

© 2017 г. Б.А. ПАВЛОВ<sup>1</sup>, Т.Н. ПЛАТОНОВА<sup>2</sup>, Н.Г. ПЛАТОНОВ<sup>3</sup>,  
Т.Б. ПАВЛОВА<sup>4</sup>, Р.Р. ГЕХТ<sup>5</sup>

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПЫЛЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ДЮН ТУКУЛАНА КЫЗЫЛ-СЫР В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

<sup>1</sup>Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО “Тайм Юнит”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>АО “НПО “Квант”, Великий Новгород, Россия

<sup>5</sup>ООО “ИНБАС”, Москва, Россия

e-mail: borispavlo@yandex.ru, tatyana.radyga@mail.ru, nikita.platonov@gmail.com,

tatyana-pavlova-2012@mail.ru, enbas.co@mail.ru

Результаты расчета сдувания минеральной пыли с активных поверхностей тукулана Кызыл-Сыр, а также расчетного моделирования и картографирования характера рассеивания минеральной пыли показали, что суммарные мощности пыли, поступающей с того или иного массива песчаных дюн в составе тукулана Кызыл-Сыр зависят от площадей открытых (без растительности) сухих поверхностей. Чем больше скорости ветра, тем в меньшем количестве возникает очаги пыления, тем выше концентрации минеральной пыли в приземном слое воздуха, тем дальше происходит раздув пыли, тем большая масса частиц пыли выпадает на дневную поверхность. При этом наибольшим рассеивающим потенциалом, как по протяженности полета частиц минеральной пыли, так и по площади их оседания обладают потоки приземного слоя воздуха южного и юго-восточного направлений. Оседание на земную поверхность фракций песка и пыли из облаков рассеивания происходит на различных расстояниях от эпицентров раздувов, в зависимости от крупности и удельной массы отдельных частиц, скорости и направления ветра, гидротермических показателей приземного слоя воздуха. Представляется необходимой заверка результатов математического моделирования эолового морфогенеза материалами натурных наблюдений.

**Ключевые слова:** эоловый массоперенос, расчетное моделирование, мерзлотные пустыни, Центральная Якутия.

### Введение

Принято считать, что площадь тукуланов (полей песчаных дюн) в Центральной Якутии увеличивается [1 и др.]. Но проведенный ранее анализ спутниковых изображений – от 23 августа 1999 г. (Landsat 7) и 8 августа 2014 г. (Landsat 8) – тукулана Кызыл-Сыр и его окружающих ландшафтов позволил предположить, что суммарная площадь его песков существенно сокращается в результате зарастания, которому благоприятствуют современное потепление климата и повышение увлажнения [2]. В заключительной части этого картографического исследования была поставлена задача детальной проверки выявленного направления современной динамики ландшафтного комплекса и почвенного покрова песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр с помощью математического моделирования процесса эолового морфогенеза и его полевой инструментальной верификации.

Настоящее сообщение посвящено сравнительному анализу результатов расчета сдувания минеральной пыли с активных поверхностей тукулана Кызыл-Сыр, а также расчетного моделирования и наглядного картографического отображения характера рассеивания минеральной пыли за самый теплый месяц года – июль для трех преимущественных направлений движения приземного слоя воздуха.

### Объекты и условия исследований

Литогенным каркасом ландшафтного комплекса песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр служит останец реликтовой плейстоценовой мерзлотной пустыни, занимавшей в древности значительные площади Центральной и Северной Якутии [3]. Тукулан, как древний геологический объект, продолжает и в настоящее время существовать



Рис. 1. Ландшафтный комплекс песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр на картографической основе Google Earth в угловых координатах WGS84  
 1–63°57'39" с.ш., 123°9'51" в.д.; 2–63°57'39" с.ш., 123°24'3" в.д.; 3–63°52'17" с.ш., 123°24'3" в.д.; 4–63°52'17" с.ш., 123°9'51" в.д.

