

В. К. Иванов, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: sey59@mail.ru

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭОЛОВОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПЕСКА И ПЫЛИ В ПУСТЫННЫХ РАЙОНАХ

Эоловые процессы транспортировки песка и пыли формируют структуру поверхности огромных территорий и загружают атмосферу взвешенными аэрозолями пыли, распространяющимися ветрами на огромные расстояния. Присутствие атмосферной пыли в окружающей среде планеты является одним из факторов, влияющих на температуру и климатические условия обширных регионов Земли. В литературе отсутствуют данные об особенностях рассеяния радиоволн, проявляющихся при радиолокационных исследованиях эоловых процессов транспортировки песка и пыли в пустынных районах, которые могут быть использованы для определения параметров такой транспортировки. В статье приведены результаты анализа данных многолетних исследований пустынных районов космическими радиолокационными системами – радиолокаторами бокового обзора (РБО) искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Космос-1500» и «Сич-1», радиолокаторами с синтезированием апертуры (РСА) SAR ERS-1, ERS-2 и Envisat-1. Целью анализа было выявление тех особенностей рассеяния радиоволн, проявляющихся при радиолокационных исследованиях эоловых процессов транспортировки песка и пыли в пустынных районах, которые могут быть использованы для дистанционного определения параметров такой транспортировки. Выявлен эффект аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн, проявляющийся (в диапазоне локальных углов облучения поверхности $\Theta \approx 31^\circ\text{--}34^\circ$) на участках, покрытых глубоким песком, при направлении облучения поверхности радиоволнами навстречу генеральному направлению приповерхностного ветра. Предложено объяснение механизма этого эффекта за счет взаимодействия падающих радиоволн с согласованно ориентированными ионизированными слоями воздуха, окаймляющими структуры песчаной ряби в процессе формирования ее при эоловом переносе песчано-пылевой смеси. Ионизация вызывается сильным неоднородным электрическим полем, возникающим при сальтации песчинок под воздействием ветра. Результаты исследования позволяют создать новые методы дистанционного мониторинга процессов в пустынных районах, влияющих на климат обширных регионов Земли. Ил. 9. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: радиолокационное наблюдение, узконаправленное обратное рассеяние радиоволн, эоловый перенос песка и пыли, песчаная рябь, ионизация, электрическое поле.

«Эоловые процессы транспортировки песка и пыли – мощная эрозионная сила, которая формирует дюны, песчаную рябь и загружает атмосферу взвешенными аэрозолями пыли, распространяющимися ветрами на огромные расстояния» [1]. Они формируются в различных районах, в том числе в прибрежной зоне, холодных и жарких пустынях, а также в сельскохозяйственных областях. Общими характеристиками этих районов являются разреженный или отсутствующий растительный покров, наличие мелкодисперсных осадочных пород (глина, ил и песок) и сильных ветров. По некоторым оценкам [2], ветрами на Земле ежегодно транспортируется более $5 \cdot 10^8$ т пыли. Присутствие атмосферной пыли в окружающей среде планеты является одним из факторов, влияющих на температуру и климатические условия обширных регионов. В связи с глобальным характером эолийских процессов их эффективный мониторинг может быть реализован при помощи космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Одной из областей, где регулярно (особенно в осенне-зимний период, когда с северо-востока практически постоянно дует приповерхностный ветер) развиваются крупномасштабные эоловые процессы, являются покрытые песчаными дюнами западные участки пустыни Сахара (Эль-Джуф, Акшар и Трарза), расположенные в Мавритании. На многих радиолокационных изо-

бражениях этой области было обнаружено аномально узконаправленное увеличение обратного рассеяния от песчаной поверхности, которое не могло быть объяснено в рамках традиционных представлений о механизме такого рассеяния. В настоящей статье рассматриваются обнаруженные специфические проявления эффектов аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн от покрытых песком участков пустынь и предлагается объяснение механизма их возникновения из-за эоловых процессов.

1. Анализ многолетних радиолокационных наблюдений эффектов аномально узконаправленного рассеяния радиоволн в пустынях при транспортировке песка и пыли ветром. Впервые эффекты аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн были обнаружены еще на космических радиолокационных изображениях участка пустыни Эль-Джуф (Мавритания) в районе структуры Гуэль-Эр-Ришат (обозначена на рис. 1 и 2), полученных радиолокатором бокового обзора (РБО) искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Космос-1500» в декабре 1983 г. На рис. 1, а представлено первое из таких изображений, полученное 16.12.1983 г. Зона появления аномально узконаправленного обратного рассеяния отмечена вертикальной стрелкой. Центральный участок зоны в виде увеличенного трехмерного изображения помещен в область снимка, ограниченную белым прямоугольником.

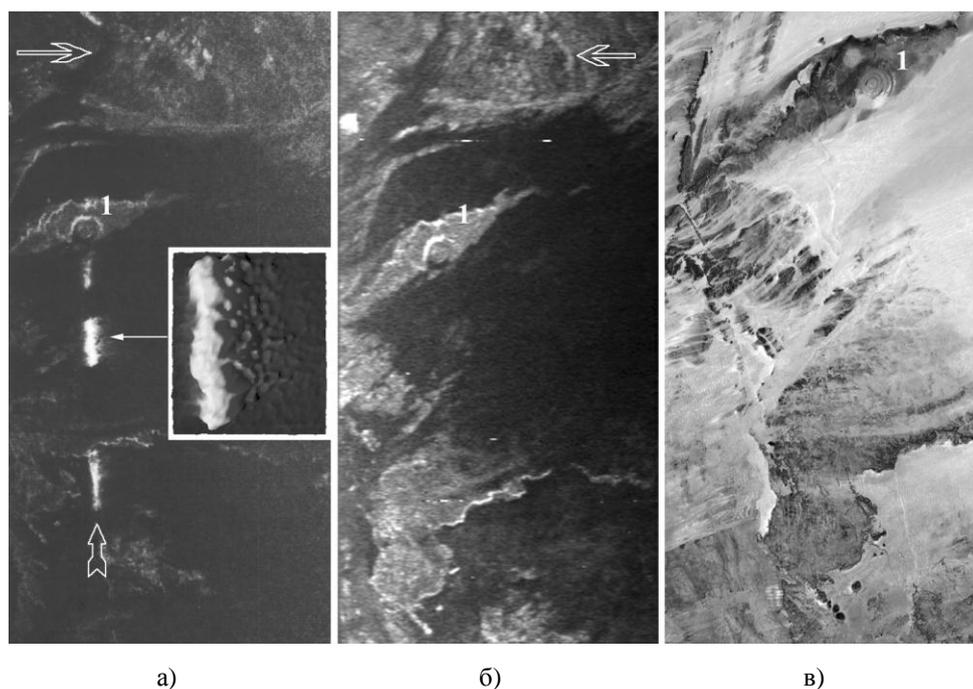


Рис. 1. Изображения участка пустыни Эль-Джуф в районе структуры Гуэль-Эр-Ришат (1), полученные РБО ИСЗ «Космос-1500» 16.12.1983 г. (направление облучения поверхности – с запада на восток) (а); РБО ИСЗ «Сич-1» 29.01.1996 г. (направление облучения поверхности – с востока на запад) (б); в) – оптическое изображение этого же участка (*Google Earth*)

