

## Технологии и средства механизации

УДК 502/504:631.311.5

**Ю. Г. РЕВИН**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ РИСОВОГО ЧЕКА

*Приведены характеристики микронеровностей рисовых чеков как совокупности случайных относительных высот их поверхности. Сформулированы критерии оценки распределения микронеровностей по поверхности рисовых чеков, представлены формулы для определения функций корреляционной и спектральной поверхностей.*

*Микронеровности поверхности, корреляционная характеристика, спектральная плотность.*

*There are given characteristics of rice checks micro-roughness as sets of random relative heights of their surface. There are formulated the assessment criteria of micro-roughness distribution on the rice checks surface, formulas are presented for determination of functions of correlation and spectral surfaces.*

*Micro-roughness of the surface, correlation characteristics, spectral density.*

Практика планировки поверхности рисовых чеков для получения ровной поверхности свидетельствует о том, что технологии и технические средства выравнивания еще далеки от совершенства. Одной из причин такого положения является отсутствие точной и полномасштабной информации о микронеровностях поверхности чеков. Наиболее объемной и точной основой оценки этих неровностей можно считать систему, базирующуюся на представлении поверх-

ности в виде комплекса высотных отметок как случайных величин, объединенных в один массив данных. Тогда по аналогии с понятием «случайная функция» поверхность чека можно представить как «случайную поверхность». Осуществив статистическую обработку высотных отметок поверхности поля как набора случайных чисел, можно сформировать системные сведения о неровностях, их структуре и количественных характеристиках.

Характеристики микрорельефа рисовых чеков отражают значительное разнообразие структур и параметров неровностей. В каждом конкретном случае желательно использовать соответствующие модифицированные технологии планирующих машин.

При планировке поверхности чеков, используя типизированные технологии и стандартные средства механизации, не учитывают особенности неровностей. Для эффективного выполнения планировки поверхностей чеков необходимо иметь информацию о самых значимых параметрах неровностей – их

длине и амплитуде. Эти параметры случайны, причем если длина (или по аналогии с колебательными процессами – период) мало изменчива, то отклонения неровностей по высоте можно считать довольно разбросанными. Для целесообразной и обоснованной оценки этих параметров могут быть использованы методы теории случайных функций.

В табл. 1 в качестве примера приведена матрица  $Z$ , членами которой являются относительные высотные отметки микронеровностей поверхности чека, зафиксированные в центрах квадратов размером  $20 \times 20 \text{ м}^2$ .

Таблица 1

**Матрица, представляющая поверхность в виде совокупности относительных высотных отметок**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	-9,2	-1,7	0	-1,2	5,3	3,3	4,3	0	1,3	-5,2	1,8	-4,2	2,8	1,8	5,3	3,8	11
1	-20	-4,2	-1,2	2,3	3,8	3,8	5,8	1,3	0	0	1,3	1,3	-1,2	3,8	6,8	4,8	3,8
2	-18	-6,7	-7,7	-8,7	-4,7	-1,7	3,3	2,3	1,8	0	0	0	1,3	4,8	8,3	3,8	5,8
3	-12	-6,2	-7,2	-3,7	-4,7	1,3	3,8	6,8	5,8	5,3	2,3	5,8	3,8	7,3	9,3	8,8	4,3
4	-13	-5,7	-2,7	-6,2	-3,7	-2,2	2,8	5,3	7,8	3,8	4,3	2,8	5,8	4,8	9,3	4,3	3,3
5	-6,7	-7,2	-11	-8,7	-7,2	-9,2	-4,2	0	0	1,8	1,3	0	-1,2	0	1,8	0	3,8
6	-8,2	-8,2	-13	-9,2	-10	-4,7	-6,2	1,8	0	2,3	2,3	0	1,3	4,3	3,3	2,3	1,8
7	-8,7	-1,7	-8,2	-2,7	-4,2	-2,2	-2,7	2,8	3,3	3,8	1,8	6,3	5,3	5,8	8,3	8,3	1,8

Поверхность, относительно которой даны отметки, является горизонтальной плоскостью, соответствующей отметке нулевых работ.