Таблица 1

**Морфометрические параметры скоплений дюнных песков тукулана Кызыл-Сыр по картографическим измерениям**

Номер массива	Превышение над уровнем террасы, м	Средняя длина, м	Средняя ширина, м	Общая фактическая площадь массива с учетом кривизны поверхности, $F_{\text{макс}}, \text{м}^2$	Общая площадь "влажных" котлов выдувания песка и горизонтальных поверхностей террасы, занятых основным лесом, $\text{м}^2$	Расчетная суммарная площадь пылящих поверхностей в плане, $F_{\text{пл}}, \text{м}^2$
1	3	5721	3742	19073086	15270330	3802756
2	1.5	611	606	353157	131783	221374
3	2	2542	1614	3262751	1359495	1883784
4	1	725	573	313597	124584	189013
5	0.5	987	343	257564	0	257564
6	1	1196	857	798042	238797	559245
7	0.5	863	284	196596	0	196596
Всего:				24254793	17124989	7110332

в виде "пульсирующего" комплекса, состоящего из основного массива (№ 1) и нескольких более мелких скоплений дюнных песков (№№ 2–7) на высокой правобережной террасе р. Вилюй (рис. 1).

Основные морфометрические параметры компонентов объекта исследований свидетельствуют о существенной его неоднородности (табл. 1). Максимальной высотой характеризуется основной песчаный массив № 1. Его суммарная площадь составляет

**Средние значения коэффициента, учитывающего совокупный профиль пылящих поверхностей песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр**

Номер массива	Общая площадь массива, $F_{\text{макс}}, \text{м}^2$	Расчетная суммарная площадь пылящих поверхностей в плане, $F_{\text{пл}}, \text{м}^2$	$K_6$
1	19073086	3802756	5.02
2	353157	221374	1.60
3	3262751	1883784	1.73
4	313597	189013	1.66
5	257564	257564	1.00
6	798042	559245	1.43
7	196596	196596	1.00
Всего	24254793	7110332	

Таблица 3

**Сравнительная характеристика валовых и удельных показателей сдувания минеральной пыли с пылящих поверхностей песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр**

Номер массива	Расчетная суммарная площадь пылящих поверхностей в плане, $F_{\text{пл}}, \text{м}^2$	Годовой выброс		Удельные выбросы
		т/год	%	г/м <sup>2</sup> год
1	3802756	1860.8	78.6	489
2	221374	34.5	1.5	156
3	1883784	318.3	13.5	169
4	189013	30.6	1.3	162
5	257564	25.1	1.1	98
6	559245	77.9	3.3	139
7	196596	19.2	0.8	98
Всего	7110332	2366.3	100.0	333

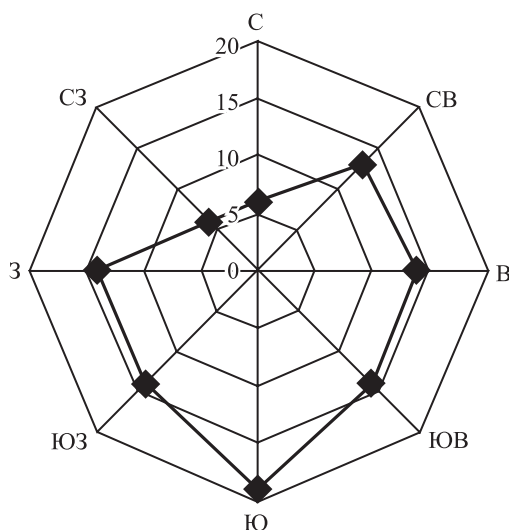


Рис. 2. Векторная диаграмма направлений ветра (роза ветров) в июле в районе исследований по данным метеостанции Вилуйск [9]

1907.3 га, из которой всего 29% приходятся на сухие пылящие поверхности. Песчаные поверхности тукулана представлены параболическими дюнами серповидной формы длиной 100–150 м, имеющими пологие (3–5°) наветренные склоны. Их внешние склоны крутые – около 45, средние превышения во внутренних частях дюн 5–6 м, а во внешних (северо-западной и юго-восточной частях) – 8–12 м.

До глубины 0.5–1.0 м тукулан сложен песком среднезернистым кварцево (75–87%)-полевошпатовым (5–20%) белесой окраски с небольшой примесью пылеватого материала (0.5–1.0%) и гравием, а также опадом древесных и травянистых растений. Влажность этого верхнего слоя колеблется в сухой период года

от 1 до 5%. Глубже влажность песка постепенно возрастает до 5–10%; в днищах котлов выдувания – до 10–20% [3].

