

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-328-334



ОЦЕНКА ДВИЖЕНИЯ КЫСЫЛ-СЫРСКОГО ТУКУЛАНА С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

✉ Сивцев Д.Е.^{1,2}, Лыткин В.М.¹, Шапошников Г.И.¹, Щипанова Е.А.¹

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ kotosogi@gmail.com

В работе приводятся результаты расчета индекса NDVI для оценки степени закрепления участка дюнного массива Кысыл-Сыр по данным съемки с помощью БПЛА в ходе полевых работ в 2024 году и использования космических снимков Sentinel-2. Сравнение разновременных ортофотопланов и ЦММ позволяет оценить динамику движения дюнных массивов и оценить площади закрепленных участков по растительности. Установлено, что использование данных дистанционного зондирования позволяет определить закрепленные растительностью площади тукуланов, которые свидетельствуют о заметном снижении скорости движения дюн.

Ключевые слова: тукулан, дюнные массивы, Виллой, NDVI, Sentinel-2, БПЛА

Введение. Песчаные массивы, формирующие пустынные ландшафты, широко распространены в криолитозоне Северного полушария. В Якутии подобные пустыни известны под названием тукуланы [Галанин и др., 2016], которые только в Центральной Якутии занимают площадь 2 660 км² (незакрепленные дюнные массивы) [Куть и др., 2015]. Одной из особенностей Центральной и Северной Якутии является широкое распространение толщ песчаных наносов приуроченных к Приморской низменности морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, долине Средней и Нижней Лены, бассейнам Виллюя, Оленька, Хатанги. Их мощность, на отдельных участках, немногим не достигает сотни метров, однако, проблема генезиса этих отложений до сих пор остается дискуссионной [Поморцев, Попов, 2017].

Цель настоящей работы — оценка движения ключевого участка Кысыл-Сырского тукулана с помощью многоспектральных снимков и материалов съемки с БПЛА на местности.

Район исследования. Объектом изучения является Кысыл-Сырский тукулан (63°54' с.ш., 123°16' в.д.), расположенный на правом берегу р. Виллой, в 20 км ниже от одноименного пгт. Кысыл-Сыр (рис. 1). Этот массив имеет площадь около 19 км², изучался с 2012 по 2016 гг. полевыми отрядами ИМЗ СО РАН и является наиболее информативным. Особенности геоморфологии и стратиграфии Кысыл-Сырского массива рассмотрены ранее [Галанин и др., 2018; Галанин, Павлова, 2019].

Поверхность массива (тукулана) характеризуется ярко выраженным сложноорганизованным дюнным рельефом. Массив имеет компактные размеры 6 × 4 км и эллипсовидную форму, вытянутую в юго-западном направлении.

Тукулан Кысыл-Сырский в плане имеет эллипсовидную форму. Его длина составляет около 6 км, а ширина — 3,5 км. В геоморфологическом отношении тукулан является дюной высшего порядка, образованной более мелкими комплексами дюн и междюнных понижений. В морфологическом отношении тукулан асимметричен. Северная и западная его части более высокие и имеют абсолютные отметки до 116 м, а южная и восточная части — 85-90 м [Павлова и др., 2015].

К бровке первой надпойменной террасы реки Виллой примыкает цепочка дюн длиной примерно 3 километра и высотой до 15 метров. Наветренный склон этих дюн выпуклый, с уклоном 20-25 градусов. С подветренной стороны дюны имеют вогнутую форму (угол наклона составляет 32-35 градусов). Здесь часто возникают мощные восходящие турбулентные воздушные потоки, вызывающие образование оврагов, где

эрозия обнажила почвенные слои разного возраста вместе с вертикально захороненными стволами деревьев.

