

**В. К. Иванов, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич, Д. М. Бычков**

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

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

E-mail: [vn\\_tsymbal@mail.ru](mailto:vn_tsymbal@mail.ru)

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ ПУСТЫННЫХ ОБЛАСТЕЙ – ИСТОЧНИКОВ НАСЫЩЕНИЯ ПЫЛЬЮ АТМОСФЕРЫ

Атмосферная пыль представляет собой смесь мельчайших частичек различных солей, минералов; она содержит также остатки животных организмов, споры болезнетворных микробов и т. п. Ветрами пыль переносится на значительные расстояния, и ее присутствие в атмосфере является одним из факторов, существенно влияющих на климат планеты. В настоящее время для космического мониторинга эоловых процессов и их последствий используются только многозональные оптические системы (*TOMS*, *METEOSAT*, *MODIS* и т. п.), которые не позволяют надежно и независимо от облачности, освещенности и прозрачности атмосферы идентифицировать сами районы – источники поднятия пыли в атмосферу. Такую задачу позволяют решить космические радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. В статье представлены первые результаты отработки радиолокационного метода идентификации пустынных областей, в которых под действием эоловых процессов происходит процесс подъема пыли с поверхности в атмосферу. Обработка производилась по данным радиолокационного ДЗЗ пустынь Мавритании *SAR Envisat-1*. Проанализированы особенности проявления узконаправленного обратного рассеяния радиоволн на радиолокационном изображении при различных скоростях приповерхностного ветра, направлениях радиолокационного облучения поверхности и направлениях ветра. Сделан вывод об эффективности применения радиолокационных средств дистанционного зондирования для выявления районов поднятия пыли в атмосферу. Результаты исследования позволяют создать новые методы дистанционного мониторинга процессов в пустынных районах, влияющих на климат обширных регионов Земли. Ил. 6. Библиогр.: 16 назв.

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

Атмосферная пыль представляет собой смесь мельчайших частичек различных солей, минералов, горных пород, угля, почвы и других различных смесей и химических соединений минерального и органического характера; она содержит также остатки растительных и животных организмов, споры болезнетворных микробов и т. п. Ветрами пыль переносится на значительные расстояния, и ее присутствие в атмосфере является одним из факторов, существенно влияющих на климат планеты [2]. При малых концентрациях пыль способствует разогреву атмосферы и приводит к потеплению климата. При больших концентрациях пыль препятствует проникновению солнечных лучей и охлаждает Землю. Известно, что в год из всего объема поднятой в атмосферу пыли и песка примерно 4 млрд тонн возвращается с атмосферными осадками на поверхность континентов, а свыше 1,5 млрд тонн выпадает на поверхность Мирового океана и затем входит в состав морских осадков [3]. Учитывая континентальный характер эоловых (ветровых) процессов, очевидно, что их непрерывный мониторинг возможен только с помощью космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

В настоящее время для космического мониторинга эоловых процессов и их последствий используются только многозональные оптические системы (*TOMS*, *METEOSAT*, *MODIS* и т. п. [4]), которые не позволяют надежно и независимо от облачности, освещенности и прозрачности атмосферы идентифицировать сами районы источники

подъема пыли в атмосферу и следить за динамикой эоловых процессов. Такую задачу позволяют решить космические радиолокационные системы ДЗЗ. В [1] представлены связанные с указанными процессами результаты обнаружения проявлений эффектов аномального узконаправленного обратного рассеяния радиоволн. Они наблюдаются при практически одинаковых углах локального облучения поверхности  $\theta \sim 30^\circ$  как на радиолокационных изображениях (РЛИ) пустынь Мавритании, полученных радиолокаторами бокового обзора искусственных спутников Земли (ИСЗ) «Космос-1500» и «Сич-1» (длина рабочей волны  $\lambda = 3,15$  см), так и радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) *SAR Envisat-1* ( $\lambda = 5,6$  см). Было предложено объяснение механизма возникновения этого эффекта из-за рассеяния радиоволн согласованно ориентированными ионизированными слоями, окаймляющими структуры песчаной ряби в процессе ее формирования при эоловом переносе песчано-пылевой смеси. Высказано предположение, что ионизация вызывается сильным неоднородным электрическим полем, возникающим при эоловом переносе.

В настоящей статье представлены первые результаты отработки радиолокационного метода идентификации пустынных областей, в которых под действием эоловых процессов происходит процесс подъема пыли с поверхности в атмосферу. Обработка производилась с использованием калиброванных данных радиолокационного дистанционного зондирования пустынь Мавритании

SAR *Envisat-1* за 2004–2012 гг. Анализировались особенности проявления узконаправленного обратного рассеяния радиоволн на РЛИ, возникающие при различных скоростях приповерхностного ветра и различных соотношениях направления радиолокационного облучения поверхности и направления ветра. Рассмотрены особенности формирования при эоловом переносе песчано-пылевой смеси границы ионизированного слоя, окаймляющего структуры песчаной ряби. Предполагается, что ионизация вызывается сильным неоднородным электрическим полем, возникающим за счет перемещения по воздуху над песчаной подложкой заряженных песчинок – сальтонов и рептонов. В заключении сделан вывод об особенностях эффективного применения радиолокационных средств дистанционного зондирования для выявления районов поднятия пыли в атмосферу.