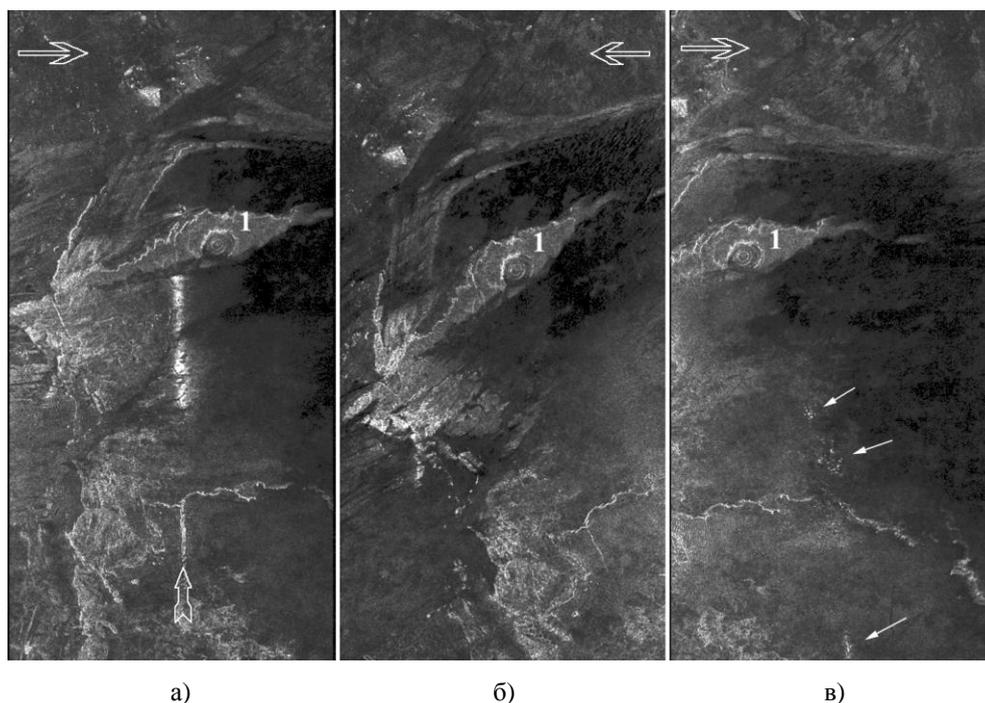


Рис. 2. Изображения участка пустыни Эль-Джуф полученные: а) – *ASAR Envisat* (© *ESA*) 22.12.2010 г. (*ASA_GMI_IP*, запад-восток); б) – 21.12.2010 г. (*ASA_GMI_IP*, восток-запад); в) – 14.12.2010 г. (*ASA_GMI_IP*, запад-восток)

Интенсивность отраженного сигнала (определенная согласно [3]) в зоне оказалась значительной – $\sigma^{\circ} \geq -10$ дБ на рабочей длине волны РБО $\lambda = 3,15$ см. Анализ многочисленных радио-

локационных изображений области пустынь Эль-Джуф, Акшар и Трарза в Мавритании, полученных с помощью РБО ИСЗ «Космос-1500» и «Сич-1», радиолокаторами с синтезированием

апертуры (PCA) ERS-1, ERS-2 и Envisat-1 за период 1983–2011 гг., позволил отметить ряд особенностей проявления этого явления:

– Проявление узконаправленного обратного рассеяния радиоволн в исследуемой области наблюдалось только на изображениях обзорных (с полосой обзора ≥ 400 км и разрешением ~ 1000 м) радиолокационных систем космического ДЗЗ – РБО ИСЗ «Космос-1500» и «Сич-1», а также ASAR Envisat-1 (режимы работы ASAR – *Global Monitoring Mode GM*, *Wide Swath Mode WSM*). Они никогда не наблюдались на многочисленных изображениях SAR ERS-1 и ERS-2 этого региона. По-видимому, это объясняется тем, что диапазон локальных углов облучения поверхности (с учетом ее кривизны), в котором проявляется этот эффект (определенный по снимкам), составляет для РБО ИСЗ «Космос-1500» и «Сич-1» $\Theta \approx 31,5 \div 33^\circ$, а для SAR Envisat-1 $\Theta \approx 32 \div 34^\circ$. Полоса обзора SAR ERS-1 и ERS-2 ($\Theta \approx 23 \pm 3^\circ$) не позволяет наблюдать поверхность в таком диапазоне углов облучения.

– Проявление anomalно узконаправленного обратного рассеяния радиоволн регулярно наблюдается (в исследуемой области в зимний период, когда господствуют ветры с северо-востока и совершенно отсутствуют осадки) только на участках, покрытых глубоким песком, и при направлении облучения поверхности – с запада на восток, и никогда не наблюдается при облучении с востока на запад. Так, на изображении рис. 1, а облучение поверхности направлено с запада на восток (указано стрелкой в верхней части снимка). При этом наблюдается зона узконаправленного обратного рассеяния (отмечено вертикальной стрелкой). На рис. 1, б, где направление облучения с востока на запад, такое проявление отсутствует. Оптическое изображение этого же участка (рис. 1, в) подтверждает наличие песка в зонах формирования узконаправленного обратного рассеяния. Приведенное на рис. 1, а в прямоугольнике трехмерное изображение центрального участка зоны проявления эффекта указывает на то, что узконаправленное рассеяние формируется множеством отражателей.

– Интенсивность anomalно узконаправленного обратного рассеяния также зависит от скорости приповерхностного ветра. В качестве примера на рис. 2 показаны изображения того же участка пустыни Эль-Джуф, полученные как при направлении облучения поверхности – с запада на восток (см. рис. 2, а, в), так и при направлении с востока на запад (см. рис. 2, б). При этом проявление эффекта узконаправленного обратного рассеяния (отмечено вертикальной стрелкой) хорошо

наблюдается только на рис. 2, а. На рис. 2, б, в наблюдаются лишь локальные участки anomalного рассеяния (отмечены узкими стрелками). Отсутствие интенсивного обратного рассеяния на изображении рис. 2, в может быть объяснено низкой скоростью приповерхностного ветра – не более 0,5 м/с [4], в то время как остальные изображения были получены при скоростях приповерхностного ветра с северо-востока в диапазоне 2–7 м/с.