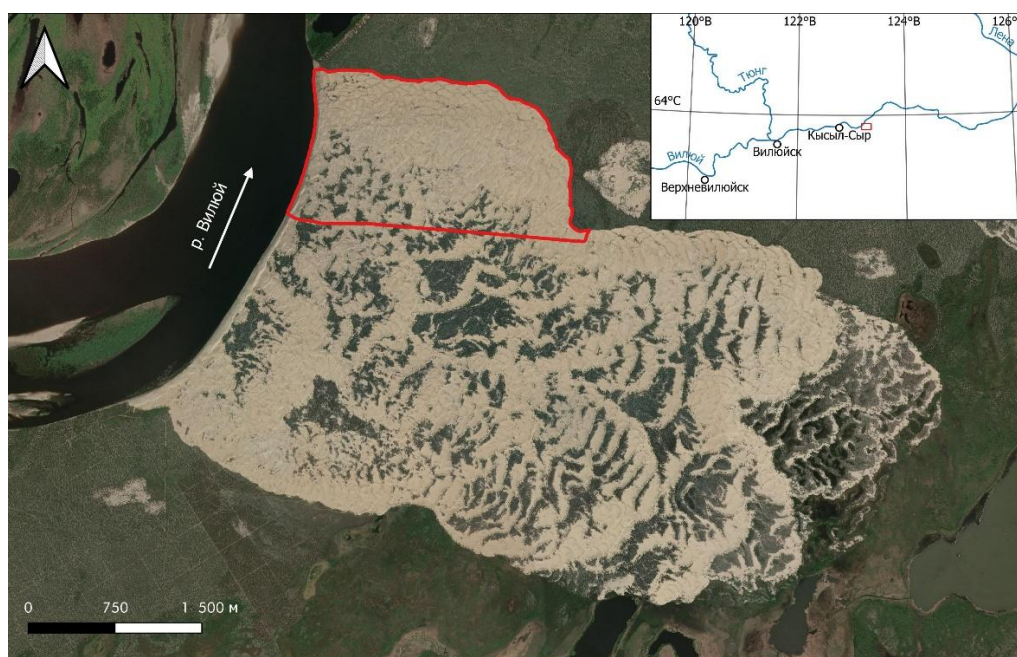


Рис. 1. Географическое положение Кысыл-Сырского тукулана: на снимке красным цветом обозначена исследуемая часть незакрепленного дюнного массива (картографическая основа — ESRI World Imagery).

Основную поверхность тукулана составляют дюны параболического типа (встречаются также иногда продольные и поперечные), чередующиеся с котловинами выдувания и междюнными понижениями, занятые древесными куртинами (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид Кысыл-Сырского тукулана с четким рисунком параболических дюн по направлению движения незакрепленного массива.

Форма дюн серповидная, длина их в пределах 100-150 м, средняя высота 3-6 м, а в юго-восточной части встречаются до 8-12 м. Они имеют наветренную пологую сторону крутизной 12-15° и подветренную — 33-35°. Поверхность дюн бугристая (за исключением наветренной части), осложнена кочками и куртинами, прослеживается рябь течений. Преобладают полынные и разнотравно-злаковые кочки округлой или эллипсовидной

формы высотой от 10 до 60 см и диаметром от 5 до 45 см. Иногда встречаются куртины березы высотой до 3-4 м и диаметром 7-8 м [Павлова и др., 2015].

Некоторые междюнные понижения заняты древесными куртинами, представленные сосной обыкновенной с толокнянково-брусничным и лишайниковым покровом. Полупустынные группировки наиболее распространены в пределах современных дюнных массивов (тукуланов). Крайне разреженный растительный покров образован здесь куртинами ксерофитных полукустарничков (*Thymus sergievskajae*, *Krascheninnikovia lenensis*, *Ephedra monosperma*) и многолетних трав, многие из которых эндемики (*Koeleria skrjabinii*, *K. karavajevii*, *Artemisia karavajevii*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Rumex graminifolius* и др.). [Галанин, 2021].

Методика исследований. Для оценки движения тукуланов использовались материалы съемки с БПЛА и многоспектральные космические снимки со спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м для каналов стандартных цветов и ближнего инфракрасного (БИК). Снимок был подобран под дату съемки тукулана с БПЛА (12.08.2024).