**1. Анализ особенностей эффектов аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн и эоловой транспортировки песчано-пылевой смеси.** Для проверки предложенного в [1] механизма возникновения аномального узконаправленного рассеяния радиоволн оценим эффективность рассеяния радиоволн самой песчаной поверхностью, покрытой песчаной рябью. Для этого определим максимально возможный (при возвратно-наклонном дистанционном зондировании) коэффициент обратного рассеяния такой структуры в стационарном состоянии, т. е. при отсутствии движения песчаной ряби под воздействием ветра, для случая, когда радиоволна облучает ее нормально к поверхности подветренного склона (рис. 1, а). Эффективное проникновение радиоволны  $\lambda = 5,6$  см в сухой песок составляет десятки сантиметров (т. е. несколько длин волн), а значит, рассеяние песчаной рябью представляет собой тип поверхностно-объемного рассеяния с множеством отражателей. Соотношение фаз соответствующих гармоник спектров радиолокационных сигналов, рассеянных соседними «горбами» ряби, отстоящими в пространстве на несколько  $\lambda$ , является случайной величиной. Для такой структуры относительно ровной песчаной поверхности радиолокационный контраст  $K$  (дБ) может быть определен как

$$K = 10 \log \frac{(10^{0,1\sigma_{\theta-\beta}} L_1 + 10^{0,1\sigma_{\theta-\alpha}} L_2)}{(10^{0,1\sigma_{\theta}} l)},$$

где  $h = l/n$ , по различным источникам  $n$  в среднем составляет 20...10 [5, 6],  $L_1 = l/(n \sin \beta)$ ,

$$L_2 = \sqrt{(l/n)^2 + [l - l/(n \tan \beta)]^2};$$

$$\alpha = \arcsin \left( l / \left( n \sqrt{(l/n)^2 + [l - l(n \tan \beta)^2]} \right) \right);$$

$\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_{\theta-\alpha}$  и  $\sigma_{\theta-\beta}$  – коэффициенты обратного рассеяния (в децибеллах) песчаной поверхности при углах облучения  $\theta$ ,  $(\theta - \alpha)$  и  $(\theta - \beta)$  соответственно (рис. 1, а). При нормальном облучении подветренного склона ряби  $\theta = \beta = 30^\circ$ , в зависимости от  $n$   $\alpha = 3,2...7,1^\circ$ . Используя экспериментальные данные измерения коэффициента обратного рассеяния  $\sigma$  пустынного песка от угла локального облучения  $\theta$  [7], получаем, что максимально возможные значения  $\sigma$  песчаной поверхности, покрытой рябью, не превышают –14...–17 дБ. В реальности, как свидетельствуют фотографии структур песчаной ряби (рис. 1, б–г), форма подветренного склона «горба» ряби существенно отличается от плоскости, что, очевидно, уменьшает эти значения.

**2. Анализ экспериментальных результатов.** Оценка интенсивности рассеяния песчаной поверхности при эоловом переносе песчано-пылевой смеси проводилась по архивным РЛИ ИСЗ *Envisat-1*, предоставленным Европейским космическим агентством *ESA* для выполнения проекта *ID: C1F.30193*. Они были выбраны при помощи *on-line* каталога *EOLI-SA* с учетом данных о направлении и скорости приповерхностного ветра [8], откалиброваны по эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), привязаны к карте и тематически обработаны с помощью стандартных программ, открыто предоставляемых *ESA* для обработки изображений (*NEST 4B-1.0*, *NEST 5.1*).

На рис. 2, а, б приведены фрагменты РЛИ участка пустыни Трарза ИСЗ *Envisat-1* *ASA\_GM1\_1P* от 2012-01-12 и 2005-01-13, а на рис. 2, в и г – соответствующие им графики зависимости коэффициента обратного рассеяния  $\sigma$  от угла локального облучения  $\theta$  вдоль сечений фрагментов (стрелки 1–5). Сечения проведены через наиболее однородные участки поверхности, на которых проявляются эффекты аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн. Более плотным черным цветом показаны усредненные зависимости  $\sigma(\theta)$ . Видно, что усредненные наблюдаемые значения  $\sigma(\theta = 31,5...32^\circ)$  на рис. 2, в превышают 5 дБ, а на рис. 2, г – 3 дБ при одинаковых метеоусловиях (рис. 2, д), что более чем на 17...21 дБ превышает максимальные расчетные значения для статической песчаной ряби. Согласно метеоданным [8], скорость приповерхностного ветра во время этих съемок составляла около 5 м/с, а направление было практически противоположным направлению излучения РСА.