На рис. 1 приведено графическое изображение поверхности рисового чека, построенное по данным матрицы  $Z$  (размером  $n_1 \cdot n_2$ ). На основании приведенных данных можно сформировать первичные представления о структурах исходных поверхностей. Очевидно, что значения микронеровностей в значительной степени разнятся по величине и случайным образом распределены по поверхности чека. Однако такие оценки структуры и параметров неровностей дают довольно мало конкретной информации в цифровом формате, необходимом для решения конкретных задач эффективной организации планировочных работ.

К очень важным характеристикам, позволяющим оценить параметры слу-

чайных поверхностей, следует отнести корреляционную характеристику, которую можно назвать, по аналогии с подобной характеристикой для продольных или поперечных профилей сельскохозяйственных полей, корреляционной поверхностью  $K(r, p)$ .

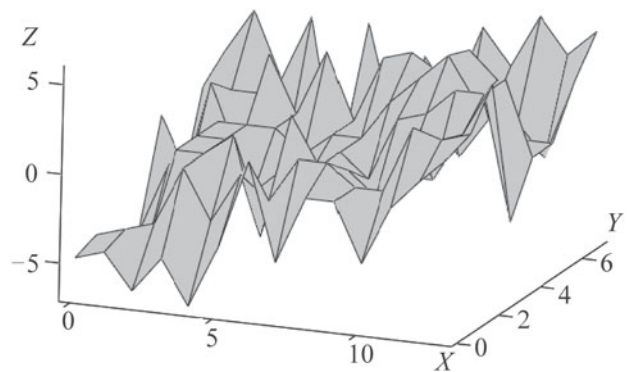


Рис. 1. Поверхность рисового чека, представленная в трехмерном изображении. На осях  $OX$ ,  $OY$  отложены номера единичных квадратов ( $20 \times 20 \text{ м}^2$ ), из вершин которых (по оси  $OZ$ ) отложены микронеровности поверхности

Эмпирическая корреляционная поверхность может быть оценена по формуле

$$K(r, p) = \frac{\sum_{i=0}^{n_1-r-1} \sum_{j=0}^{n_2-p-1} Z_{i,j} Z_{i+r, j+p}}{n_1 n_2 D}, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  – число строк и столбцов матрицы  $Z$  соответственно;  $r, p$  – смещение отсчетов при определении корреляционной поверхности по строкам и столбцам соответственно;  $D$  – дисперсия высотных неровностей чека, представленного матрицей  $Z$ .

На рис. 2 приведен график типичной эмпирической корреляционной поверхности, построенной по данным матрицы  $Z$ . Анализ графиков корреляционных поверхностей, безусловно, позволяет более определенно судить о так называемом волновом составе микронеровностей. Особенно такая определенность появляется после осуществления аппроксимации эмпирической корреляционной поверхности.

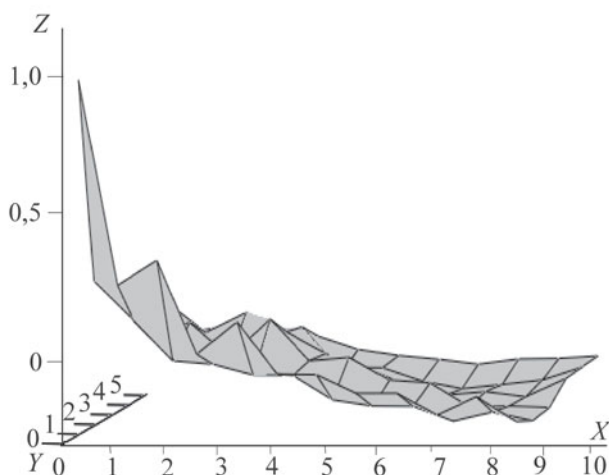


Рис. 2. График типичной эмпирической корреляционной поверхности рисового чека. На осях  $OX, OY$  отложены номера единичных квадратов ( $20 \times 20 \text{ м}^2$ ), на оси  $OZ$  отложена функция корреляционной поверхности в безразмерном виде

Более точные данные о параметрах микронеровностей можно получить при помощи дополнительной математической статистики – спектральной плотности поверхности. Спектральная плотность микрорельефа поверхности чека как случайной поверхности может быть рассчитана по формуле

$$S(\omega_x, \omega_y) = \frac{4\Delta}{\pi^2} \sum_{x=0}^{n_3-1} \sum_{y=0}^{n_4-1} K_{x,y} \left(1 - \frac{x}{n_3-1}\right) \times \left(1 - \frac{y}{n_4-1}\right) \cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y), \quad (2)$$

где  $n_3$  и  $n_4$  – число строк и столбцов соответственно матрицы корреляционной поверхности микрорельефа чека;  $K_{x,y}$  – эмпирическая корреляционная поверхность чека;  $\omega_x, \omega_y$  – волновые частоты неровностей по осям  $X$  и  $Y$  соответственно,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\Delta$  – шаг отсчета при определении спектральной плотности (шаг отсчета равен длине стороны квадратной сетки, используемой при съемке высотных координат неровностей поверхности рисового чека,  $\Delta = 20 \text{ м}$ ).