– Связь проявлений узконаправленного рассеяния с поверхностью, покрытой песчаными дюнами, хорошо иллюстрируют изображения участка пустыни Акшар (Мавритания) западнее структуры Гуэль-Эр-Ришат, представленные на рис. 3, 4. На радиолокационных изображениях, полученных при направлении облучения поверхности с запада на восток отчетливо видны проявления узконаправленного рассеяния радиоволн на участках, покрытых песчаными дюнами (рис. 3, а, б). В то же время на участках каменистой пустыни, не покрытых песком, этот эффект полностью отсутствует, например, в районе, обозначенном 1 на рис. 4, в, где наблюдается каменистая поверхность. При этом на участке 2 (рис. 4, г), на котором песчаная поверхность сплошь покрыта дюнами, интенсивность узконаправленного рассеяния максимальна, а на участке 3 (рис. 4, д), покрытом лишь полосами песка (ориентированными поперек генерального направления ветра), интенсивность рассеяния меньше.

Явная зависимость этого эффекта от покрытия поверхности пустыни песком (являющимся, по сути, мелкодроблеными осколками диэлектрика – кварца [5]), который сам по себе не может интенсивно рассеивать радиоволны, вызывает необходимость рассмотреть процессы, происходящие на поверхности песка при воздействии на нее ветра.

2. Механизм возникновения anomalно узконаправленного обратного рассеяния радиоволн при эоловой транспортировке песка и пыли. Механизм перемещения песка и формирование его поверхности под воздействием ветра детально рассмотрен в работах [6–9] и многих др. Установлено, что при достижении скорости приповерхностного ветра 1–2 м/с песчинки начинают перемещаться по поверхности. Песок состоит из частиц самых разных размеров, обычно от 10^1 до 10^3 мкм и более. Первыми начинают двигаться самые мелкие частицы: сначала короткими перекатываниями и переползаниями по поверхности, небольшими подлетами вверх. При возрастании скорости ветра мелкие частицы уже начинают взлетать в воздух, а крупные все еще переползают по поверхности.

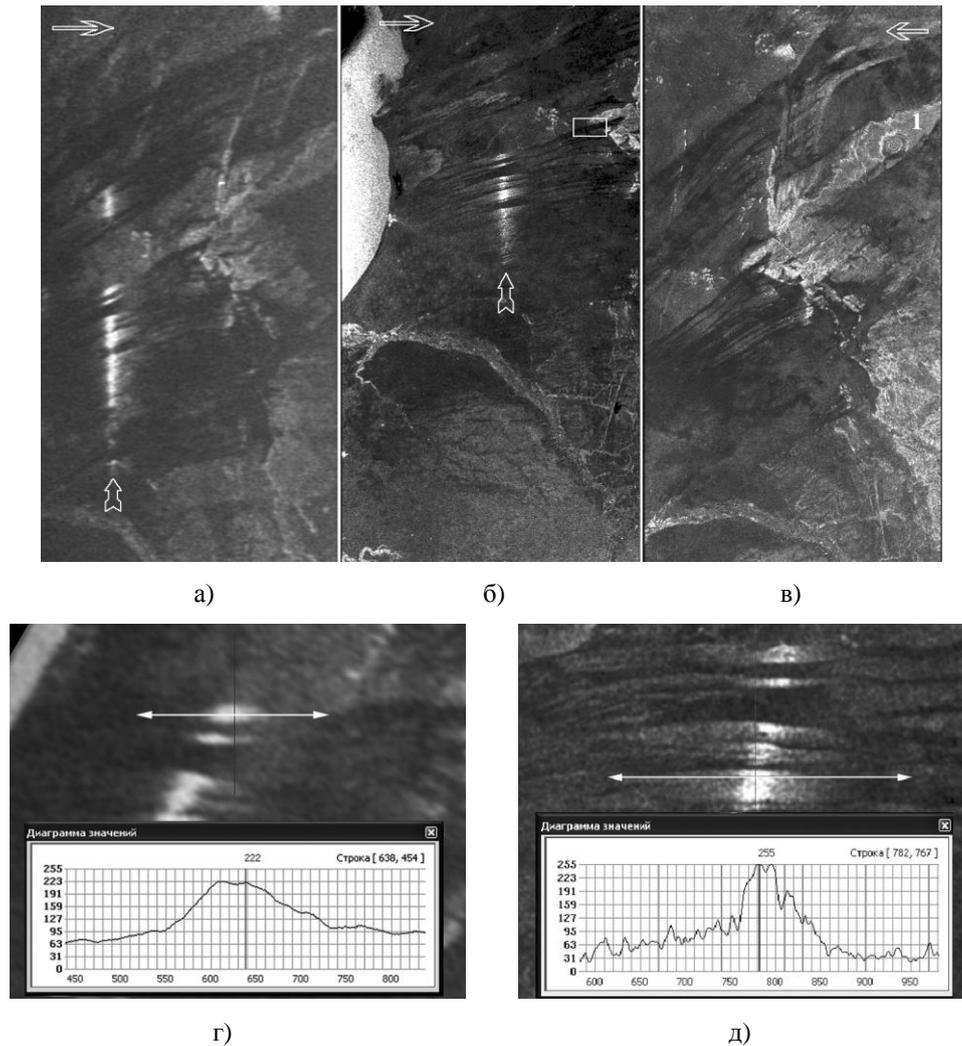


Рис. 3. Изображения участка пустыни Акшар, полученные: а) – РБО ИСЗ «Сич-1» 19.12.1995 г. (запад-восток); б) – ASAR Envisat-1 (© ESA) 08.12.2010 г. (ASA_GM1_1P, запад-восток); в) – ASAR Envisat-1 07.12.2004 г. (ASA_GM1_1P, восток-запад), г, д) – изменение интенсивности отраженного радиолокационного сигнала по сечению вдоль генерального направления приземного ветра участка интенсивного рассеяния (рис. 3, а, б)

Когда мелкие песчинки находятся в воздухе, они движутся под действием двух сил – горизонтально направленной силы от ветра и вертикально направленной силы тяжести, пролетев некоторое расстояние, они снова падают на поверхность песка. В воздухе они испытывают турбулентные пульсации силы ветра, поэтому одни частицы летят быстрее, другие – медленнее. Поскольку воздушные вихри следуют друг за другом довольно регулярно, то и в потоке песчинок, несомых ветром, тоже устанавливается некая регулярность – чередование областей с высокой и низкой концентрацией частиц в воздухе. Такая периодичность сохраняется и в распределении концентрации песчинок в местах их падения на поверхность. Но так как упавшая частица (так называемый «сальтон» б на рис. 5 [1]) сохраняет запас набранной от ветра кинетической энергии и передает ее тем частицам, с которыми