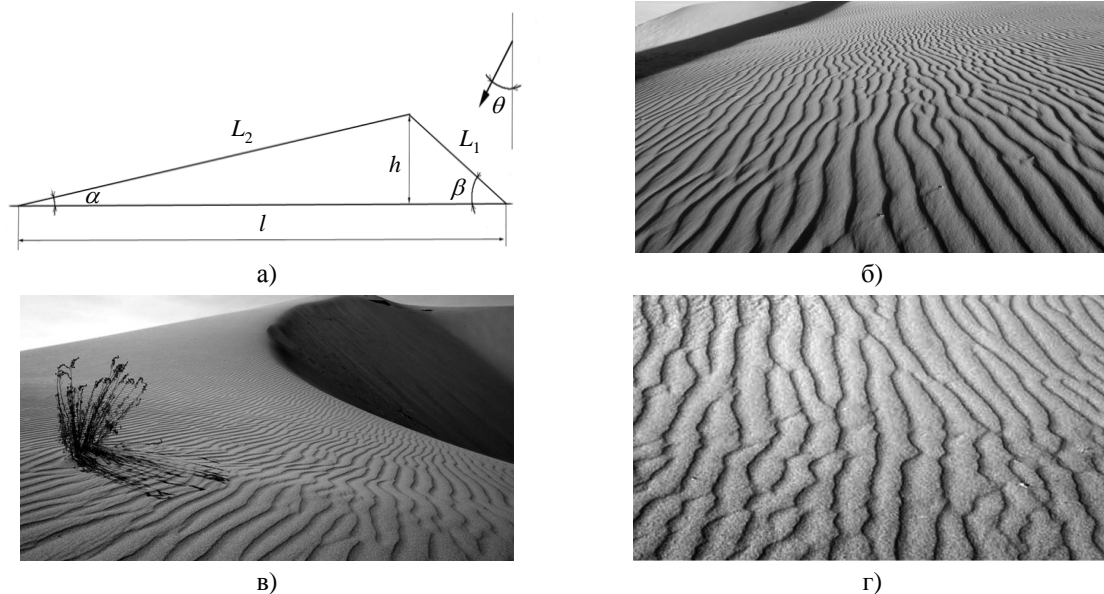


Рис. 1. Песчаная рябь: а) схематическое изображение одного элемента; б)–г) фотографии структур (Google Earth)

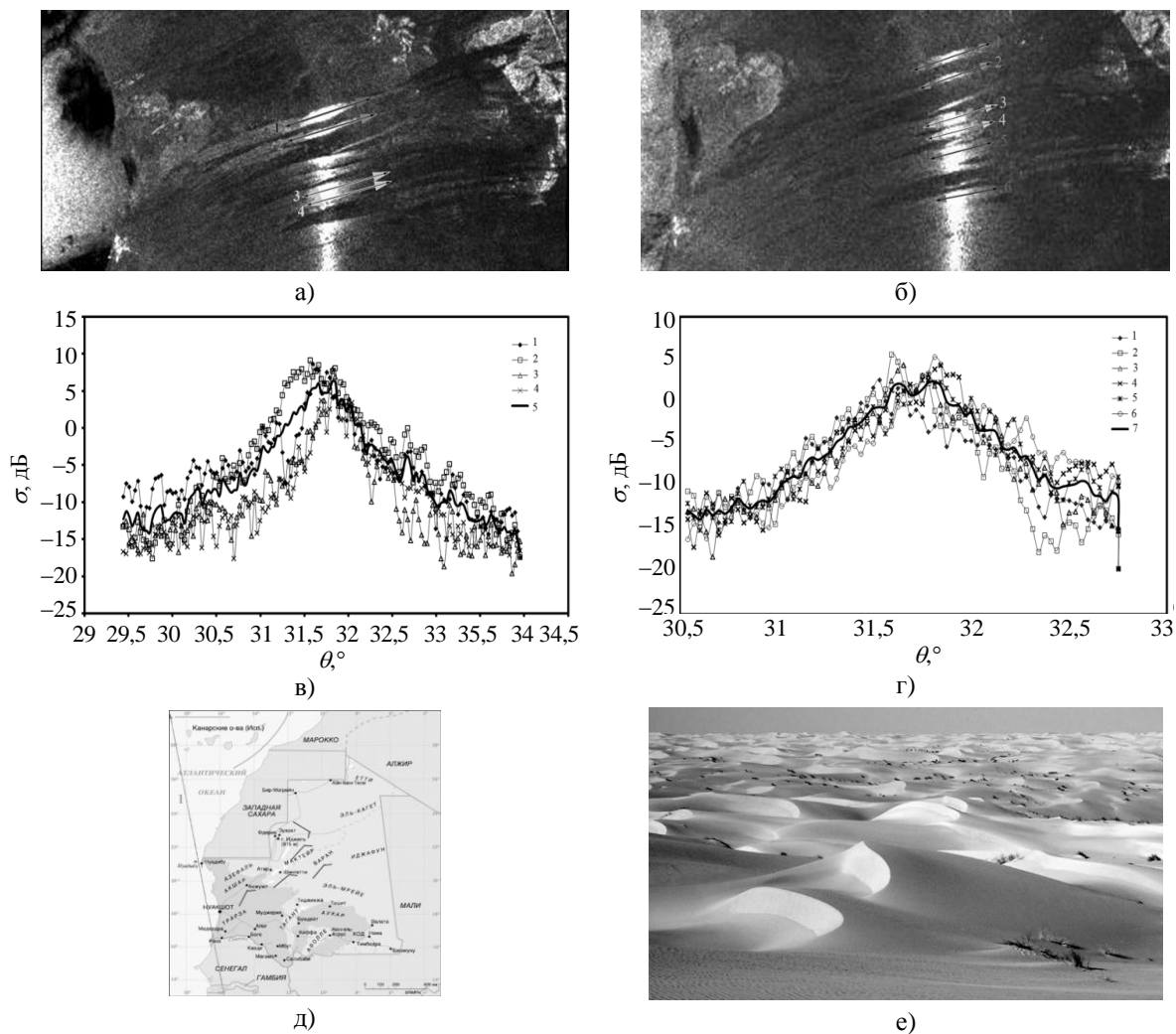


Рис. 2. Эффект проявления аномального узконаправленного обратного рассеяния радиоволн: а), б) фрагменты РЛИ участка пустыни Трарза ИСЗ *Envisat-1* ASA\_GM1\_1P от 2012-01-12, 2005-01-13 (© ESA), соответственно; в), г) графики изменений коэффициента обратного рассеяния  $\sigma$  от угла локального облучения  $\theta$  вдоль сечений соответствующих фрагментов РЛИ; д) метеобстановка в районе съемки [8]; е) песчаные дюны в районе съемки (Google Earth)