На рис. 3 приведен график спектральной плотности чека, построенный в соответствии с формулой (2).

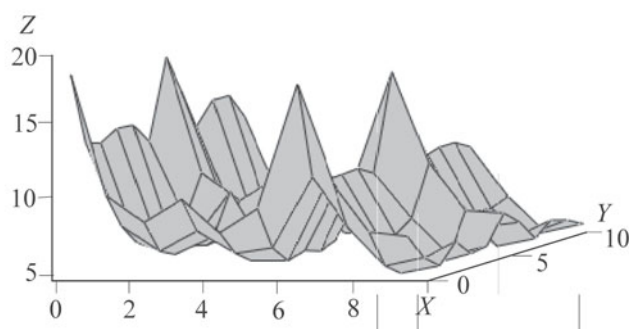


Рис. 3. График типичной эмпирической спектральной плотности чека. На осях  $OX, OY$  отложены номера единичных квадратов ( $20 \times 20 \text{ м}^2$ ), на оси  $OZ$  отложена функция спектральной плотности,  $\text{см}^2/\text{м}^2$

По оси  $X$  (число отсчетов от 0 до 13) и по оси  $Y$  (число отсчетов от 0 до 6) откладываются номера квадратов, кратные шагу  $D$ . Пики графика дают возможность сделать вывод, причем вывод совершенно определенный, о большем или меньшем процентном составе (критерий – значение дисперсии амплитуд) неровностей по длине. При этом длину неровностей, в соответствии с упомянутыми пиками спектральной плотности, можно оценить по следующим формулам:

$$T_x = \frac{2\pi\Delta}{X_i}, T_y = \frac{2\pi\Delta}{Y_j}, \quad (3)$$

где  $T_x, T_y$  – длины неровностей по оси  $X$  (это, как правило, по длинной стороне чека) и по оси  $Y$  (как правило, по короткой стороне чека) соответственно,  $\text{м}$ ;  $X_i, Y_j$  – значения координат спектральной плотности, соответствующие ее пикам по оси  $X$  или  $Y$  соответственно.

Доля дисперсии, приходящейся на какую-либо конкретную по длине

неровность  $DT_{i,j}$ , может быть подсчитана по формуле

$$DT_{i,j} = \frac{2}{\pi} \sum_{x_i - \Delta x}^{x_i + \Delta x} \sum_{y_j - \Delta y}^{y_j + \Delta y} S_{x,y}, \quad (4)$$

где  $2\Delta X, 2\Delta Y$  – диапазоны полосы пропускания для соответствующего пика спектральной плотности поверхности чека (обычно  $\Delta X = \Delta Y \cong 1$ );  $S_{x,y}$  – матрица спектральной плотности.

Приведенные зависимости предоставляют довольно основательную возможность детальной оценки структуры и количественных характеристик микронеровностей поверхности рисовых чеков. Общие результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Сводная таблица полученных данных по результатам нивелирования поверхностей рисовых чеков**

Средние квадратические отклонения, см	Процент от общего числа обработанной информации	Относительная высота неровностей, см		Средний удельный объем работ при выравнивании поверхности чека, м <sup>3</sup> /га	Средняя площадь чека, га
		Минимальная	Максимальная		
≤ 3	8,7	9,1	-11	85,12	4,0
≥ 3...≤ 5	65,0	24,0	-19	140,32	4,5
≥ 5	26,2	22,0	-20	251,85	4,6

Полученные данные были разделены на три группы по величине среднеквадратического отклонения (СКО). Первая группа – со значением СКО до 3 см, вторая – при значении СКО от 3 до 5 см, третья – при СКО более 5 см.