Массив располагается в аридном районе криолитозоны. Нормативная глубина сезонного протаивания суглинистых почвогрунтов здесь составляет 0.5–2.0 м [4], что подтверждается данными многолетних наблюдений, проводимых на ближайшей метеостанции Вилуйск [5–9] (табл. 2, 3). Воздушные массы в этом районе зимой преимущественно устремляются с ЮЗ на СВ со среднемесячной скоростью 2.40 м/с (по ГМС Вилуйск) [5]. Летом среднемесячная скорость ветра возрастает до 3.34 м/с. Его направление сменяется в целом на противоположное движению зимних масс воздуха и осуществляется преимущественно с С на Ю и с СЗ на ЮВ (рис. 2).

### Методы исследований

Комплекс песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр, является генетически самостоятельным геологическим телом, формирующимся под влиянием сильных иссушающих ветров [10]. По своим морфометрическим параметрам, характеру сложения, физическим и физико-химическим свойствам слагающего материала объект исследования аналогичен таким техногенным образованиям, как склады пылящих материалов (песка), для которых при статическом хранении характерен выброс загрязняющих веществ (пыли) в атмосферу. В этой связи, для оценки и изучения процессов современного эолового морфогенеза данного ландшафтного комплекса используются общепринятые расчетные модели определения загрязнения приземного слоя воздуха, применяемые при экологическом обосновании хозяйственной деятельности и разработке мероприятий по охране окружающей среды [11–14].

Принимая допущение, что объем пылевыведения с песчаных поверхностей определяется только гидрометеорологическими показателями приземного слоя воздуха, годовой объем сдуваемой пыли с поверхности тукулана Кызыл-Сыр рассчитывается по следующей формуле, применяемой для складов и хвостохранилищ пылящих материалов [11]:

$$P_{\text{xp}} = 0.11 \times 8.64 \times 10^{-2} \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \times q \times F_{\text{пл}} \times (1-\eta) \times (T - T_d - T_c),$$

где  $P_{\text{xp}}$  – годовой объем сдуваемой пыли с совокупной поверхности комплекса песчаных дюн (валовой выброс пыли в процессе хранения материала), т/год;  $K_4$  – коэффициент закрытости объекта (склада). Поскольку песчаные дюны открыты со всех сторон, тогда  $K_4 = 1$  (см. табл. 3 [11]);  $K_5$  – коэффициент влажности слагающего материала объекта (склада). В нашем случае песок пылящих поверхностей имеет влажность до 3%, тогда  $K_5 = 0.8$  (см. табл. 4 [11]);  $K_6$  – коэффициент, учитывающий совокупный профиль поверхности объекта (складируемого материала), определяется, как отношение

$$K_6 = F_{\text{макс}}/F_{\text{пл}},$$

где  $F_{\text{пл}}$  – поверхность пыления в плане, м<sup>2</sup> (см. табл. 1 [11]);  $F_{\text{макс}}$  – фактическая площадь поверхности складируемого материала при максимальном заполнении склада, м<sup>2</sup> (см. табл. 1 [11]).

Тогда, исходя из данных морфометрических параметров объектов пыления (см. табл. 1 [11]), значения  $K_6$  составляют 1.00–5.00; осредненное – 3.41;  $q$  – максимальный удельный выброс (сдуваемость) пыли, г/(м<sup>2</sup>с), подчиняется степенному закону [15] и рассчитывается по формуле

$$q = av^b,$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с (в нашем случае берем осредненную скорость ветра) за январь и июль  $v = (2.40 + 3.31):2 = 2.855$  м/с;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа перегружаемого материала по таблице 8 [11] –  $a = 0.0087$  и  $b = 4.199$ . Тогда  $q = 0.000071221$  г/(м<sup>2</sup>с);  $K_7$  – коэффициент, учитывающий крупность пылящего материала. В нашем случае песок пылящих поверхностей имеет влажность 1%,

крупность менее 1 мм, тогда  $K_7 = 1.0$  (см. табл. 4 [11]);  $H$  – эффективность средств пылеулавливания, доли единицы. В нашем случае данный коэффициент не учитывается, поскольку в природе приемы пылеподавления не применяются;  $T$  – общее время экспонирования пылящей поверхности объекта (хранения материала) за рассматриваемый период, в сутках. Мы принимаем период, равный году, т.е. 365 суткам;  $T_d$  – число суток с дождем рассчитывается по формуле [12]

$$T_d = 2T_d (\text{час})/24,$$

где  $T_d$  (час) – суммарная продолжительность осадков в виде дождя за рассматриваемый период в часах, равная в нашем случае  $T_d = 28$  дней, согласно [8]. Тогда число дней с дождем составляет  $T_d = 2.333$ ;  $T_c$  – число суток со снежным покровом за рассматриваемый период. Мы за количество суток со снежным покровом принимаем суммарное число суток с морозом, которое составляет 182.5 суток, согласно [7].