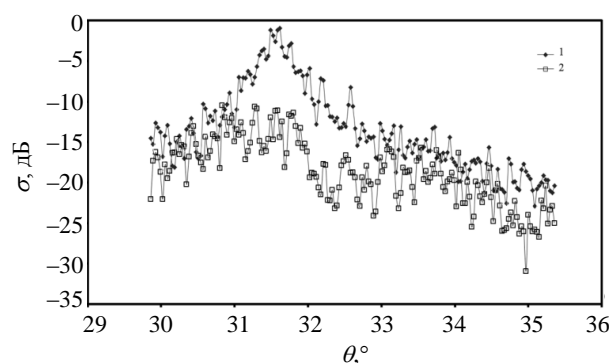
На рис. 3 показаны фазы развития процессов аномального рассеяния. При слабом ( $\sim 1$  м/с) и нестабильном по направлению приповерхностном ветре (рис. 3, а, левая часть комбинированного РЛИ *Envisat-1*, *ASA\_GM1\_1P*, 2004-06-11) проявления эффектов аномального узконаправленного обратного рассеяния радиоволн не наблюдалось. Но уже при скорости ветра  $\sim 2$  м/с и практически встречном направлении излучения РСА ветре (правая часть комбинированного РЛИ *Envisat-1* *ASA\_GM1\_1P*, 2004-11-12) эффект аномального

рассеяния уже значителен. Более низкое значение максимального ЭПР ( $\sim -1$  дБ) при угле зондирования  $\theta = 31,5^\circ$  (рис. 3, б), чем на рис. 2, а (5 дБ), можно объяснить меньшей скоростью приповерхностного ветра в момент съемки.

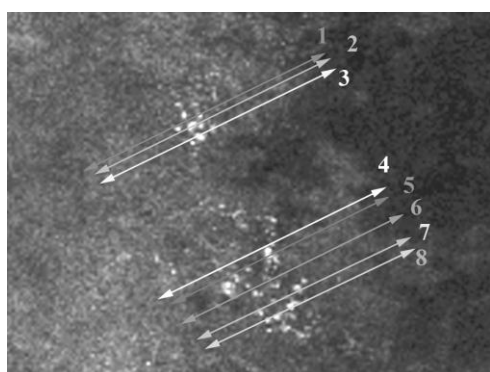
На рис. 3, в и г показана стадия зарождения эффекта аномального узконаправленного обратного рассеяния радиоволн. На фрагменте РЛИ (рис. 3, в, *Envisat-1* *ASA\_GM1\_1P*, 2010-14-12) яркие точки указывают на участки поверхности, где начинает проявляться этот эффект.



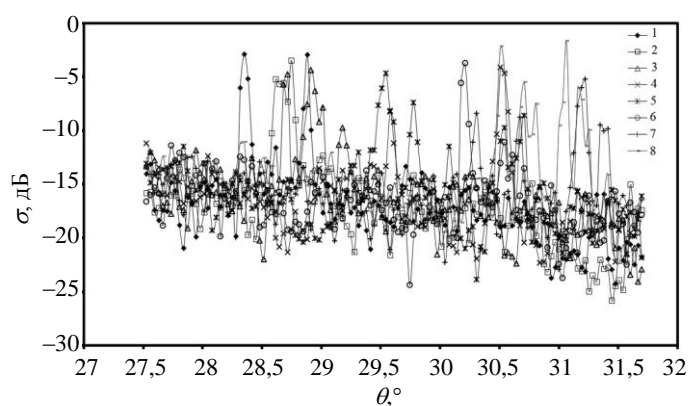
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Фрагменты РЛИ *Envisat-1* *ASA\_GM1\_1P* (© ESA) от 2004-06-11 при скорости ветра  $\sim 1$  и  $\sim 2$  м/с (а); графики изменений коэффициентов обратного рассеяния  $\sigma$  от угла локального облучения  $\theta$  вдоль сечений РЛИ (б); фрагмент радиолокационного изображения пустыни от 2010-14-12 (в); графики изменений коэффициентов обратного рассеяния  $\sigma$  от угла локального облучения  $\theta$  вдоль сечений радиолокационных изображений (г)

Съемка проводилась при переменном по направлению относительно излучения РСА приповерхностном ветре, скорость которого находилась в пределах 1...2 м/с. Необходимо отметить, что в этих условиях локальные максимумы обратного рассеяния (рис. 3, г) уже достигают значительных величин ( $-5 \dots -2$  дБ), но проявляются в более широком диапазоне углов  $\theta$  ( $28,5 \dots 31,5^\circ$ ), чем в развитом состоянии ( $\sim 31,5 \pm 0,25^\circ$ ). Ниже мы еще вернемся к анализу этого эффекта.

На рис. 4, а приведен фрагмент РЛИ, а на рис. 4, б соответствующие графики  $\sigma(\theta)$  сечений

(*Envisat-1* *ASA\_GM1\_1P*, 2005-28-12) участка пустыни Трарза. Съемка проводилась в условиях, когда скорость приповерхностного ветра составляла около 5 м/с, а его направление было отклонено на  $\sim 45^\circ$  от направления радиолокационного облучения поверхности (в азимутальной плоскости).

