro S., van Beek J., Ewing R.C., Ayoub F., Silvestro S., Gasnault O., Le Mouélis S., Lapotre M.G.A., Rapin W.** Martian aeolian activity at the Bagnold Dunes, Gale Crater: The view from the surface and orbit // J. Geoph. Res.: Planets. 2017. V. 122. P. 2077–2110.
- Bullard J.E.** A note on the use of the Fryberger method for evaluating potential sand transport by wind // J. of Sedimentology Res. 1997. V. 67 (3). P. 499–501.
- Bullard J.E., Thomas D.S.G., Livingstone I., Wiggs G.F.S.** Wind energy variations in the southwestern Kalahari desert and implications for linear dune field activity // Earth Surface Processes and Landforms. 1996. V. 21. P. 263–278.

- Carson M.A., Maclean P.A.** Development of hybrid aeolian dunes: the William River dune field, Northwest Saskatchewan, Canada // Canadian J. of Earth Sci. 1986. V. 23 (12). P. 1974–1990.
- Cohen-Zada A.L., Maman S., Blumberg D.G.** Earth aeolian wind streaks: Comparison to wind data from model and stations // J. Geoph. Res.: Planets. 2017. V. 122. P. 1119–1137.
- Fryberger S.G.** Techniques for the evaluation of surface wind data in term of aeolian sand drift. US Geological Survey open file Report 78–405. 1978. 33 p.
- Fryberger S.G.** Dune forms and wind regime // McKee E.D. (Ed.). A study of global sand seas. Geological Survey Professional Paper, V. 1052. Washington, DC. : US Geological Survey and United States National Aeronautics and Space Administration (Publ.), 1979. P. 137–169.
- Jewell P.W., Nicoll K.** Wind regimes and aeolian transport in the Great Basin, U.S.A. // Geomorphology. 2011. V. 129. P. 1–13.
- Greeley R., Iversen J.D.** Wind as Geological Process. Cambridge : Cambridge University Press (Publ.), 1985. 333 p.
- Knight J., Burningham H.** Sand dunes and ventifacts on the coast of South Africa // Aeolian Res. 2019. V. 37. P. 44–58.
- Lancaster N.** The orientation of dunes with respect to sand transporting winds: a test of Rubin and Hunter's gross bedform normal rule // Acta Mechanica Supplementum. 1991. V. 2. P. 89–102.
- Lee P., Thomas P.C.** Longitudinal dunes on Mars: Relation to current wind regimes // J. Geoph. Res. 1995. V. 100 (E3). P. 5381–5395.
- Lettau K., Lettau H.H.** Experimental and micrometeorological field studies of dune migration // Exploring the world's driest climate. University of Wisconsin-Madison, Institute for Environmental Studies, IES Report. 1978. V. 101. P. 110–147.
- Louassa S., Merzouk M., Merzouk N.K.** Sand drift potential in western Algerian Hautes Plaines // Aeolian Res. 2018. V. 34. P. 27–34.
- Ludwig J., Lindhorst S., Betzler C., Bierstedt S.E., Borówka R.K.** Sedimentary rhythms in coastal dunes as a record of intra-annual changes in wind climate (Łeba, Poland) // Aeolian Res. 2017. V. 27. P. 67–77.
- McKee E.D. (Ed.)** A study of global sand seas. Geological Survey Professional Paper, V. 1052. Washington, DC. : US Geological Survey and United States National Aeronautics and Space Administration (Publ.), 1979. 429 p.
- Muhs D.R., Budahn J.R.** Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska // Canadian J. of Earth Sci. 2006. V. 43 (3). P. 323–327.
- Nickling W.G., Wolfe S.A.** The morphology and origin of Nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa // J. of Arid Environments. 1994. V. 28. P. 13–30.
- Pearce K.I., Walker I.J.** Frequency and magnitude biases in the «Fryberger» model, with implications for characterizing geomorphically effective winds // Geomorphology. 2005. V. 68. P. 39–55.
- Pye K., Tsoar H.** Aeolian Sand and Sand Dunes. Berlin : Springer (Publ.), 2009. 458 p.
- Tsoar H.** Linear dunes-forms and formation // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 1989. V. 13 (4). P. 507–528.
- Tsoar H.** Types of Aeolian Sand Dunes and Their Formation // Geomorphological Fluid Mechanics. Lecture Notes in Physics. V. 582. Berlin; Heidelberg : Springer (Publ.), 2001. P. 403–429.
- Wang X., Dong Z., Zhang J., Chen G.** Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert // Geomorphology. 2002. V. 42. P. 183–195.
- Zamani S., Mahmoodabadi M., Yazdanpanah N., Farpoor M.H.** Meteorological application of wind speed and direction linked to remote sensing images for the modelling of sand drift potential and dune morphology // Meteorological Applications. 2020. V. 27, Is. 1. P. 27:e1851.
- Zhang Z., Dong Z., Li C.** Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert // Aeolian Research. 2015. V. 17. P. 1–13.
- Zhang Y., Zhang Z.** Dune Field Patterns and Their Control Factors in the Middle Areas of China's Hexi Corridor Desert // Frontiers in Earth Science. 2022. V. 10. P. 1–13.