она столкнулась, упав на поверхность, то она подбрасывает в воздух другую частицу, та, упав, бьет в свою очередь третью и т. д. Процессы формирования песчаной ряби при песчаной поземке путем «сальтации» (скачкообразного перемещения) представлены на рис. 5, где 1 – песчаная подложка; 2 – «зародыши» волнообразного рельефа; 3 – горб песчаной ряби; 4 – направление перемещения наиболее крупных песчинок к вершине песчаной волны; 5 – присоединенный вихрь в зоне «тени» песчаной волны; 6 – падающая песчинка «сальтон»; 7 и 8 – вторичные и третичные менее энергичные песчинки «рептоны»; 9 – вторичная песчинка «сальтон» подхваченная ветровым потоком; 10 – генеральное направление приповерхностного ветра; 11 – направление радиолокационного облучения, при котором ярко проявляется узко-направленное обратное рассеяние радиоволн.

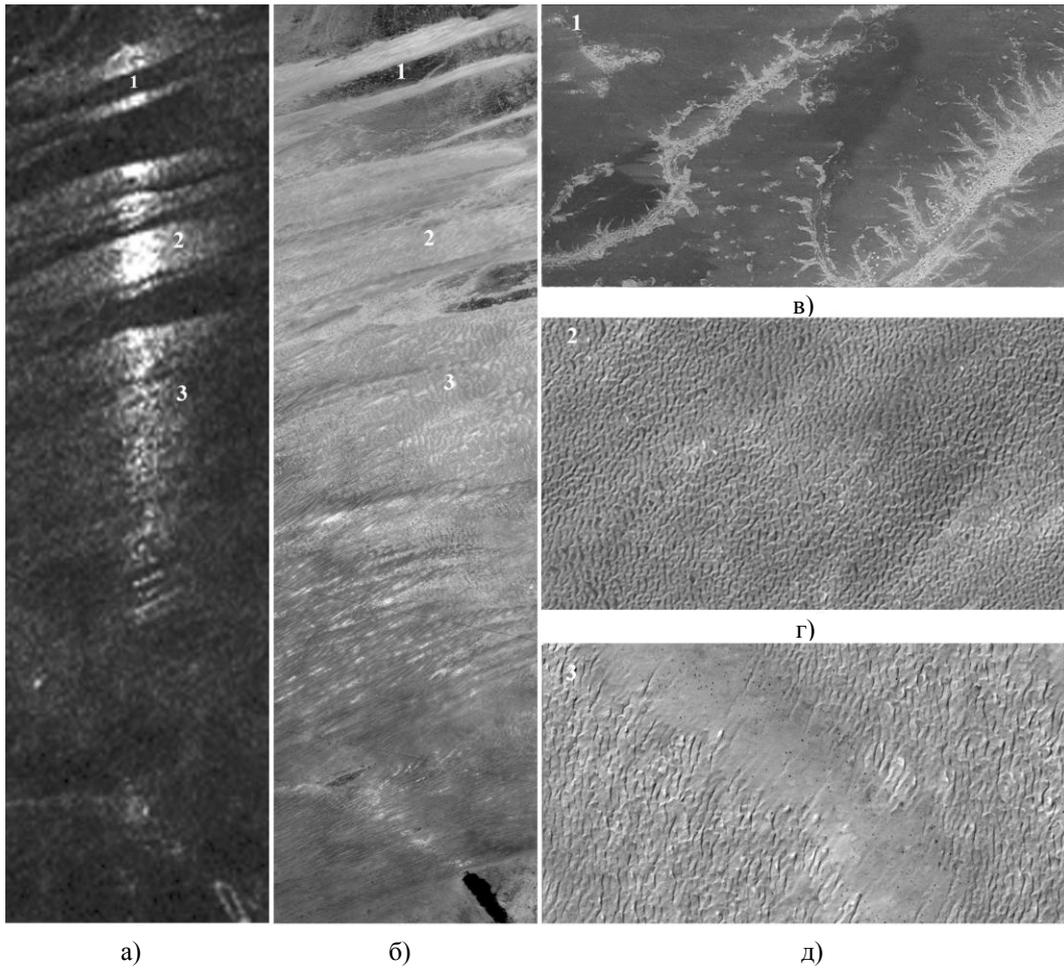


Рис. 4. Увеличенные изображения центральной части снимка SAR Envisat-1 (© ESA) 08.12.2010 г., на котором наблюдается проявление эффекта узконаправленного обратного рассеяния (а); оптического снимка этого же участка пустыни (б); в, г, д) – увеличенные оптические снимки трех видов характерных поверхностных образований в этой области пустыни Акшар

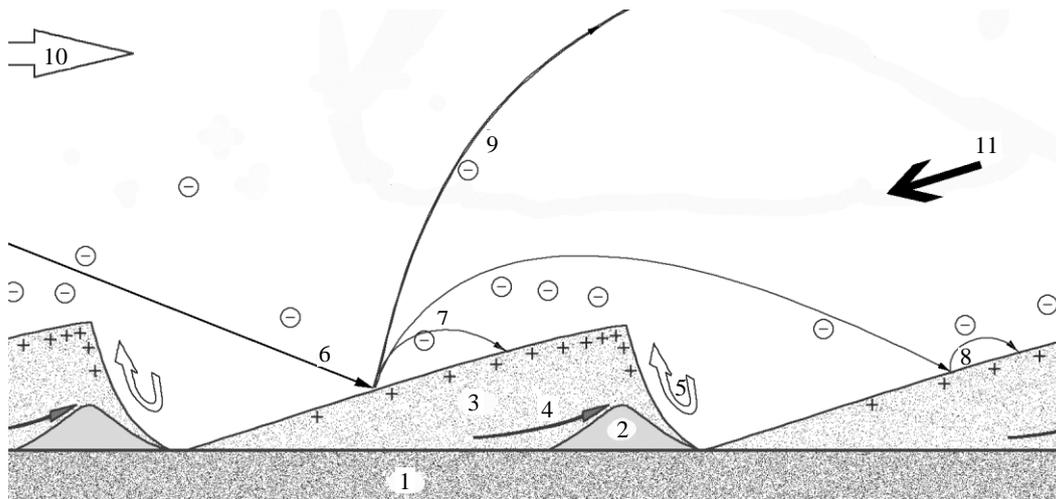


Рис. 5. Процессы формирования песчаной ряби при песчаной поземке путем «сальтации» (скачкообразного перемещения)

Постепенно накапливаясь в местах наибольшей концентрации упавших частиц, песчинки создают «низкие барьеры» (2 на рис. 5). Около них начинают сосредотачиваться переползающие

по поверхности крупные песчинки (4 на рис. 5). Регулярность вихрей в воздушном потоке у поверхности песка превращается в периодичность песчаных валиков.