При этом наблюдается уменьшение максимального значения  $\sigma$  на 3...4 дБ по сравнению с данными *Envisat-1* *ASA\_GM1\_1P* от 2012-01-12 и 2005-01-13 (рис. 2), полученными при той же скорости и направлении ветра – практически навстречу излучению РСА.

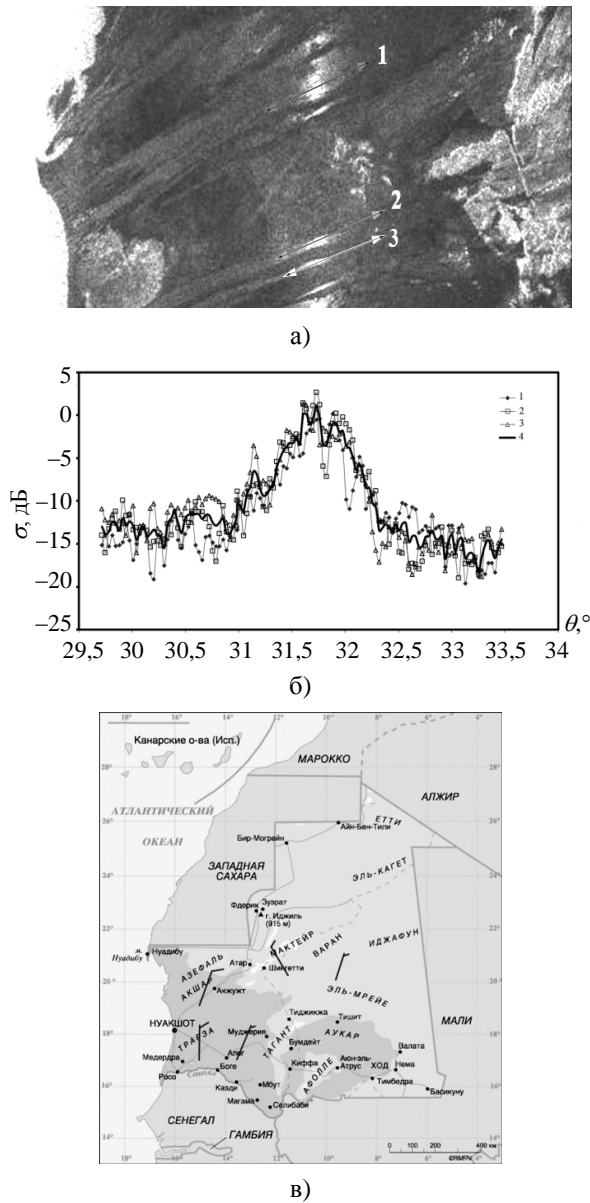


Рис. 4. Эффект аномального узконаправленного рассеяния радиоволн при отклонении встречного направления ветра на  $\sim 45^\circ$  по отношению к направлению излучения РСА: а) фрагмент РЛИ (*Envisat-1 ASA\_GM1\_1P*, 2005-28-12, © ESA) участка пустыни Тразза; б) графики зависимости коэффициентов обратного рассеяния  $\sigma$  от угла локального облучения  $\theta$  вдоль сечений (стрелки 1–3) радиолокационных изображений (рис. 4, а); в) метеобстановка в районе съемки [8]

Для объяснения полученных экспериментальных результатов наблюдения аномального рассеяния радиоволн напомним, что мы считаем основным рассеивателем радиоволн в эксперименте ионизированный воздух приповерхностного слоя, насыщенный движущимися под действием ветра отрицательно заряженными песчинками. Рассмотрим особенности их движения.

### 3. Особенности перемещения отрицательно заряженных песчинок над поверхностью.

Для описания движения над поверхностью

отрицательно заряженных песчинок (сальтонов) с учетом тормозящих, гравитационных и электрических сил используются различные модели. Например, в [9] движение таких частиц описывается как

$$ma_x = \pi D_p^2 / 8 \rho_a C_d |V_R| (U - v_x),$$

$$ma_z = \pi D_p^2 / 8 \rho_a [-C_d |V_R| v_z + C_1 (U_{top}^2 - U_{bot}^2) - mg + qE],$$

где  $m$ ,  $q$  и  $D_p$  являются соответственно массой, зарядом и диаметром частицы;  $a_x$  и  $a_z$  – ускорениями частицы в  $x$  и  $z$  направлениях;  $V_R$  – вектор разницы между скоростью ветра и частицы;  $U$  – горизонтальная скорость ветра;  $U_{bot}$  и  $U_{top}$  – скорости ветра ниже и выше частицы;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $g$  – гравитационная постоянная;  $E$  – электрическое поле в месте расположения частицы. Коэффициент торможения  $C_d$  вычисляется с использованием числа Рейнольда для соответствующей формы песчинок. Коэффициент поднятия  $C_1$  составляет  $0,85C_d$ . Для определения траектории полета частицы уравнения движения численно интегрируются.