По результатам анализа было установлено, что среднеквадратическое отклонение неровностей 65 % рисовых чеков находится в диапазоне 3...5 см. На таких чеках целесообразнее всего производить сплошное выравнивание поверхности при помощи мелиоративных планировщиков. Возможно также осуществление выборочного планирования поверхности (например, с использованием скреперов).

Поверхность чеков, имеющих значение среднеквадратичных неровностей менее 3 см, лучше всего выравнивать, выполняя сплошную планировку.

Что касается рисовых чеков со значительными неровностями (КСО > 5 см), то в этом случае наиболее эффективным будет применение выборочного выравнивания поверхности (т.е. при помощи скреперов).

Таким образом, сведения, которые получены по итогам обследования рисовых чеков, могут во многом определять конкретные действия по восста-

новлению их ровности. Однако эти данные не дают ясного представления о том, каким образом распределяются участки поверхности чека с недостаточной ровностью по всей площади. Такая информация может стать основой для выработки концепции планирующей машины, в наибольшей степени отвечающей потребностям производства. Например, отношение удаленностей поверхности чеков, требующих срезки и подсыпки, от какой-либо одной точки. Этот показатель можно определить так:

$$K_{от.уд} = \frac{L_1}{L_2}, \quad (5)$$

где  $L_1$  – средневзвешенная удаленность транспортировки грунта, который необходимо срезать;  $L_2$  – средневзвешенная удаленность перемещения грунта, который необходимо подсыпать в нужные места.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, свидетельствует о том, что использование коэффициента  $K_{от.уд}$  позволяет оценить степень равномерности распределения участков, требующих выравнивания, по площади чека. В последнем столбце таблицы приведены значения указанных коэффициентов для шести чеков, характеризующихся разными среднеквадратическими отклонениями и коэффициентами дефектности.

Значения коэффициента  $K_{от.уд}$

можно интерпретировать следующим образом: при величине  $K_{от. уд} \approx 1$  дефектные участки распределены по площади чека равномерно, что объективно отвечает целесообразности сплошного выравнивания поверхности, т. е. требует использования мелиоративного планировщика с рабочим органом в виде бездонного ковша.

При значительной неравномерности распределения дефектных участков на площади чека, например  $K_{от. уд} \approx 0,5$  и меньше, целесообразно использовать скрепер, позволяющий перевозить

грунт в закрытом ковше, т.е. на колесах, в виде призмы волочения (расстояние более 50...100 м).

Использование аппарата случайных функций применительно к анализу случайной поверхности позволяет представить анализируемую поверхность в виде трехмерного графического изображения структуры неровностей поля в целом. Однако количественный анализ закономерностей изменения высотных отметок микронеровностей по графику такого рода довольно затруднителен.

Таблица 3

**Выборка данных по степени дефектности чеков и оценке распределения дефектных участков по площади чека**

№№	Среднеквадратическое отклонение микронеровностей $\sigma$ , см	Коэффициент дефектности поверхности рисового чека, $K_d^*$	Средняя толщина срезаемого грунта, см	Средняя толщина насыпаемого грунта, см	Объем работ по срезке, м <sup>3</sup>	Объем работ по насыпи, м <sup>3</sup>	Коэффициент соотношения удаленности дефектных участков чека по срезке и насыпи, $K_{от.уд}/K_{от.уд}^{-1}$
832	5,74	0,61	5	8	1015	1143	0,39/2,57
851	5,28	0,59	7	5	1071	1127	1,08/0,93
881	3,63	0,37	5	6	400	560	0,72/1,39
882	3,25	0,37	5	5	456	418	0,84/1,19
931	3,08	0,34	4	5	422	423	0,78/1,28
941	3,21	0,38	4	5	401	392	2,82/0,36

\*Коэффициент дефектности поля:  $K_d = S_d/S$ , где  $S_d$  – дефектная площадь;  $S$  – вся площадь чека.

Применение для анализа неровностей поверхности спектральных плотностей позволяет более точно и конкретно оценить распределение неровностей

по их длинам. В табл. 4 приведены обобщенные сведения о неровностях по данным спектральных плотностей 20-ти чеков.