Аэрофотосъемка проводилась БПЛА DJI Mavic 3 в надир с высоты 150 м над точкой старта съемки на тукулане. Постобработка материалов съемки выполнялась в Agisoft Metashape. В результате обработки материалов съемки для активной части Кысыл-Сырского тукулана построены цифровые модели местности (ЦММ) и ортофотопланы с пространственным разрешением менее 0,1 м. Для точной привязки ранее были установлены реперные «кресты», которые были обновлены и окрашены во время полевых работ (рис. 3).



Рис. 3. Работы по обновлению реперных «крестов» в августе 2024 г.

Для определения на многозональном космическом снимке растительности использовался Нормализованный Разностный Вегетационный Индекс (NDVI). Данный индекс измеряет густоту зеленой массы растительности, зафиксированной на спутниковом снимке, принцип работы описан в [Kriegler et al., 1969]. Здоровая растительность имеет очень характерную кривую спектрального отражения, которую мы можем использовать для вычисления разницы между двумя диапазонами — видимым красным и ближним инфракрасным. NDVI отображает эту разницу в виде числа и рассчитывается по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}.$$

где NIR — значение спектра в канале ближнего инфракрасного излучения (БИК), Red — значение спектра в красном канале.

Значения NDVI варьируются от $-1,0$ до $1,0$, где отрицательные значения чаще всего указывают на наличие облаков, водной поверхности или снега, а значения, близкие к нулю — на скалы или оголенную почву. Очень низкие значения NDVI ($0,1$ и меньше) могут быть связаны с наличием на снимке пустых скалистых участков, песка или снега. Средние значения (от $0,2$ до $0,3$) говорят об обнаружении кустарников и лугов, а высокие значения (от $0,6$ до $0,8$) — лесов. Для песчаных массивов использование вегетационных индексов и визуального дешифрирования применялось в различных работах [Zheng *et al.*, 2020; Паламарчук и др., 2023]. Сравнение площади растительности на снимке и ортофотоплане происходило по результатам визуального дешифрирования и расчета индекса NDVI для космического снимка.

Результаты. Движение активных дюн имеет два направления — на север и на восток, что соответствует направлению господствующих ветров. Большинство дюн имеет параболическую форму, характерную для участков вблизи береговых линий — в данном случае р. Вилюй.

При сравнении дешифрированного ортофотоплана и синтетического растра NDVI четко выделяются участки леса, хуже — отдельно стоящие деревья и кустарники по краям параболических дюн (рис. 4). Значения вегетационного индекса оказались низкими из-за пространственного разрешения снимков (10 м), что не позволяет достоверно отделить единичные деревья или разрозненную растительность по грядам или междюнным понижениям. Поэтому было выбрано значение индекса $0,1$ как граничное.