References

- Baulin V.V., Belopukhova E.B., Dubikov G.I., Shmelev L.M. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoi nuzmennosti* [Geocryological conditions of the West Siberian lowland]. Moscow: Nauka (Publ.). 1967. 214 p. In Russian
- Bazhenova O.I., Tyumentseva E.M., Cherkashina A.A., Tukhta S.A. *Ekzogennoye rel'yefoobrazovaniye v stepyakh Daurii* [Exogenous relief formation in the steppes of Dauria]. Novosibirsk: SO RAN (Publ.). 2023. 183 p. In Russian
- Gael A.G., Smimova L.F. *Peski i peschanye pochvy* [Sands and sandy soils]. Moscow: Geos (Publ.). 1999. 255 p. In Russian
- Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. No. 12. pp. 1329–1340. doi.org/10.7868/S0032180X15100032
- Zemtsov A.A. *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoy ravniny (severnaya i central'naya chasti)* [Geomorphology of the West Siberian Plain (northern and central parts)]. Tomsk: Tomsk University (Publ.). 1976. 343 p. In Russian
- Zykina V.S., Zykin V.S., Volvach A.O., Ovchinnikov I.Yu., Sizov O.S., Soromotin A.V. Upper quaternary deposits of the Nadym Ob area: stratigraphy, cryogenic forms, and deposition environments // Earth's Cryosphere. 2017. V. XXI. No. 6. pp. 12–20. doi.org/10.21782/EC1560-7496-2017-6(12-20)
- Inzhenernaya geologiya SSSR* [Engineering Geology of the USSR]. Sergeev E.M. (Ed.). V. 2. Moscow: MGU (Publ.). 1976. 495 p. In Russian
- Klimaticheskaya karakteristika zony osvoeniya nefi i gaza Tyumenskogo severa* [Climatic characteristics of the oil and gas development zone of the Tyumen North]. Kazachkova K.K. (Eds.). Leningrad: Hydrometeoizdat (Publ.). 1982. 200 p. In Russian
- Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonornosti i kolichestvennye ocenki* [Soil erosion and deflation: basic regularities and quantitative estimates]. Moscow: MGU (Publ.). 1993. 200 p. In Russian
- Malikova E.L. *Ob jeolovyh formah rel'efa na primere Nadymskogo Priob'ya* [About eola forms of relief on the example of Nadym Ob Area] // Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija. 2020. V. 6. No. 3. pp. 321–334. In Russian