В работе [10] показано, что при так называемом «всплеске», происходящем при попадании сальтона, летящего под действием ветра с высокой скоростью, в песчаную подложку, из нее выбивается одна частица – отскочивший сальтон,двигающийся со скоростью, практически равной скорости ударяющего сальтона (рис. 5). Отскочивший сальтон вылетает из песчаной поверхности под углом  $34 \dots 40^\circ$  к горизонту. Кроме отскочившего сальтона, из песчаной поверхности выбиваются также одна или несколько (до 20, в зависимости от скорости и массы ударяющего сальтона [11]) частиц-рептонов,двигающихся со скоростью примерно в одну десятую скорости ударяющего сальтона. При этом рептоны вылетают под углом  $\sim 70^\circ$  к горизонту в различных направлениях – «веером» и не поднимаются в слой ускоряющего ветра. На рис. 5, б приведено трехмерное изображение [12] результатов численного моделирования процессов, происходящих при ударе сальтона о песчаную поверхность.

Для оценки средней скорости потока песчинок в приповерхностном слое используем скорость сдвига, которая применяется для описания движения при сдвигах, связанных с движением газов. Скорость сдвига, которая также называется скоростью трения [9], является формой, с помощью которой напряжение сдвига может быть переписано в единицах скорости:  $u_* = (\tau / \rho)^{1/2}$ , где  $\tau$  – напряжение сдвига в произвольном слое ветра;  $\rho$  – плотность воздуха. Общее правило заключается в том, что скорость сдвига составляет около 1/10 от средней скорости потока.

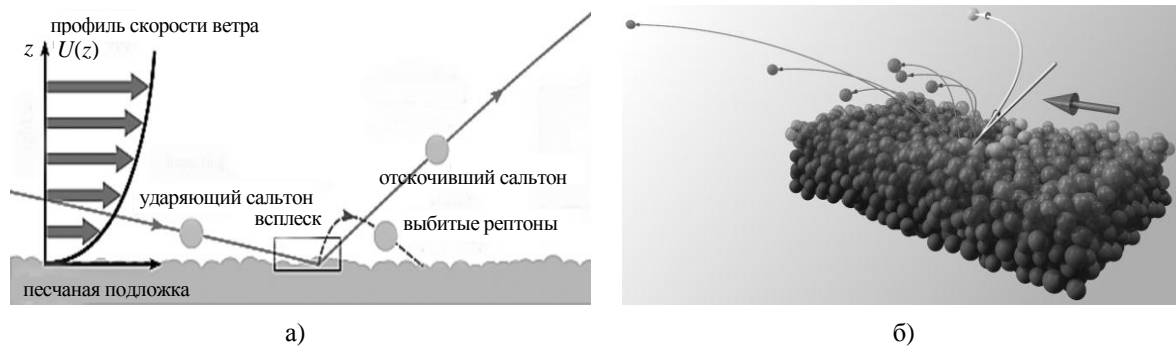


Рис. 5. «Всплеск», происходящий при попадании сальтона в песчаную подложку: а) схематическое изображение; б) трехмерное изображение результатов численного моделирования

На рис. 6, а приведены расчетные и экспериментальные зависимости средней длины  $l$  прыжка частиц в потоке эоловой транспортировки от скорости сдвига [13] (1 – данные [14], 2 – данные [15]), а на рис. 6, б – расчетные и экспериментальные зависимости средней высоты слоя частиц  $z_m$  в потоке эоловой транспортировки от скорости сдвига [13] (1 – данные [16], 2 – данные [14]). Экспериментальные результаты измерения средней длины прыжка и высоты потока песчинок при эоловой транспортировке убедительно показывают, что уже при скорости сдвига  $0,2 \dots 0,25$  м/с (т. е. при средней скорости потока  $2,0 \dots 2,5$  м/с) развивается процесс эоловой транспортировки. При увеличении скорости ветра происходит увеличение скорости полета и длины

прыжка сальтонов (а значит, и длины песчаной ряби; пунктирная линия на рис. 6, а), но не происходит роста средней длины прыжка песчинок из-за существенного роста удельного вклада выбиваемых медленных рептонов. При этом высота полета рептонов значительно ниже чем у сальтонов, угол вылета (а соответственно и трасса полета относительно горизонта) очень слабо зависит от угла попадания сальтонов в песчаную подложку (в диапазоне  $8 \dots 15^\circ$  от горизонта [12]). С ростом скорости ветра также происходит ограничение средней высоты потока частиц за счет увеличения воздействия электрического поля (рис. 6, б). При этом средний наклон трассы полета заряженных песчинок может быть определен из данных рис. 6, в  $\sim 30^\circ$ .

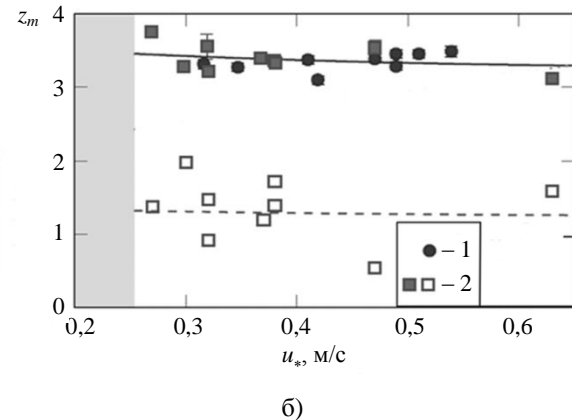
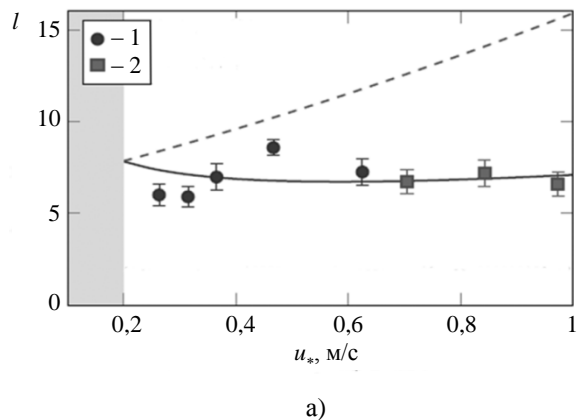