*Расчетное моделирование* распространения в приземном слое воздуха сдуваемой пыли с поверхности комплекса песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр и его визуализация в виде карт пространственного рассеивания концентраций пыли выполнялись на персональном компьютере, оснащенный специально предназначенным для этой цели программным комплексом “Эколог”. Использована версия 3.0 [14], которая практически реализует математически сложную и трудоемкую методику определения концентраций загрязняющих веществ в выбросах предприятий (в нашем случае минеральной пыли от природного объекта) в любой расчетной точке окружающей среды [13].

При решении поставленных задач соблюдались следующие условия и ограничения, установленные правилами пользования методикой и программным комплексом, метеорологическими условиями района исследований, а также нашими экспертными заключениями, сделанными согласно физическим параметрам объекта исследований:

1. Расчеты рассеивания проводятся по пыли неорганической (код 2907 – содержание  $\text{SiO}_2$  более 70%) на июль, как самый теплый месяц года;
2. Фоновая концентрация загрязняющего вещества (пыли) в приземном слое воздуха в районе размещения объекта исследований принимается равной  $0 \text{ мг/м}^3$ ;
3. Семь пылящих поверхностей тукулана расцениваются как площадные неорганизованные источники выбросов минеральной пыли;
4. Для построения карт рассеивания и размещения на них расчетных точек концентраций минеральной пыли массивы песчаных дюн привязываются к локальной системе координат;
5. Расчетная площадка рассеивания концентраций минеральной пыли принимается размером  $26000 \times 30000 \text{ м}$  с шагом расчетной сетки  $250 \times 250 \text{ м}$ ;
6. Значение коэффициента температурной стратификации атмосферы, соответствующее неблагоприятным условиям, при которых концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе максимальны, равно 200 [13];
7. Поправочный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности на рассеивание загрязняющих веществ, равен 1 [13];
8. Средняя температура наружного воздуха в июле, согласно данным сайта [5] составляет  $+19.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
9. Концентрации минеральной пыли, сдуваемой с пылящих поверхностей тукулана определяются по максимальным удельным выбросам пыли. При этом учитывается среднемесячная повторяемость направлений ветра по восьми румбам и расчетным скоростям ветра на наиболее жаркий и сухой месяц года – июль.

Необходимые для программного расчета рассеивания концентраций минеральной пыли, сдуваемой с пылящих поверхностей тукулана, и графической его визуализации параметры среднемесячных повторяемостей направлений ветра и его скоростей по направлениям определялись специально. При этом было установлено, что в районе исследований в июле преобладают С, СВ и СЗ ветры; их скорости по данным направлениям составляют 2.22, 1.96 и 2.12 м/с соответственно [8].

Концентрации загрязняющих веществ рассчитываются принятой методикой и программным комплексом по удельным выбросам загрязняющих веществ от того или иного источника. В нашем случае для расчета удельных выбросов использовалась формула, применяемая в методике, используемой для складов и хвостохранилищ пылящих материалов при их статическом хранении. В формулу внесены изменения, поскольку дюны являются “фугитивными” (неконтролируемыми) источниками [11]:

$$M_{xp} = K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \times 0.11 \times q \times F_{пл} \times (1 - \eta), \text{ г/с,}$$

где  $M_{xp}$  – удельный выброс пыли при хранении пылящего материала (сдувании ее с поверхности комплекса песчаных дюн), г/с;  $K_4, K_5, K_6, F_{пл}, \eta$  – коэффициенты и показатели, определенные выше;  $Q$  – максимальная удельная сдуваемость пыли, г/(м<sup>2</sup>с), подчиняется стеленному закону [15] и рассчитывается по формуле

$$q = av^b \text{ мг/(м}^2\text{с),}$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с. В нашем случае берем максимальную скорость ветра с повторяемостью превышения 5%, рассчитанную по данным сайта [5], равную 4.0 м/с;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа перегружаемого материала по таблице 8 [11]  $a = 0.0087$  и  $b = 4.199$ . Тогда,  $q = 0.000293$  г/(м<sup>2</sup>с).