- Malikova E.L. *Klimaticheskiye faktory, formiruyushchiye sovremennyye eolovyye rel'yef Nadym'skogo Priob'ya* [Climatic factors forming the modern aeolian relief in the Nadym Ob Area] // *Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologiya*. 2022. V. 8. No. 4. pp. 264–277. In Russian
- Malikova E.L., Malikov D.G. *Potentsial dreyfa peska, kak otrazheniye rezhima vetrov v Nadym'skom Priob'ye* [Sand drift potential as a reflection of the wind regime in the Nadym ob area] // *Rel'yef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii. Materialy ezhegodnoy konferencii po rezul'tatam ekspeditsionnykh issledovaniy*. V. 9. St. Petersburg. pp. 167–169. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-167-169> In Russian
- Moskalenko N.G. *Izmeneniya rastitel'nosti severa Zapadnoy Sibiri v usloviyakh menyayushchegosya klimata i tekhnogennykh narusheniy* [Changes in the vegetation of northern Western Siberia under conditions of changing climate and anthropogenic disturbances] // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2012. V. 144. No. 1. pp. 63–72. In Russian
- Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 2. Mnogoletnie dannye. Vyp. 17. Tyumenskaya i Omskaya oblasti* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 2. Long-term data. Is. 17. Tyumen and Omsk regions]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat (Publ.). 1998. 702 p. In Russian
- Orlova V.V. *Zapadnaya Sibir'. Seriya: Klimat SSSR* [Western Siberia. Climate of the USSR]. V. 4. Leningrad: Hydrometeoizdat (Publ.). 1962. 359 p. In Russian
- Raspisanie pogody* [Weather schedule]. [Electronic data]. Access way: www.rp5.ru (Date of accessed: 05.08.2023).
- Sizov O.S. *Geoekologicheskiye aspekty sovremennykh eolovykh processov severotayezhnoy podzony Zapadnoy Sibiri* [Geoeological aspects of modern aeolian processes in the north taiga subzone of Western Siberia]. Novosibirsk: Geo (Publ.). 2015. 124 p. In Russian
- Sizov O.S. *Dstantsionnoye kartografirovaniye lednikovyykh i vodno-lednikovyykh form rel'yefa v basseynе r. Nadym (sever Zapadnoy Sibiri)* [Remote mapping of glacial and fluvioglacial relief in the Nadym river basin (north of Western Siberia)] // *Geograficheskii vestnik*. 2020. No. 2 (53). pp. 6–23. doi.org/10.17072/2079-7877-2020-2-6-23 In Russian
- Sizov O.S., Volvakh A.O., Vishnevskiy A.V., Soromotin A.V. *Litologicheskiye i geomorfologicheskiye priznaki genezisa verkhney tolshchi chetvertichnykh otlozheniy v nizhnem techenii r. Nadym* [Lithological and geomorphological indicators of glacial genesis of the upper Quaternary strata in the lower course of the Nadym river] // *Problemy regional'noy ekologii*. 2020. No. 3. pp. 84–97. doi.org/10.24411/1728-323X-2020-13084 In Russian
- Sizov O.S., Lobzhanidze N.E. *Prostranstvennoye raspredeleniye yestestvennogo i antropogennogo eolovogo rel'yefa na severe Zapadnoy Sibiri* [Spatial distribution of natural and anthropogenic aeolian relief in the north of Western Siberia] // *Geodezia i Kartografiya*. 2022. V. 83. No. 8. pp. 22–32. doi.org/10.22389/0016-7126-2022-986-8-22-32 In Russian
- Sizov O.S., Lobotosova S.A. *Osobennosti vosstanovleniya rastitel'nosti v predelakh uchastkov razvevayemykh peskov severotayezhnoy podzony Zapadnoy Sibiri* [Features of revegetation of sand blow sites in the northern taiga subzone of Western Siberia] // *Kriosfera Zemli*. 2016. V. XX. No. 3. pp. 3–13. [doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(3-13\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(3-13)) In Russian