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости средней длины прыжка частиц (а) и средней высоты слоя частиц в потоке эоловой транспортировки от скорости сдвига (б)

Анализ этих данных позволяет объяснить особенности эффектов anomalно узконаправленного обратного рассеяния радиоволн:

- При скорости приповерхностного ветра  $\leq 2$  м/с, на стадии зарождения anomalно узконаправленного обратного рассеяния, наблюдается невысокая скорость полета сальтонов, а следовательно, при «всплеске» выбивается минимальное

число рептонов. При этом средний наклон трассы полета заряженных песчинок, который и определяет наклон границы ионизированной области (окаймляющей песчаную рябь [1] и отвечающей за «сильное» радиолокационное рассеяние), определяется как сальтонами, так и рептонами. Этот эффект хорошо наблюдается на рис. 3, в, г, где локальные максимумы обратного рассеяния

проявляются в более широком диапазоне углов  $\theta$  (28,5...31,5°).

- С ростом скорости ветра существенно возрастает вклад рептонов и наклон границы ионизированной области определяется в основном их трассами полета. При этом, поскольку угол вылета относительно горизонта (а значит и трасса полета рептонов) очень слабо зависит от угла попадания сальтонов в песчаную подложку [12], то процессы транспортировки песка по пологим наклонным поверхностям песчаных барханов, покрывающих пустыню, не приводят к расширению угловых зависимостей интенсивности обратного рассеяния. Угловая ширина зависимости  $\sigma(\theta)$  для аномально узконаправленного обратного рассеяния не превышает 0,5...1° по уровню – 3 дБ.

- Экспериментально установленный факт того, что выбиваемые рептоны вылетают в различных направлениях – «веером» [11], объясняет весьма слабую зависимость интенсивности аномально узконаправленного обратного рассеяния от отклонения направления ветра относительно направления навстречу радиолокационному облучению (в азимутальной плоскости) поверхности. При облучении вслед ветру эффект не наблюдается [1].

**Выводы.** В статье представлены первые результаты обработки радиолокационного метода идентификации пустынных областей, в которых под действием эоловых процессов происходит процесс подъема пыли с поверхности в атмосферу, для чего был проведен анализ особенностей проявления эффектов аномального узконаправленного обратного рассеяния радиоволн, возникающих при эоловой транспортировке песчано-пылевой смеси. Обработка произведена по архивным данным радиолокационного дистанционного зондирования, предоставленным ESA пустынь Мавритании, полученным PCA *Envisat-1* в течение 2004–2012 гг.

Анализировались особенности проявления узконаправленного обратного рассеяния радиоволн на РЛИ, возникающие при различных скоростях приповерхностного ветра и соотношениях направления радиолокационного облучения поверхности и ветра. Рассмотрены особенности формирования границы ионизированного слоя, окаймляющего структуры песчаной ряби при эоловом переносе песчано-пылевой смеси. Предполагается, что ионизация вызывается сильным неоднородным электрическим полем, возникающим за счет перемещения по воздуху над песчаной подложкой заряженных сальтонов – сальтонов и рептонов. Полученные оценки позволили объяснить экспериментальные угловые зависимости ЭПР изученных участков пустынь и

определить оптимальные условия наблюдения эффектов аномально узконаправленного обратного рассеяния радиоволн. Показано, что радиолокационное ДЗЗ позволяет наблюдать эти эффекты, начиная уже с очень небольших скоростей приповерхностного ветра (~2 м/с) и в достаточно широком диапазоне направлений облучения поверхности (относительно направления ветра – не менее 90°) азимутальной плоскости. Для обеспечения высокой эффективности радиолокационных систем идентификации пустынных областей, в которых происходит процесс подъема пыли с поверхности в атмосферу, необходимо предусмотреть в них режим последовательного (при соответствующих витках) наблюдения пустынных областей в диапазонах углов падения около 30°.

Работа выполнена в рамках проекта с *ESA ID: C1F.30193*.