### Результаты исследований и их обсуждение

Проведенные расчеты позволяют оценить суммарные мощности пыления того или иного массива песчаных дюн в составе тукулана Кызыл-Сыр в зависимости от площадей открытых (без растительности) и сухих поверхностей, а также ареалы распространения пылевых выбросов (табл. 3).

Самым “пыльным” оказался массив № 1, из которого “вылетает” около 79% годового выброса минеральной пыли комплекса. Второе значимое место по валовому пылеобразованию занимает массив № 3. Он в 6 раз меньше массива № 1. Однако его пылящая поверхность составляет более половины от общей площади, а в массиве № 1 на долю таковой приходится всего 20%. Вклад в годовое пылеобразование других массивов не столь значителен и колеблется от 0.8 до 3.3%, достигая в сумме 8%.

Полученные данные свидетельствуют, вероятно, об интенсивном физическом расширении массива № 3, тогда как рост массива № 1, как установлено ранее, сокращается вследствие продолжающегося прогревания и увлажнения в теплый период года в районе исследований [5] и зарастания [2]. Кроме того, можно предположить

Таблица 4

**Сравнительная характеристика расчетных максимально-разовых концентраций минеральной пыли в июле при различных направлениях ветра над массивами песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр**

Номер массива	Расчетная суммарная площадь пылящих поверхностей в плане массивов, $F_{пл}$ , м <sup>2</sup>	Направление ветра			
		СЗ	ССЗ	С	СВ
		Скорость ветра, м/с			
		2.12	2.17	2.22	1.96
1	3802756	34.1	37.7	41.4	24.6
2	221374	0.6	0.7	0.8	0.5
3	1883784	5.9	6.5	7.1	4.2
4	189013	2.3	0.6	1.4	1.2
5	257564	0.5	0.5	0.6	0.3
6	559245	1.4	1.6	1.7	1.0
7	196596	0.4	0.4	0.4	0.3