- Soromotin A.V., Ezau I.N., Sizov O.S., Lobotosova S.A., Frank K.A. *Mikroklimaticheskiye osobennosti peschanykh dyun severnoy taygi Zapadnoy Sibiri* [Microclimatic features of sand dunes in northern taiga in Western Siberia] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2021. No. 8. pp. 88–100. doi.org/10.52002/0130-2906-2021-8-88-100 In Russian
- Tigeev A.A. *Osobennosti pochvennogo pokrova basseyna reki Khylmig'yakha (Nadym-Purovskoye mezhdurech'ye)* [Features of soil cover of the Khylmig'yakha river basin (Nadym-Purov interfluvium)] // *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2014. No. 4. P. 39–48. In Russian
- Ustinova E.V. *Kartograficheskii metod issledovaniya uchastka polosy trassy gazoprovoda Nadym-Punga* [Cartographical method of research of the Nadym-Punga gas pipeline route area] // *Kriosfera Zemli*. 2007. V. XI. No. 2. pp. 27–31. In Russian
- Abbasi H., Opp C., Groll M., Gohardoust A. Wind regime and sand transport in the Sistan and Registan regions (Iran/Afghanistan) // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 2019. V. 62. pp. 41–57. doi.org/10.1127/zfg_suppl/2019/0543
- Al-Awadhi J.M., Al-Helal A., Al-Enezi A. Sand drift potential in the desert of Kuwait // *J. of Arid Environments*. 2005. V. 63. pp. 425–438. doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.011
- Bagnold R.A. *Forme des dunes de sable et regime des vents, Actions Eoliennes. Colloques Internationaux*. Paris: Centre National de Recherches Scientifiques (Publ.). 1953. pp. 23–32.
- Bagnold R.A. *The physics of blown sand and desert dunes*. London: Methuen (Publ.). 1941. 265 p.
- Bullard J.E. A note on the use of the Fryberger method for evaluating potential sand transport by wind // *J. of Sedimentology Res.* 1997. V. 67(3). pp. 499–501. doi.org/10.1306/D42685A9-2B26-11D7-8648000102C1865D
- Bullard J.E., Thomas D.S.G., Livingstone I., Wiggs G.F.S. Wind energy variations in the southwestern Kalahari desert and implications for linear dune field activity // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1996. V. 21. pp. 263–278. [doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199603\)21:3<263::AID-ESP627>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<263::AID-ESP627>3.0.CO;2-I)
- Carson M.A., Maclean P.A. Development of hybrid aeolian dunes: the William River dune field, Northwest Saskatchewan, Canada // *Canadian J. of Earth Sci.* 1986. V. 23 (12). pp. 1974–1990. doi.org/10.1139/e86-183
- Cohen-Zada A.L., Maman S., Blumberg D.G. Earth aeolian wind streaks: Comparison to wind data from model and stations // *J. Geoph. Res.: Planets*. 2017. V. 122. pp. 1119–1137. doi.org/10.1002/2016JE005242
- Fryberger S.G. *Dune forms and wind regime* // McKee E.D. (Ed.). *A study of global sand seas*. Geological Survey Professional Paper, V. 1052. Washington, DC.: US Geological Survey and United States National Aeronautics and Space Administration (Publ.), 1979. pp. 137–169.
- Fryberger S.G. *Techniques for the evaluation of surface wind data in term of aeolian sand drift*. US Geological Survey open file Report 78-405. 1978. 33 p.
- Jewell P.W., Nicoll K. Wind regimes and aeolian transport in the Great Basin, U.S.A. // *Geomorphology*. 2011. V. 129. pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.005>
- Greeley R., Iversen J.D. *Wind as Geological Process*. Cambridge: Cambridge University Press (Publ.). 1985. 333 p. doi.org/10.1177/030913338601000224
- Knight J., Burningham H. Sand dunes and ventifacts on the coast of South Africa // *Aeolian Res.* 2019. V. 37. pp. 44–58. doi.org/10.1016/j.aeolia.2019.02.003