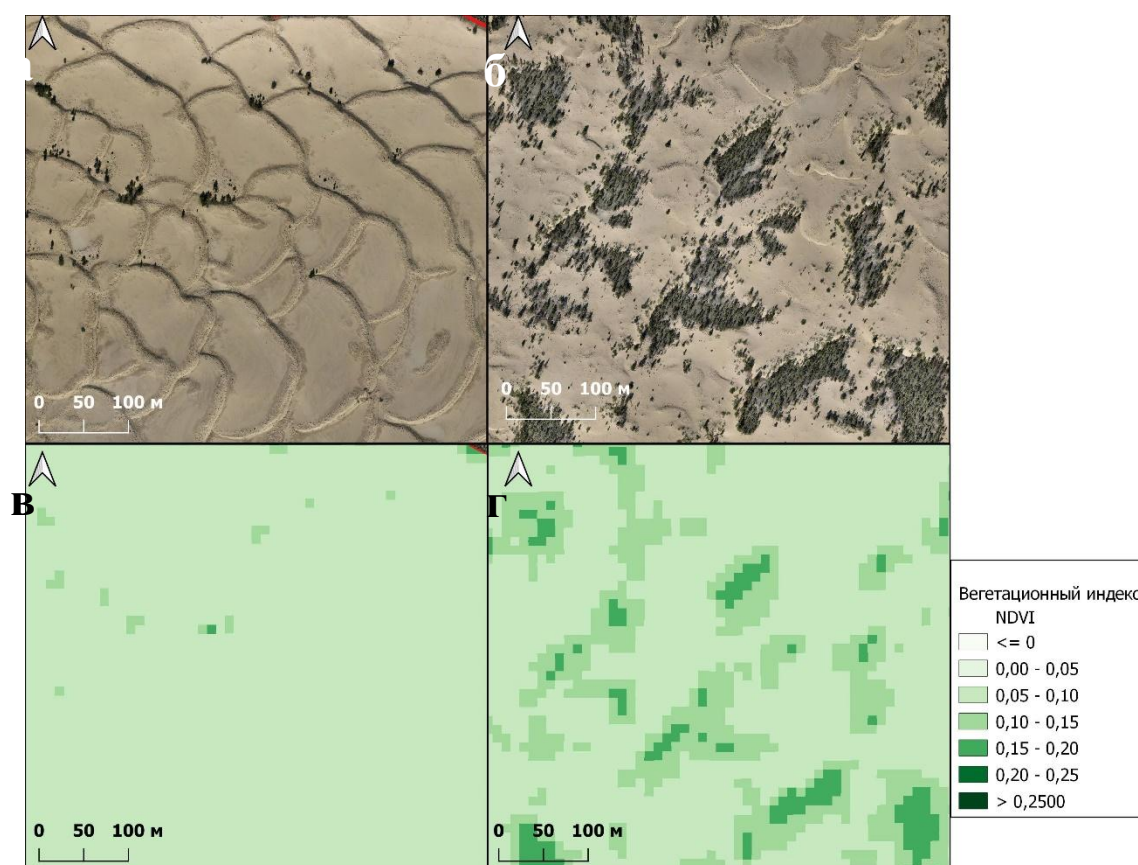


Рис. 4. Сравнение незакрепленного и частично закрепленного растительностью участков: а — незакрепленная часть тукулана; б — частично закрепленная часть тукулана; в, г — растры NDVI, соответственно, для а и б.

На рис. 4а представлен активный участок в северной части тукулана рядом с границей леса (рис. 5). Данный участок представлен активными параболическими дюнами с единичными деревьями и сильно разреженной растительностью. Вегетационный индекс

для участка выше порогового значения только для единичных пикселей, куда попали группы деревьев. На рис. 4б, напротив, рисунок дюн читается хуже, «острова» леса и подлеска закрепляют поверхность дюн. На синтетическом растре (рис. 4г) значительны площади со значением NDVI более 0,1.

Остановка движения дюн зависит от закрепления поверхности растительностью. Для определения времени остановки движения достаточно данных дистанционного зондирования и расчета индекса NDVI по закрепленной растительности.



Рис. 5. Граница леса и активной части дюнного массива.

По результатам сравнения материалов съемки и космических снимков выявлена возможность оценки движения тукулана по данным космических снимков для участков с известной растительностью для оценки дальнейшей динамики. Однако, распознавание разреженных мелких кустарников и травянистой растительности остается трудновыполнимой задачей для космоснимков с пространственным разрешением даже более 0,1 м.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке научно-исследовательского проекта № 122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене».

ЛИТЕРАТУРА

Галанин А.А. Позднечетвертичные песчаные покровы Центральной Якутии (Восточная Сибирь): строение, фациальный состав и палеоэкологическое значение // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 1. С. 3-34, doi: 10.15372/KZ20210101.

Галанин А.А., Павлова М.Р., Климова И.В. Позднечетвертичные дюнные образования (дьолкуминская свита) в Центральной Якутии (Часть 1) // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 6. С. 3–15. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-6(3-15)

Галанин А.А., Павлова М.Р. Позднечетвертичные дюнные образования (дьолкуминская свита) в Центральной Якутии (Часть 2) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 3–16. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(3-16)

Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа. 2016. №. 11. С. 44-55.

Куть А.А., Чжан Т.Р., Гуринова С.А. Пространственный анализ распространения дюнных комплексов (тукуланов) в Центральной Якутии // Разведка и охрана недр. 2015. №. 11. С. 13-17.