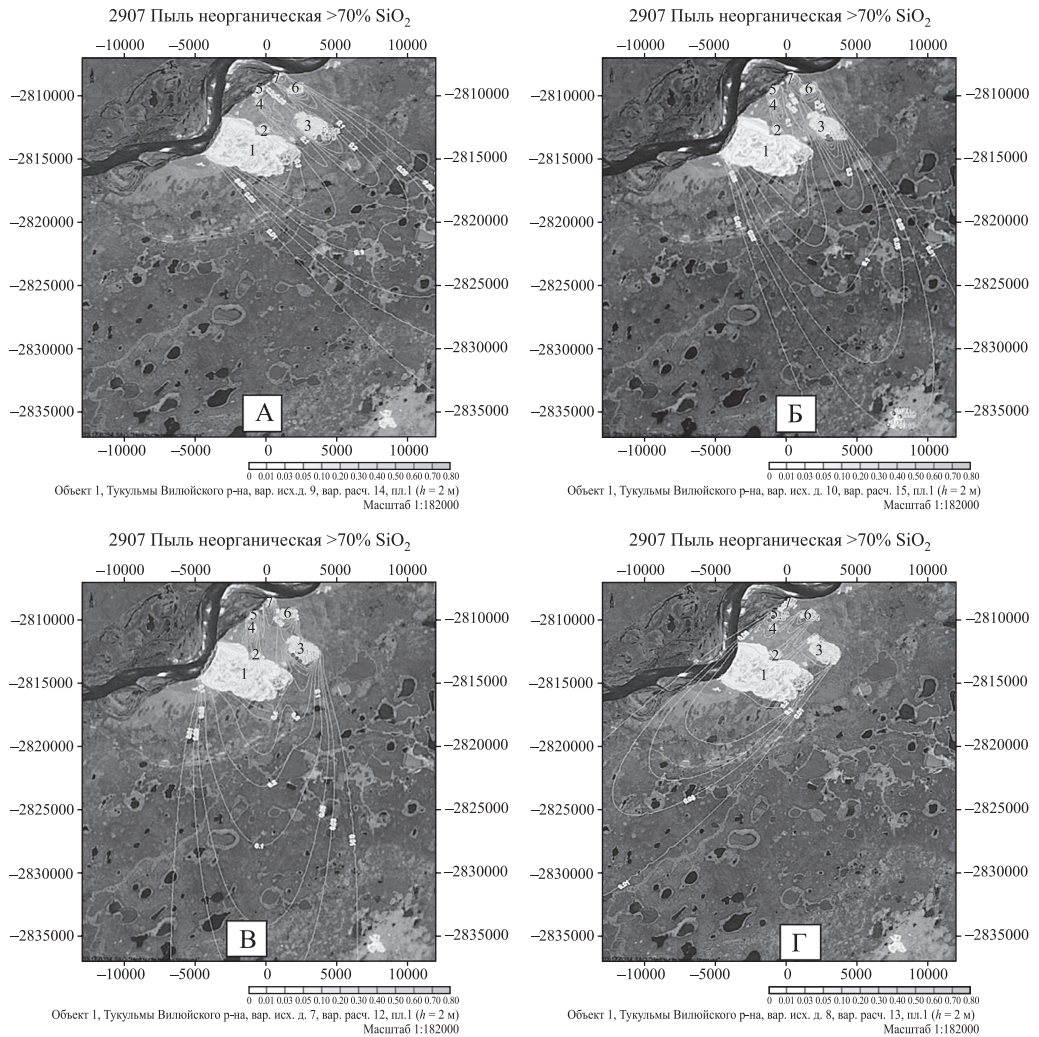


Рис. 3. Карты с изолиниями концентраций пыли неорганической (>70% SiO<sub>2</sub> – код 2907) в приземном слое воздуха над массивами песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр в самый теплый период года (июль) А – СЗ ветер 2.12 м/с; Б – ССЗ ветер 2.17 м/с; В – С ветер 2.22 м/с; Г – СВ ветер 1.96 м/с

также, что при современных гидротермических условиях, как и в прошлые более сухие и прохладные годы, активация пыления поверхностей тукуланов и приrost песчаных поверхностей происходит до неких оптимальных параметров, при достижении которых площадь открытых песков уже не увеличивается, а наоборот покрывается растительностью.

Оценка самого активного месяца года (июля), в части пылеобразования, показывает, что интенсивность последнего, влияющая на максимальные разовые концентрации минеральной пыли в приземном слое воздуха при наиболее вероятных направлениях и скоростях движения воздушных масс, прямо пропорциональна площадям пылящей поверхности (табл. 4, рис. 3).

Исключение составляют массивы 4 и 2, находящиеся в окружении остальных массивов песчаных дюн. Благодаря этому при любом из преобладающих направлений ветра над ними наблюдаются аномально высокие концентрации минеральной пыли.

## Расчетные показатели эолового массопереноса над массивами песчаных дюн тукулана Кызыл-Сыр в самый теплый период года (июль)