- Lancaster N. The orientation of dunes with respect to sandtransporting winds: a test of Rubin and Hunter's gross bedformnormal rule // *Acta Mechanica Supplementum*. 1991. V. 2. pp. 89–102.
- Lee P., Thomas P.C. Longitudinal dunes on Mars: Relation to current wind regimes // *J. of Geoph. Res.* 1995. V. 100 (E3). pp. 5381–5395. doi.org/10.1029/95JE00225
- Lettau, K., Lettau, H.H. Experimental and micrometeorological field studies of dune migration // In: Lettau, H., Lettau, K. (Eds.) *Exploring the world's driest climate*. University of Wisconsin-Madison, Institute for Environmental Studies, IES Report, 1978. V. 101. pp. 110–147.
- Louassa S., Merzouk M., Merzouk N.K. Sand drift potential in western Algerian Hautes Plaines // *Aeolian Res.* 2018. V. 34. pp. 27–34. doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.07.002
- Ludwig J., Lindhorst S., Betzler C., Bierstedt S.E., Borówka R.K. Sedimentary rhythms in coastal dunes as a record of intra-annual changes in wind climate (Łeba, Poland) // *Aeolian Res.* 2017. V. 27. pp. 67–77. doi.org/10.1016/j.aeolia.2017.06.003
- McKee E.D. (Ed.) *A study of global sand seas*. Geological Survey Professional Paper, V. 1052. Washington, DC.: US Geological Survey and United States National Aeronautics and Space Administration (Publ.). 1979. 429 p.
- Muhs D.R., Budahn J.R. Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska // *Canadian J. of Earth Sci.* 2006. V. 43 (3). P. 323–327. doi.org/10.1139/e05-115
- Nickling W.G., Wolfe S.A. The morphology and origin of Nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa // *J. of Arid Environments*. 1994. V. 28. pp. 13–30. doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80017-5
- Pearce K.I., Walker I.J. Frequency and magnitude biases in the «Fryberger» model, with implications for characterizing geomorphically effective winds // *Geomorphology*. 2005. V. 68. pp. 39–55. doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.030
- Pye K., Tsoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Berlin: Springer (Publ.). 2009. 458 p. doi.org/10.1007/978-3-540-85910-9
- Tsoar H. Linear dunes-forms and formation // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 1989. V. 13(4). pp. 507–528. doi.org/10.1177/03091333890130040
- Tsoar H. Types of Aeolian Sand Dunes and Their Formation // *Geomorphological Fluid Mechanics. Lecture Notes in Physics*. V. 582. Berlin, Heidelberg: Springer (Publ.). 2001. pp. 403–429. doi.org/10.1007/3-540-45670-8_17
- Wang X., Dong Z., Zhang J., Chen G. Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert // *Geomorphology*. 2002. V. 42. pp. 183–195. doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00085-X
- Zamani S., Mahmoodabadi M., Yazdanpanah N., Farpoor M.H. Meteorological application of wind speed and direction linked to remote sensing images for the modelling of sand drift potential and dune morphology // *Meteorological Applications*. 2020. V. 27. Is. 1. pp. 27:e1851. doi.org/10.1002/met.1851
- Zhang Y., Zhang Z. Dune Field Patterns and Their Control Factors in the Middle Areas of China's Hexi Corridor Desert // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. pp. 1–13. https://doi.org/10.3389/feart.2022.818338
- Zhang Z., Dong Z., Li C. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert // *Aeolian Research*. 2015. V. 17. pp. 1–13. doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.01.004

Информация об авторах:

Маликова Е.Л., младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: malikovael@igm.nsc.ru

Маликов Д.Г., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: dgmalikov@igm.nsc.ru

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Malikova E.L., Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: malikovael@igm.nsc.ru

Malikov D.G., Cand. Sci. (Geol.-Miner), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: dgmalikov@igm.nsc.ru

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 21.02.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 03.03.2025

The article was submitted 21.02.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 03.03.2025