Павлова М.Р., Галанин А.А., Павлов Б.А. Геоморфологические особенности тукуланов долины нижнего течения реки Вилюй (Центральная Якутия) // Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике («VII Шукинские чтения»). Москва, 18-21 мая 2015 г. МАКС Пресс. Москва. 2015. С. 482-484.

Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Хайруллин Р.Р., Башиев Н.Е. Современное состояние источников подземных вод песчаного массива Махатта, Восточная Сибирь // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII. № 4. С. 24–36. doi: 10.15372/KZ20230403

Поморцев О.А., Попов В.Ф. Водный фундамент плейстоцена Центральной и Северной Якутии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. 2017. С. 371-377.

Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., Richardson, W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1969, p. 97-131.

Zheng Z., Du S., Du S., Zhang X. A multiscale approach to delineate dune-field landscape patches // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 237, 111591. doi: 10.1016/j.rse.2019.111591

ASSESSMENT OF THE MOVEMENT OF THE KYSYL-SYR TUKULAN USING REMOTE SENSING DATA

Sivtsev D.E.^{1,2}, Lytkin V.M.¹, Shaposhnikov G.I.¹, Shchipanova E.A.¹

¹Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper provides results of calculation of NDVI index for estimation of consolidation of the Kysyl-Syr dune area based on data from UAV field survey in 2024 and use of Sentinel-2 space images. Comparison of high-altitude orthophotophines and DEM allows to assess the dynamics of movement of dune masses and estimate the area of fixed plots on vegetation. Using remote sensing data, it was found that vegetation-bound areas of tukulans can be identified, which indicate a marked decrease in the speed of dune movement.

Keywords: tukulan, dune massifs, Vilyuy, NDVI, Sentinel-2, UAV

REFERENCES:

Galanin A.A. Late Quaternary sand covers of Central Yakutia (Eastern Siberia): structure, facies composition and paleoenvironmental significance // Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 1, pp. 3–33, 10.15372/KZ20210101

Galanin A.A., Pavlova M.R., Klimova I.V. Late Quaternary dune formations (D'olkuminskaya series) in Central Yakutia (Part 1) // Earth's Cryosphere. 2018. Vol. XXII. No 6. P. 3-15. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-6(3-15)

Galanin A.A., Pavlova M.R. Late Quaternary dune formations (D'olkuminskaya Series) in Central Yakutia (Part 2) // Earth's Cryosphere. 2019. Vol. XXIII. No. 1. P. 3-16. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(3-16)

Galanin A.A., Pavlova M.R., Shaposhnikov G.I., Lytkin V.M. Tukulans: the sandy deserts of Yakutia. // Priroda. 2016. №. 11. P. 44-55.

Kut A.A., Chzhan T.R., Gurinova S.A. Spatial analyze of dune (Tukulan) distribution in central Yakutia // Razvedka i okhrana neдр, 2015, No. 11, pp. 13-17.

Pavlova M.R., Galanin A.A., Pavlov V.B. Geomorphological features of tukulans of the lower Vilyuy River valley (Central Yakutia) // Geomorphological resources and geomorphological security: from theory to practice ("VII Shchukin readings"). Moscow, May 18-21, 2015, 482-484, 2015, MAKS Press (Moscow).

Palamarchuk V.A., Lebedeva L.S., Pavlova N.A., Khairullin R.R., Baishev N.E. Current status of groundwater sources in the Makhatta sand massif, Eastern Siberia // *Earth's Cryosphere*, 2023, XXVII (4), pp. 24–36. DOI: 10.15372/KZ20230403.

Pomortsev O.A., Popov V.F. Pleistocene aquatic basement of the Pleistocene of Central and Northern Yakutia // *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Severo-Vostoka Rossii*, 2017. P. 371-377.

Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., Richardson, W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1969, p. 97-131.

Zheng Z., Du S., Du S., Zhang X. A multiscale approach to delineate dune-field landscape patches // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 237, 111591. doi: 10.1016/j.rse.2019.111591