После образования «зародышей» волнообразного рельефа начинается их рост в высоту. Это происходит потому, что выбитые с поверхности «вторичные», «третичные» и т. д. (так называемые «рептоны» 7, 8 на рис. 5 [1]) мелкие песчинки планируют в воздухе в среднем на такие расстояния, которые примерно совпадают с длиной возникающих волн песчаной ряби. Когда рябь вырастает до заметных размеров, она сама начинает вносить турбулентность в поток пронесшегося над ней воздуха. На подветренной стороне гребней ряби, в зоне «тени», образуется присоединенный вихрь – круговое движение воздуха, которое у поверхности песка направлено против течения воздуха (5 на рис. 5). Оно подгоняет песок из ложбины к гребню, делая его четче оформленным, а главное – подпертым, устойчивым. Так горб песчаной волны приобретает характерную несимметричную форму зуба пилы (3 на рис. 5). Полосы ряби тянутся строго перпендикулярно направлению ветра, который создал их, и обычно имеют длинные фронты, почти смыкающиеся друг с другом (рис. 6, б). Это означает, что строение фронта в приземном потоке ветра довольно однородное, отдельные струи воздуха по фронту ветра почти не опережают друг друга. Сама поверхность песка как бы упорядочивает ветер. Рост песчаной ряби в высоту идет, когда дует ветер со скоростью 4÷9 м/с, а на такой ветер приходится 85–90 % всего времени [6].

Очень важную роль в эоловых процессах перемещения песка и пыли играют электрические поля, возникающие при перемещении и соударении песчинок [8–10]. Ученые до сих пор не пришли к единому заключению о физическом механизме, отвечающем за появление разнополярных зарядов на песчинках при их соударениях и трении [7]. Экспериментально установлено, что в результате этих соударений и трения при перекачивании и переползании по поверхности мелкие частицы «предпочитают» получать отрицательный заряд, а ветер переносит их выше и порождает тем самым разницу потенциалов. Более тяжелые песчинки с положительными зарядами остаются на поверхности. На рис. 7 [2] представлены экспериментальные результаты измерения напряженности электрического поля на различной высоте над поверхностью при эоловой транспортировке песка и пыли. Хорошо видно, что напряженность поля изменяется очень сильно, достигая значений в 10÷250 кВ/м на высоте порядка 1,5÷2 см от поверхности. Эти сильные поля приводят к тому, что основная масса переносимого песка прижимается к поверхности. По модельным [8] и экспериментальным данным [10, 11] около 50 % массы песка переносится в слое 3÷4 см над поверхностью.

Высота волн ряби имеет порядок десятка сантиметров и более (при скоростях 4÷9 м/с). При

больших скоростях ветра (10÷15 м/с) начинают формироваться настоящие песчаные волны высотой 15÷30 см и длиной в единицы и десятки метров. При скоростях ветра более 16 м/с все песчаные волны и рябь разрушаются и развиваются песчаные бури [6] с подъемом пыли и песчинок на десятки и сотни метров.

Пространственное распределение напряженности электрического поля на определенной высоте существенно неоднородно [2, 13], что может быть объяснено как неоднородностью распределения заряда по поверхности каждой песчинки [13], вращением «сальтонов» в полете (~ 400 об./с [7]), так и пространственной неоднородностью распределения заряженных песчинок. Горбы песчаной ряби содержат максимальное количество положительно заряженных тяжелых песчинок, перемещенных по поверхности, а в воздухе над их поверхностью находится максимальное количество бомбардирующих их «сальтонов» и вторично выбитых отрицательно заряженных легких песчинок, что приводит к максимальной напряженности поля. В то же время расположенные в зонах «тени» впадины песчаной волны экранированы от бомбардировки легкими песчинками, и из них удаляется (вверх как по пологому склону песчаной волны, так и по крутому склону подветренной зоны) большее количество тяжелых песчинок. Это приводит к заключению, что максимумы и минимумы напряженности электрического поля должны совпадать в пространстве соответственно с вершинами и впадинами структуры песчаной ряби.

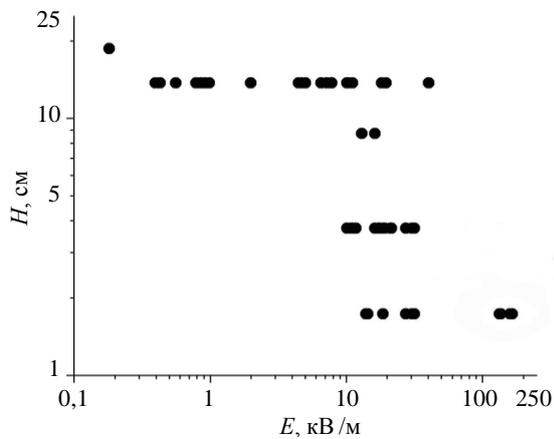
Экспериментально подтвердить это предположение, особенно в условиях сдвигающейся во времени пространственной структуры песчаной ряби, могли бы помочь синхронные измерения двумерной структуры напряженности поля на различной высоте над поверхностью при эоловой транспортировке песка и пыли с шагом в единицы сантиметров и малым интервалом усреднения [13].

В работах [14, 15] отмечено, что когда у поверхности Земли напряженность электрического поля превышает 500÷1 000 В/м, начинаются электрические разряды с острых предметов, сопровождаемые характерным шумом; при дальнейшем усилении поля разряд становится видимым, иногда довольно ярким, с переходом в коронную форму. Коронные разряды (являющиеся разновидностью тлеющего разряда) хорошо проявляются при перемешивании насыщенного пылью и песком приповерхностного воздуха пустыни, например, лопастями при взлете и посадке вертолетов [16] (рис. 8, б). Песчинки, являющиеся мелкодробленными осколками кварца, обладают острыми гранями (рис. 8, а), которые благоприятствуют формированию электрических разрядов (рис. 7, б и 8, б) в неоднородном поле.