Показатели массопереноса	Значения показателей массопереноса							Всего
	<i>Массоперенос (сдувание) минеральной пыли в южном направлении (руб С)</i>							
Диапазон среднесуточных максимально-разовых концентраций пыли в облаке рассеивания, мг/м <sup>3</sup>	0,85–0,01	0,01–0,005	0,005–0,0025	0,0025–0,0015	0,0005–0,0015		0,0005–0,0015	
Средняя концентрация пыли в облаке рассеивания, принятая к расчету, мг/м <sup>3</sup>	0,027	0,008	0,004	0,002	0,001		0,001	
Максимальное расстояние по оси симметрии от границ изолиний максимально-разовых концентраций, м	9728	4614	6317	5456	7803		7803	33918
Площадь рассеивания по карте, км <sup>2</sup>	68	51	62	69	173		173	424
Объем облака при условной его средней мощности 10 м, км <sup>3</sup>	0,7	0,5	0,6	0,7	1,7		1,7	4,2
Удельное осаждение пыли на дневную поверхность, г/м <sup>2</sup>	18,46	3,84	2,34	1,38	1,73		1,73	
Масса пыли, оседающей на площадь рассеивания, т	1257	197	146	96	301		301	1995
	<i>Массоперенос (сдувание) минеральной пыли в юго-восточном направлении (рубб СЗ)</i>							
Диапазон среднесуточных максимально-разовых концентраций пыли в облаке рассеивания, мг/м <sup>3</sup>	0,038–0,01	0,01–0,005	0,005–0,0025	0,0025–0,0015	0,0005–0,0015		0,0005–0,0015	
Средняя концентрация пыли в облаке рассеивания, принятая к расчету, мг/м <sup>3</sup>	0,024	0,008	0,004	0,002	0,001		0,001	
Максимальное расстояние по оси симметрии от границ изолиний максимально-разовых концентраций, м	5416	3324	6283	4480	5403		5403	24906
Площадь рассеивания по карте, км <sup>2</sup>	33	57	60	62	111		111	323
Объем облака при условной его средней мощности 10 м, км <sup>3</sup>	0,3	0,6	0,6	0,6	1,1		1,1	3,2
Удельное осаждение пыли на дневную поверхность, г/м <sup>2</sup>	7,85	4,27	2,25	1,23	1,11		1,11	
Масса пыли, оседающей на площадь рассеивания, т	257	243	135	76	124		124	835
	<i>Массоперенос (сдувание) минеральной пыли в юго-западном направлении (рубб СВ)</i>							
Диапазон среднесуточных максимально-разовых концентраций пыли в облаке рассеивания, мг/м <sup>3</sup>	0,018–0,01	0,01–0,005	0,005–0,0025	0,0025–0,0015	0,0005–0,0015		0,0005–0,0015	
Средняя концентрация пыли в облаке рассеивания, принятая к расчету, мг/м <sup>3</sup>	0,014	0,008	0,004	0,002	0,001		0,001	
Максимальное расстояние по оси симметрии от границ изолиний максимально-разовых концентраций, м	3123	4623	4148	3816	6425		6425	22135
Площадь рассеивания по карте, км <sup>2</sup>	12	40	36	34	98		98	219
Объем облака при условной его средней мощности 10 м, км <sup>3</sup>	0,1	0,4	0,4	0,3	1,0		1,0	2,2
Удельное осаждение пыли на дневную поверхность, г/м <sup>2</sup>	1,69	3,03	1,34	0,67	0,98		0,98	
Масса пыли, оседающей на площадь рассеивания, т	20	122	48	23	95		95	309



Показатели рассеивания пыли, сдуваемой с активных поверхностей дюнного комплекса, дифференцированы в соответствии со скоростями воздушных потоков и их основными направлениями. Чем больше скорости ветра, тем в меньшем количестве возникает отдельных мелких очагов пыления, тем выше расчетные концентрации минеральной пыли в приземном слое воздуха, тем дальше происходит раздув пыли, тем большая масса частиц пыли выпадает на дневную поверхность. При этом наибольшим рассеивающим потенциалом, как по протяженности полета частиц минеральной пыли, так и по площади их оседания обладают потоки приземного слоя воздуха Ю и ЮВ направлений (табл. 5).

Представляется, что оседание на земную поверхность фракций песка и пыли из облаков рассеивания происходит на различных расстояниях от эпицентров раздувов, в зависимости от крупности и удельной массы отдельных частиц аэрозоля, скорости и направления ветра, гидротермических показателей приземного слоя воздуха. Это означает, что непосредственно на поверхности песчаных массивов из облаков рассеивания оседают преимущественно более тяжелые и крупные минеральные фракции (тонкий песок и крупная пыль). Более тонкие фракции начинают активно оседать из облаков рассеивания на земную поверхность сразу по достижении ими границ лесной растительности под влиянием резкого снижения скоростей ветра (увеличение шероховатости поверхности за счет лесных пород), снижения температуры и атмосферного давления, а также увеличения влажности воздушного потока (транспирация воды растительностью). При этом на поверхность лесного покрова оседают преимущественно средняя и тонкая пыль, и, частично – илестые фракции и коллоиды.

### Заключение

Проведенные исследования дают представление о количественных параметрах и направлениях эолового массопереноса в районе тукулана Кызыл-Сыр. Они также позволяют предположить, что при этом происходит пространственная сепарация частиц минеральной пыли по размерам и минералогическому составу, поскольку эти частицы имеют различную “летучесть” и, что в песках, слагающих объект исследований, в виде примеси присутствуют более тонкие фракции: от крупной пыли до коллоидов.