Таблица 4

**Обобщение статистических данных по неровностям поверхностей чеков по направлению их длинной стороны**

Дисперсия неровностей $D$ , см <sup>2</sup>	Доля дисперсии, приходящаяся на неровности длиной			
	более 120 м	около 40 м	около 20 м	около 10 м
10...35	18...30 %	14...30 %	24...40 %	14...32 %

Как показал анализ, большинство чеков имеет в плане форму прямоугольника с соотношением сторон примерно 2:1. В табл. 4 приведены данные о распределении дисперсии микронеровностей в направлении длинной стороны чека. Средние величины процент-

ного соотношения неровностей с разными длинами получаются следующими: доля дисперсии высотных неровностей, приходящаяся на длины 120 м и более, равна 24 %, для неровностей с длинами около 40 м – 22 %, для неровностей с длинами около 20 м –

31 %, для неровностей с длинами около 10 м – 23 %.

По всей видимости, при выполнении сельскохозяйственных работ машины передвигаются в большинстве случаев вдоль длинной стороны чека что приводит к закономерному и довольно устойчивому по структуре изменению микрорельефа вдоль именно этой стороны.

С целью аналитической оценки микронеровностей поверхности рисовых чеков была предпринята попытка аппроксимации эмпирической корреляционной поверхности для конкретного рисового чека, в результате которой была получена следующая формула:

$$K(x, y) = 0,5e^{-0,7x}e^{-0,7y} + 0,3e^{-0,2x}\cos(3x)\cos(3y) + 0,2e^{-2x}\cos(0,3x)\cos(0,3y). \quad (6)$$

где  $K(x, y)$  – обозначение корреляционной поверхности в виде аналитической зависимости;  $e$  – основание натурального логарифма;  $x$  и  $y$  – текущие значения координат по осям  $OX$  и  $OY$ .

После интегрального преобразования Фурье выражения (6) в соответствии с процедурой (2) можно получить спектральную плотность поверхности чека, исходя из аналитического описания корреляционной поверхности.

График спектральной поверхности представлен на рис. 4.

Этот график отличается от подобного на рис. 3 тем, что он более рельефно и более точно показывает то, как распределяется дисперсия высотных неровностей поверхности чека по их длинам. В целом результаты, полученные после обработки эмпирических данных по микронеровностям, соответствуют аналогичным данным по распределению неровностей после расчетов с использованием аппроксимированной корреляционной поверхности.

Главным преимуществом использования аппроксимированных выражений при дальнейших интегральных преобразованиях может быть возможность получения результатов в виде графических характеристик с добавкой

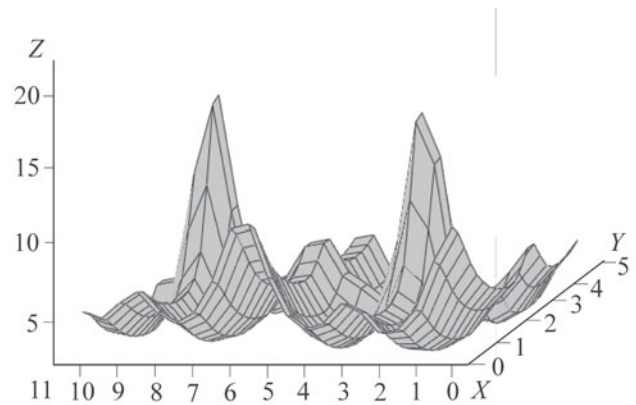


Рис. 4. Спектральная плотность поверхности рисового чека, полученная с использованием косинус-преобразования Фурье после аппроксимации корреляционной поверхности аналитическим выражением (6). Легенда та же, что и на рис. 3

данных по нелинейной интерполяции между узлами исходной информации.

#### Выводы

Сформулирована методическая основа для представления поверхности рисовых чеков в виде трехмерной статистической модели.

Предложена методика оценки распределения по площади чека значений неровностей как по длине, так и по высоте.

Представлены результаты аналитического описания корреляционной поверхности рисового чека.

1. **Ефремов А. Н.** Комплексная автоматизированная технология планировки рисовых чеков. – М.: Издательство ФГНУ ЦНТИ Мелиоводинформ, 2002. – 66 с.

2. **Ревин Ю. Г.** Трехмерное представление выравнивания территорий специальными машинами // Горный информационно-аналитический бюллетень Московского горного университета. – 2010. – № 2. – 2 с.

Материал поступил в редакцию 23.03.10.

**Ревин Юрий Григорьевич**, кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой «Мелиоративные и строительные машины»

Тел. 8 (495) 976-22-15

E-mail: jrevin@km.ru