а) б)

Рис. 6. Фото песчаной поэмки (направление ветра – навстречу наблюдателю) (а); структура песчаной ряби на поверхности дюны (б)

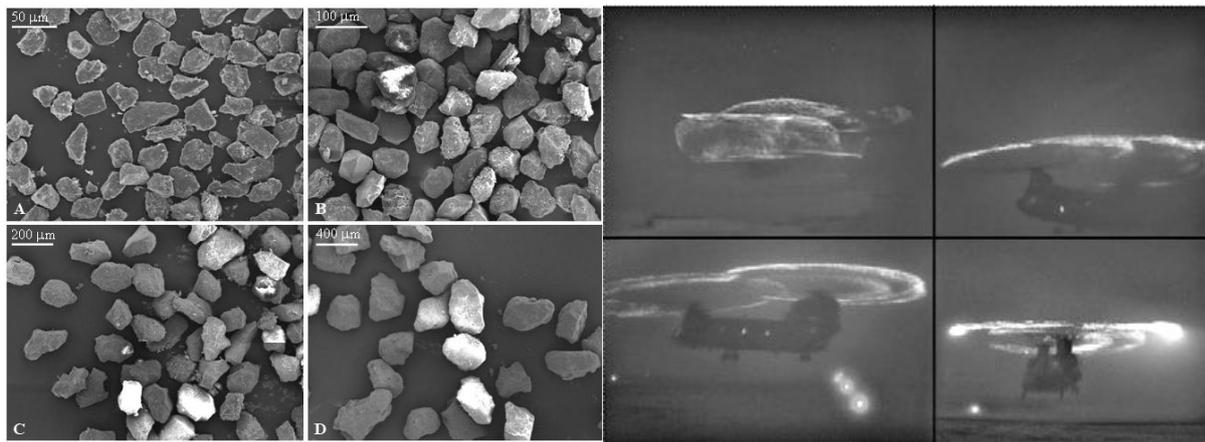


а)



б)

Рис. 7. Экспериментальные результаты измерения напряженности электрического поля на различной высоте над поверхностью при эоловой транспортировке песка и пыли, усредненные значения за 5-минутные интервалы [2] (а); электрические разряды во время пылевой бури [12] (б)



а)

б)

Рис. 8. Фотографии песчинок различных размеров под электронным микроскопом [17] (а); фотографии коронных разрядов на лопастях вертолетов в насыщенном пылью и песком приповерхностном воздухе пустыни [13] (б)

Напрашивается вывод, что возникающие при эоловой транспортировке неоднородные электрические поля (несмотря на то, что напря-

женность их существенно меньше пробивного напряжения чистого воздуха) оказываются достаточно точными для того, чтобы вызвать в узком припо-

верхностном слое (переносимом с интенсивным перемешиванием песчано-пылевой воздушной смеси) развитие процессов ионизации газов, входящих в состав воздуха. А эти ионизированные области, окантовывающие волны песчаной ряби с большим количеством синхронно направленных квазиплоских участков – «фацет», и являются системой отражателей, отвечающей за формирование anomalно узконаправленного обратного рассеяния СВЧ-радиоволн, наблюдаемого при радиолокационном боковом обзоре (только при облучении со стороны подветренных теневых зон, т. е. навстречу волнам, формирующимся под действием ветра). Подветренные теневые зоны у песчаных волн, у самых мелких (песчаной ряби), крупных и самых крупных – песчаных дюн, направлены под углами $\psi \approx 31 \div 35^\circ$ от горизонтали [6, 18] (т. е. радиоволны, облучающие по-

верхность в диапазоне локальных углов падения $\Theta \approx 31 \div 34^\circ$, оказываются практически нормально направленными к этим «фацетам», что и вызывает высокую направленность отражения). В реальности диапазон углов облучения поверхности, в котором наблюдается anomalно узконаправленное рассеяние радиоволн, в значительной степени определяется вариациями крупномасштабных углов наклона плоских поверхностей структур песчаных дюн (см. рис. 6, б), на которых формируется песчаная рябь.

Предположение о том, что anomalно узконаправленное рассеяние радиоволн связано с процессом формирования песчаной ряби, позволяет также объяснить особенности радиолокационных изображений с высоким разрешением (~ 30 м, в диапазоне углов облучения $\Theta \approx 23 \pm 3^\circ$) крупномасштабных песчаных гряд (рис. 9).

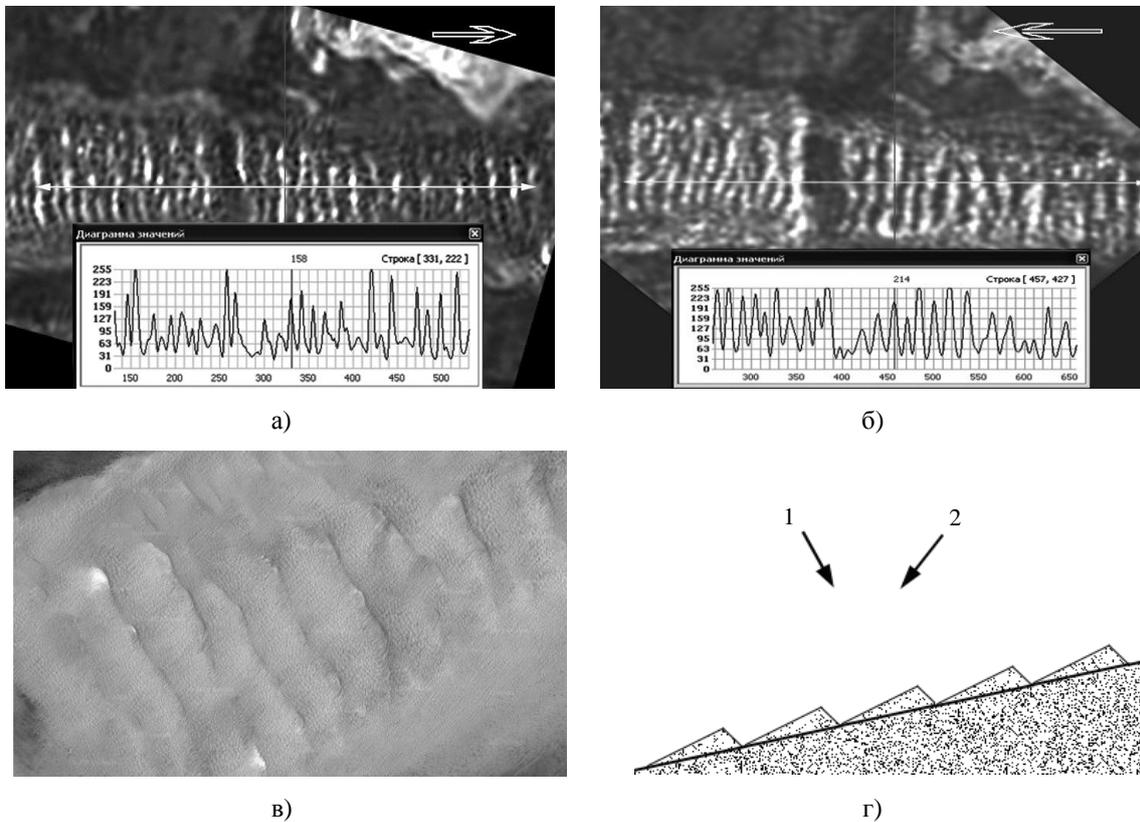


Рис. 9. Изображения сечений фрагментов РСА изображений песчаных гряд на участке, обозначенном на рис. 3, б, в белыми прямоугольниками, полученных в режиме высокого разрешения

На рис. 9 представлены изображения сечений фрагментов РСА изображений песчаных гряд на участке, обозначенном на рис. 3, б, в белых прямоугольниками, полученных в режиме высокого разрешения: а) – ASAR Envisat-1 21.12.2004 г. (ASA_IM_OP, направление облучения поверхности – с запада на восток); б) – SAR ERS-2 05.12.2001 г. (SAR_IMO_OP, направление облуче-

ния поверхности – с востока на запад); в) – оптическое изображение этого же участка; г) – схематическое изображение песчаной ряби на склоне песчаной гряды (1 и 2 направления облучения, при котором происходит интенсивное отражение радиоволн).