#### Библиографический список

1. *Радиолокационные исследования проявлений эоловой транспортировки песка и пыли в пустынных районах* / В. К. Иванов, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Радиопизика и электрон. – 2015. – 6(20), № 1. – С. 48–57.
2. *Геологическая деятельность ветра* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www/helpiks.org/1-55062.html](http://www/helpiks.org/1-55062.html). – Загл. с экрана.
3. *Ozer P. Dust in the Wind and Public Health: Example from Mauritania* / P. Ozer // Int. Conf. Desertification, Migration, Health, Remediation and Local Governance. Royal Academy for Overseas Sciences United Nations Brussels. – 2006. – P. 55–74.
4. *Herrmann L. The importance of source region identification and their properties for soil-derived dust: the case of Harmattan dust sources for eastern West Africa* / L. Herrmann, K. Stahr, R. Jahn // Contributions to Atmospheric Phys. – 1999. – 72, N 2. – P. 141–150.
5. *Ellwood J. M. Small scale Aeolian bedforms* / J. M. Ellwood, P. D. Evans, I. G. Wilson // J. Sed. Petrol. – 45, Iss. 2. – 1975. – P. 554–561.
6. *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. – P. 106901 (72 p.)
7. *Williams K. K. Laboratory and field measurements of the modification of radar backscatter by sand* / K. K. Williams, R. Greeley // Remote Sensing of Environment. – 2004. – 89. – P. 29–40.
8. *Архивные данные метеосайта* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wetter3.de/Archiv/index.html>. – Загл. с экрана.
9. *Kok J. F. Electrostatics in wind-blown sand* / J. F. Kok and N. O. Renno // [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://arxiv.org/pdf/0711.1341](http://arxiv.org/pdf/0711.1341). – Загл. с экрана.
10. *Lämmel M. A two-species continuum model for aeolian sand transport* / M. Lämmel, D. Rings and K. Kroy // New J. of Phys. – 2012. – 14. – P. 093037 (24 p.)
11. *Midair collisions enhance saltation* / M. V. Carneiro, N. A. M. Araújo, T. Pühtz, H. J. Herrmann // [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [arxiv:1212.4603v2 \[physics.ao-ph\]](http://arxiv.org/abs/1212.4603v2). – Загл. с экрана.
12. *Anderson R. S. Wind modification and bed response during saltation of sand in air* Acta Mechanica / R. S. Anderson, P. K. Durham // Mechanics. – 1991. – 1. – P. 21–54.
13. *Lämmel M. Analytical mesoscale modeling of aeolian sand transport* / M. Lämmel, A. Meiwald, K. Kroy // [Электрон. ре-

- сурс]. – Режим доступа: [arxiv.org/pdf/1405.0624](http://arxiv.org/pdf/1405.0624). – Загл. с экрана.
14. Namikas S. L. Field measurement and numerical modelling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach / S. L. Namikas // *Sedimentology*. – 2003. – 50, Iss. 2. – P. 303–326.
  15. Aeolian sand transport: Length and height distributions of salt / T. D. Ho, A. Valance, P. Dupont, A. Ould // *Aeolian Res.* – 2014. – 12. – P. 65–74.
  16. 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.

*Рукопись поступила 09.11.2015.*

V. K. Ivanov, A. Ya. Matveev,  
V. N. Tsymbal, S. Ye. Yatsevich, D. M. Bychkov

#### RADAR TECHNIQUES FOR IDENTIFICATION OF DESERT REGIONS – THE SOURCES OF DUST IN THE ATMOSPHERE

Atmospheric dust is a mixture of minute particles of various salts and minerals; it also contains the remains of plants and animals, spores of pathogenic microbes, etc. The winds carry the dust over long distances, and its presence in the atmosphere is one of the factors that significantly affect the planet's climate. Currently, for space monitoring of aeolian processes and their consequences only multispectral optical systems are used (*TOMS*, *METEOSAT*, *MODIS*, etc.); they cannot identify the areas which are the sources of raising dust in the atmosphere regardless of clouds, brightness and transparency of the atmosphere. This problem can be solved by the space remote sensing radar systems. The article presents the first results of processing the method of radar identification of desert areas in which under the influence of aeolian processes the process of raising dust from the surface to the atmosphere takes place. The testing was performed using the data of radar remote sensing of Mauritania deserts of *SAR Envisat-1*. The peculiarities of manifestation of focused backscattering of radio waves in radar images at different speeds of surface wind, surface radar radiation and wind directions were analyzed. It is concluded that applying the radar remote sensing to identify areas raising dust in the atmosphere is effective. The results of the study allow to create new methods of remote monitoring of processes in desert areas, affecting 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, electric field.

В. К. Иванов, О. Я. Матвеев, В. М. Цимбал,  
С. Є. Яцевич, Д. М. Бичков

#### ІДЕНТИФІКАЦІЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИМ МЕТОДОМ ПУСТЕЛЬНИХ ОБЛАСТЕЙ – ДЖЕРЕЛ НАСИЧЕННЯ ПИЛОМ АТМОСФЕРИ

Атмосферний пил представляє собою суміш маленьких часток різноманітних солей, мінералів, він містить також рештки рослинних і тваринних організмів, спори хвороботворюючих мікробів та ін. Вітрами пил переноситься на значні відстані, і його присутність в атмосфері є одним з факторів, що суттєво впливають на клімат планети. На цей час для космічного моніторингу еолових процесів та їх наслідків використовуються тільки багатозональні оптичні системи (*TOMS*, *METEOSAT*, *MODIS* та інші), які не дозволяють надійно та незалежно від хмарності, освітлення та прозорості атмосфери ідентифікувати самі райони джерела підняття пилу в атмосферу і спостерігати за динамікою еолових процесів. Таке завдання дозволяють вирішувати космічні радіолокаційні системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У статті наведено перші результати відпрацювання радіолокаційного методу ідентифікації пустельних районів, в яких під впливом еолових процесів відбувається підйом пилу з поверхні в атмосферу. Відпрацювання проводилося з використанням даних радіолокаційного ДЗЗ пустель Мавританії *SAR Envisat-1*. Проаналізовано особливості проявів вузькоспрямованого зворотного розсіювання радіохвиль на радіолокаційному зображенні при різних швидкостях приповерхневого вітру, напрямках радіолокаційного опромінення поверхні та вітру. Зроблено висновок про ефективність використання радіолокаційних засобів дистанційного зондування для виявлення районів підняття пилу в атмосферу. Результати дослідження дозволяють створювати нові методи дистанційного моніторингу процесів у пустельних районах, які впливають на клімат великих регіонів Землі.

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