Полученные нами количественные и качественные показатели эолового массопереноса и пространственной сепарации осадков минеральных частиц следует подтвердить или опровергнуть сопряженными мониторинговыми наблюдениями в летние периоды за погодными условиями, измерениями концентраций частиц минеральной пыли в приземном слое воздуха тукулана Кызыл-Сыр и в окружающих его ландшафтах, а также результатами минералогического анализа проб минеральной пыли, отобранных из приземного слоя воздуха и из ее поверхностных скоплений.

**Благодарность.** Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05129 р\_востока Плейстоценовые криопустыни (тукуланы) Центральной Якутии).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лукин В.В., Толстихин О.Н.* Тунгские тукуланы в бассейне реки Вилюй // Наука и техника в Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2005. № 1(8). С. 23–29.
2. *Савин И.Ю., Павлов Б.А.* Многолетние изменения поверхности тукулана Кызыл-Сыр, выявленные по космическим изображениям Landsat // Экология бассейна р. Вилюй: проблемы и перспективы исследований / Мат-лы науч.-практ. конф., посвященной 25-летию Вилюйской комплексной экологич. экспедиции. Якутск, 13–14 ноября 2014 г. Якутск: ИД СВФУ. 2015. С. 75–82.
3. *Куть (Урбан) А.А.* Эолово-мерзлотные образования (тукуланы) Центральной Якутии: строение, генезис, возраст, закономерности распространения: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2014. 22 с.

4. *Саввинов Д.Д.* Климатические условия почвообразования в Якутии // Почвы мерзлотной области / Тез. докл. Всесоюзной конф. по мерзлотным почвам 11–21 июля 1969 г. Якутск: Якутское кн. изд-во, ЯФ СО АН СССР, 1969. С. 77–80.
5. Архив погоды по метеостанции Вилюйск за базовый период 01.02.2005–1.02.2015 гг. [http://gr5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Вилюйске](http://gr5.ru/Архив_погоды_в_Вилюйске)
6. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.
7. Термограф: архивные данные температуры воздуха и количества осадков. Вилюйск. [http://thermograph.ru>cnp/st\\_24641.htm](http://thermograph.ru>cnp/st_24641.htm)
8. Данные климатического мониторинга. Вилюйск <http://seaks.meteoinfo.ru> и [http://thermograph.ru/mon/st\\_24641.htm](http://thermograph.ru/mon/st_24641.htm)
9. СНиП 2.0.01-82. Строительная климатология и геофизика.
10. *Васильев И.С., Самсонова В.В.* Климатические предпосылки образования современных приречных дюн на Средней Лене // География и природные ресурсы. 2000. № 1. С. 94–99.
11. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. Новороссийск: ЗАО “НИПИОТСТРОМ”, 2000. 45 с.
12. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (Дополненное и переработанное). СПб.: НИИ атмосферы, 2012. 166 с.
13. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 76 с.
14. Унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы УПРЗА “Эколог” (версия 3.00). СПб.: ООО “Интеграл”, 2003.
15. *Бересневич П.В., Михайлов В.А., Филатов С.С.* Аэрология карьеров. Справочник. М.: Недра, 1990. 280 с.

Поступила в редакцию 18.12.2015

## ASSESSMENT OF THE RATES OF DUST PRODUCTION BY SAND DUNES IN TUKULAN KYZYL-SYR, CENTRAL YAKUTIA

B.A. PAVLOV<sup>1</sup>, T.N. PLATONOVA<sup>2</sup>, N.G. PLATONOV<sup>3</sup>, T.B. PAVLOVA<sup>4</sup>, R.R. HECHT<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*LLC Time Unit, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*AO NPO Kvant, Veliky Novgorod, Russia*

<sup>5</sup>*OOO INBAS, Moscow, Russia*

### S u m m a r y

The article presents a comparative analysis and discussion of the results of the calculation of mineral dust blowing from the active surfaces of the Kyzyl-Syr tukulan. Numerical modeling and mapping of dust transportation patterns provided the conclusion that total amount of dust produced by different parts of the tukulan depend on the areas occupied by vegetation-devoid dry surfaces. Dust precipitation depends on wind velocities and wind direction. South- and southeastwards winds are most active in terms of transportation distance and area of dust precipitation. Results of mathematical modeling need verification by field observation data.

**Keywords:** aeolian sediment transport, numerical simulation, permafrost desert, Central Yakutia.

DOI:10.15356/0435-4281-2017-1-80-89