Рельеф на участке, обозначенном на рис. 3, б, в белых прямоугольниками, состоит из

параллельных прямолинейных гряд с очень пологими склонами ($\sim 5 \div 10^\circ$), протягивающихся на многие десятки километров. Гряды отделяются друг от друга такими же правильными и длинными понижениями, они достигают [19] средней ширины 1 км и относительной высоты волн $\sim 10 \div 20$ м, разделяющие их ложбины – примерно 2 км. Схематическое изображение песчаной ряби на наветренном склоне песчаной гряды демонстрирует, что при этом направления облучения (ортогональные граням песчаной ряби), при которых происходит интенсивное отражение радиоволн, попадают в диапазон углов облучения РСА как при облучении по ветру, так и навстречу ему. При этом наветренные склоны песчаных гряд наблюдаются с высоким контрастом относительно фона, что подтверждается рис. 9, а, б. Подветренные склоны при этом оказываются в зоне радиолокационной тени и не видны.

Анализ многочисленных спутниковых радиолокационных изображений различных районов пустынь показывает, что эффекты узконаправленного обратного рассеяния радиоволн наблюдаются в различных местах – и в центральной Сахаре, и в Аравийских пустынях. Но наиболее регулярно и ярко они проявляются в пустынях Мавритании, где обнаружены значительные железорудные, медноколчеданные и золото-содержащие месторождения, а также залежи свинца, цинка, барита и фосфоритов [20]. Эти месторождения являются источниками мощного инициатора ионизации воздуха – радона [21], который существенно облегчает процесс ионизации в узком приповерхностном слое воздуха, наполненном переносимой в режиме интенсивного перемешивания песчано-пылевой воздушной смесью. Локальные участки воздуха, ионизированные радиоактивными выбросами (в том числе выбросами из месторождений), достаточно уверенно наблюдаются радиолокационными средствами [22]. А в работе [23] экспериментально показана высокая отражающая способность ионизированных структур.

Выводы. Проведен анализ и обобщение особенностей рассеяния радиоволн при радиолокационных наблюдениях эоловых процессов транспортировки песка и пыли в пустынных районах (Эль-Джуф, Акшар и Трарза в районе структуры Гуэль-Эр-Ришат (Мавритания)), с помощью РБО ИСЗ «Космос-1500» и «Сич-1» ($\lambda = 3,15$ см), РСА ERS-1, ERS-2 и Envisat-1 ($\lambda = 5,6$ см) за период 1983–2011 гг. Выявлен эффект аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн, проявляющийся (в диапазоне локальных углов облучения поверхности $\Theta \approx 31 \div 34^\circ$) на участках, покрытых глубоким песком, при направлении облучения поверхности радиоволнами навстречу генеральному направлению приповерх-

ностного ветра. Предложено объяснение механизма этого эффекта за счет взаимодействия падающих радиоволн с согласованно ориентированными ионизированными слоями воздуха, окаймляющими структуры песчаной ряби в процессе формирования ее при эоловом переносе песчано-пылевой смеси. Ионизация вызывается сильным неоднородным электрическим полем, возникающим при сальтации песчинок под воздействием ветра. Радиолокационный контраст участков поверхности, где проявляется такое узконаправленное обратное рассеяние радиоволн, относительно соседних составляет не менее $6 \div 8$ дБ (при $\sigma^\circ \geq -10$ дБ на рабочей длине волны РБО $\lambda = 3,15$ см).

Для разработки методов дистанционного определения параметров эоловой транспортировки песка и пыли с использованием аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн, по нашему мнению, необходимо провести синхронные измерения параметров такого рассеяния при многочастотной радиолокационной авиационной съемке с различных направлений и под разными углами облучения поверхности (для различных скоростей приповерхностного ветра); также дать определение двумерной структуры напряженности поля на различной высоте над поверхностью с шагом в единицы сантиметров и малым интервалом усреднения. Эти измерения необходимо сочетать с лазерным определением профиля песчаных структур.

Библиографический список

1. Lancaster N. Aeolian features and processes / N. Lancaster // The Geological Society of America. – 2009. – P. 1–25.
2. Schmidt D. S. Electrostatic force on saltating sand / D. S. Schmidt, R. A. Schmidt, J. D. Dent // J. of Geophysical Research. – 1998. – 103, N d8. – P. 8997–9001.
3. Radar Techniques and Facilities for On-Line Remote Sensing of the Earth from Aerospace Carriers / A. G. Boyev, V. B. Yefimov, V. N. Tsybal et al. – Kharkov: Publishing house O. V. Sheynina, 2010. – 428 p.
4. Wetter3.de [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.wetter3.de/Archiv/index.html>. – Загл. с экрана.
5. Duran O. On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws / O. Duran, P. Claudin, B. Andreotti // Aeolian Research. – 2011. – 3. – P. 243–270.
6. Великанов М. А. Гидрология суши / М. А. Великанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 310 с.
7. The physics of wind-blown sand and dust / J. F. Kok, E. J. R. Parteli, T. I. Michaels, Diana Bou Karam // Rep. Prog. Phys. – 2012. – 75, N 10. – 106901 (72 p.)
8. Kok J. F. Electrostatics in Wind-Blown Sand / J. F. Kok, N. O. Renno // Phys. Rev. Lett. – 2008. – 100, iss. 1. – 014501 (4 p.).
9. Stow C. D. Dust and sand storm electrification / C. D. Stow // Weather. – 1969. – 24, iss. 4. – P. 134–144.
10. Namikas S. L. Field Measurement and Numerical Modeling of Aeolian Mass-Flux Distributions on a Sandy Beach / S. L. Namikas // Sedimentology. – 2003. – 50, iss. 2. – P. 303–326.
11. Greeley R. Field Measurements of the Flux and Speed of Wind-blown Sand / R. Greeley, D. G. Blumberg, S. H. Williams // Sedimentology. – 1996. – 43, iss. 1. – P. 41–52.

12. *Пылевые бури* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.diary.ru/~AgentSniper/p171617329.htm?oam>. – Загл. с экрана.
13. Zheng X.-J. Electrification of wind-blown sand: Recent advances and key issues / Xiao-Jing Zheng // Eur. Phys. J. E. – 2013. – 36, iss. 12. – 15 p.
14. *Имянитов И. М.* Атмосферное электричество // Физическая энциклопедия: в 5 т. Т. 1. / И. М. Имянитов. – М.: Сов. энцикл., 1988. – 704 с.
15. *Энциклопедия физики и техники* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0217.html. – Загл. с экрана.
16. *Helicopter Static-Electricity Phenomenon*, <http://defence.pk/threads/helicopter-static-electricity-phenomenon.75190/>. – Загл. с экрана.
17. *Kok J. F.* Understanding Wind-Blown Sand And The Electrification Of Granular Systems by Jasper F. Kok / A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Applied Physics) in The University of Michigan 9. – 2009. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/63669/jfkok_1.pdf?sequence=1. – Загл. с экрана.
18. *Википедия.* Дюна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D1%8E%D0%BD%D0%B0>. – Загл. с экрана.
19. *Сайт о планете Земля.* Дюнные гряды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://5materik.ru/stati/duynnye-grady>. – Загл. с экрана.
20. *Мавритания* краткий геологический очерк [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.shirkunov.org/mauritania.html>. – Загл. с экрана.
21. *Природный радиационный фон: происхождение и эволюция* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://phys.rsu.ru/web/students/RadSec/10.pdf>. – Загл. с экрана.
22. *Ковалев Д. А.* Распознавание радиоактивных выбросов в атмосфере при помощи радиолокационных средств и прогнозирование их распространения / Д. А. Ковалев, В. Н. Михайлов // Материалы IV Междунар. конгресса «Цели развития тысячелетия» и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов». Научно-практическая конф. «Научные и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». – СПб: ООО ПИФ.СОМ, 2011. – С. 78–82.
23. *Electromagnetic wave scattering by an array of tubes filled with plasma* / A. V. Danilov, S. A. Ilchenko, A. T. Kunavin et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – 30, N 16. – P. 2313–2319.

Рукопись поступила 10.12.2014.

V. K. Ivanov, A. Ya. Matveev,
V. N. Tsybmal, S. Ye. Yatsevich

RADAR INVESTIGATIONS OF THE AEOLIAN SAND AND DUST TRANSPORTING MANIFESTATIONS IN DESERT AREAS

Aeolian processes transporting sand and dust is a powerful erosive force that shapes the structure of the surface of the vast territories and loads the atmosphere with aerosols suspended dust spread by wind over long distances. The presence of atmospheric dust in the environment of the planet is one of the factors significantly affecting the temperature and climatic conditions of vast regions. There are no published data on the characteristics of the radio waves scattering features manifested in radar studies of aeolian sand and dust transport processes in desert regions, which can be used for determining the parameters of a

remote transport. The article presents the results of the analysis of multiyear surveys of desert areas by side-looking radars (SLR) of “Cosmos-1500” and “Sich-1” satellites, synthetic aperture radars (SAR) of ERS-1, ERS-2 and Envisat-1, aimed at identifying the radio waves scattering features manifested in radar studies of aeolian sand and dust transportation processes in desert regions, which can be used for remote determining the parameters of transportation. It was proposed to explain the mechanism of the effect of a highly directional intense radio waves backscatter, which manifests itself in areas covered with deep sand at the direction of irradiating the surface towards the general direction of the surface wind in the range of local irradiation angle surface $\Theta \approx 31 \div 34^\circ$, due to their interaction with consistently oriented ionized air layers bordering on sand ripples structures in the process of forming it with aeolian transportation of sand-dust mixture. Ionization is caused by strong inhomogeneous electric field arising in the aeolian transport process. Results of the study allow to create new remote monitoring methods of processes in desert areas that affect the climate of vast regions of the Earth.

Key words: radar sensing, highly directional radio wave backscatter, aeolian transport of sand and dust, sand ripples, ionization, the electric field.

В. К. Иванов, О. Я. Матвеев,
В. М. Цимбал, С. Е. Яцевич

РАДІОЛОКАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЯВІВ ЕОЛОВОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ПІСКУ ТА ПИЛУ В ПУСТЕЛЬНИХ РАЙОНАХ

Еолові процеси транспортування піску та пилу – потужна ерозійна сила, що формує структуру поверхні величезних територій та завантажує атмосферу завислими аерозолями пилу, які поширюються вітрами на величезні відстані. Присутність атмосферного пилу в навколишньому середовищі планети є одним з факторів, що суттєво впливають на температуру та кліматичні умови великих регіонів. У літературі відсутні дані про особливості розсіювання радіохвиль, що проявляються при радіолокаційних дослідженнях еолових процесів транспортування піску та пилу в пустельних районах, які можуть бути використані для визначення параметрів такого транспортування. У статті надано результати аналізу багаторічних зйомок пустельних районів радіолокаторів бічного огляду (РБО) ШСЗ «Космос-1500» та «Січ-1», радіолокаторів з синтезованою апертурою (РСА) ERS-1, ERS-2 та Envisat-1. Метою цього аналізу було виявлення особливостей розсіювання радіохвиль, що проявляються при радіолокаційних дослідженнях еолових процесів транспортування піску та пилу в пустельних районах, які можуть бути використані для визначення параметрів такого транспортування. Виявлено ефект аномально вузьконаправленого зворотного розсіювання радіохвиль, що проявляється на ділянках, вкритих глибоким шаром піску, при напрямку опромінення поверхні назустріч генеральному напрямку приповерхневого вітру в діапазонах локальних кутів опромінення поверхні $\Theta \approx 31 \div 34^\circ$. Запропоновано пояснення механізму виникнення ефекту внаслідок взаємодії падаючих радіохвиль з узгоджено орієнтованими іонізованими шарами повітря, що облямовують структури піщаної брижі у процесі формування її при еоловому переносі піщано-пилової суміші. Іонізація викликана потужним неоднорідним електричним полем, що виникає при сальтації піщинки під впливом вітру. Результати дослідження дозволяють створювати нові методи дистанційного моніторингу процесів у пустельних районах, що впливають на клімат великих регіонів Землі.

Ключові слова: радіолокаційне спостереження, вузьконаправлене зворотне розсіювання радіохвиль, еолове перенесення піску та пилу, піщані брижі, іонізація, електричне поле.