

УДК 504.064.2:502.2.08:551.4.044:528.854.2:519.876.5

**ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РУСЛА МАЛОЙ РЕКИ ИРОВКА****Мазуркин П.М., Георгиева Я.О.***Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола,  
e-mail: kaf\_po@mail.ru, yanageorgieva2017@yandex.ru*

Местная широта образуется на Север – Юг с началом по характерным 290 точкам в истоке реки Ировка, сама река находится в прямоугольнике 23.89 минут длиной (по широте) и 18.89 минут шириной (по долготе). Начальной точке в истоке реки дается нулевой ранг. Цель статьи – анализ асимметричных вейвлетов изменения одной координаты – приведенной к реке Ировка местной широты от истока до устья. После идентификации универсального волнового уравнения были получены 25 членов в виде асимметричных вейвлетов с переменными амплитудой и периодом колебания. Все 25 вейвлетов являются конечномерными, то есть каждый из них имеет начало и конец колебательной адаптации к изменениям структуры рельефа русла. При этом значительная часть колебаний происходит внутри малой реки Ировка общей длиной 69 км. Первые три члена вместе дали коэффициент корреляции 0,9099. Это уровень адекватности более 0,9 и общее трехчленное уравнение относится к сильнейшей факторной связи. Остальные 22 члена повышают дальше уровень адекватности почти до коэффициента корреляции 1. Анализ показал, что местная широта малой реки Ировка по измерениям на космических снимках дает высокую определенность квантования рельефа. Остатки от 25-го члена дали высокую погрешность моделирования в истоке реки и при первом ранге точки. Летом происходит пересыхание русла в верховье реки. Погрешности по характерным точкам русла распределились так: 0–0,1% 95 шт. (32,76%); 0–1,0% 262 шт. (90,34%); от 0 до 5% 283 характерные точки русла, что составляет 97,59% от общего количества 290 точек.

**Ключевые слова:** малая река, космический снимок, русло, точки, широта, распределение, вейвлеты**WAVELET ANALYSIS OF LATITUDE DISTRIBUTION AT CHARACTERISTIC POINTS OF THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE CHANNEL OF THE SMALL RIVER IROVKA****Mazurkin P.M., Georgieva Ya.O.***Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola,  
e-mail: kaf\_po@mail.ru, yanageorgieva2017@yandex.ru*

Local latitude is formed in the North-South with the beginning at characteristic 290 points at the source of the Irka River, the river itself is in a rectangle 23.89 minutes long (in latitude) and 18.89 minutes wide (in longitude). The starting point at the source of the river is given a zero rank. The purpose of the article is the analysis of asymmetric wavelets of changing one coordinate – local latitude reduced to the Irovka River from source to mouth. After identifying the universal wave equation, 25 terms were obtained in the form of asymmetric wavelets with variable amplitude and period of oscillation. All 25 wavelets are finite-dimensional, that is, each of them has a beginning and an end to oscillatory adaptation to changes in the structure of the channel topography. Moreover, a significant part of the oscillations occurs inside the small river Irovka with a total length of 69 km. The first three members together gave a correlation coefficient of 0.9099. This level of adequacy is more than 0.9 and the general three-term equation refers to the strongest factorial connection. The remaining 22 members further increase the level of adequacy almost to a correlation coefficient of 1. Analysis showed that the local latitude of the small river Irovka, as measured by satellite imagery, gives a high degree of certainty to quantization of the relief. Residues from the 25th term gave a high modeling error at the source of the river and at the first rank of the point. In summer, the riverbed dries upstream. Errors according to characteristic points of the channel were distributed as follows: 0 – 0.1% 95 pcs. (32.76%); 0–1.0% 262 pcs. (90.34%); from 0 to 5% 283 characteristic points of the channel, which is 97.59% of the total number of 290 points.

**Keywords:** small river, satellite image, channel, points, latitude, distribution, wavelets

Изображения, передаваемые спутниками дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находят применение во многих отраслях – сельском хозяйстве, геологических и гидрологических исследованиях, лесоводстве, охране окружающей среды, планировке территорий, образовательных, разведывательных и других целях. Космические системы ДЗЗ позволяют за короткое время получить необходимые данные с больших площадей (в том числе труднодоступных и опасных участков). Одним из возможных

путей анализа ДЗЗ является использование подходов математической морфологии ландшафтов – направления ландшафтоведения, изучающего закономерности построения мозаик, которые образованы на земной поверхности, и разрабатывающего методы математического анализа этих мозаик [1].

До настоящего времени не существует единого обоснованного выбора вида функции. При эволюции склона должны меняться скорость смыва и осаждения материала в разных точках профиля. Это обуславлива-

ет саморазвитие склоновых систем за счет обратной связи, когда зависящий от уклона коэффициент диффузии ответствен за саму форму профиля [2].

По инструкции [3] при клике на карту открывается информационное окно, показывающее координаты, включая широту, указанной характерной точки русла реки. Нами предлагается выбирать характерные точки от истока до устья по резким изменениям кривизны в горизонтальной плоскости и после проведения измерений составить таблицу исходных данных для последующего моделирования методом идентификации устойчивых закономерностей [4].

Цель – подробный анализ асимметричных вейвлетов изменения одной координаты – приведенной к р. Ировка широты от истока до устья. При этом количество вейвлетов показывает уровень естественности рельефа территории: чем больше выявляемых волн, тем меньше происходило антропогенное влияние на изменение ландшафта малой реки.

#### Материалы и методы исследования

Малая река Ировка характеризуется сопряженным чередованием озеровидных расширений в семи местах от истока до устья и соединяющих их узких протоков. Этот весьма распространенный тип относится к четковидным извилистым руслам, анализ строения которых и моделирования структурных параметров может внести некоторую ясность в развитие представлений о механизмах формирования русла [5].

Для междуречий р. Большой, Малой Кокшаги и Илети на территории Республи-

ки Марий Эл характерно умеренное овражное расчленение (0,02–0,05). На территории средняя лесистость составляет 34%, распаханность – 51%, крутизна склонов равна около 2,5°, глубина местных базисов эрозии – 103 м. Отсутствие оврагов наблюдается в более четверти всех бассейнов рек залесенных и расположенных в подзоне южной тайги в Марийском Полесье [6].

В табл. 1 даны результаты измерений по выпискам из всплывающего окна при нажатии курсором на выбранную точку. По течению реки от истока до устья устанавливается ось абсцисс, начиная от нуля в точке истока. В этом случае местная широта образуется в направлении Север – Юг с началом в истоке реки Ировка, которая находится в прямоугольнике 23.89 минут длиной и 18.89 минут шириной.

Колебания (вейвлет-сигналы) записываются волновой формулой [7] вида

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}),$$

$$A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}),$$

$$p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \quad (*)$$

где  $y$  – показатель (зависимый фактор),  $i$  – номер составляющей (\*),  $m$  – количество членов в (\*),  $x$  – объясняющая переменная (влияющий фактор),  $a_1 \dots a_8$  – параметры (\*), принимающие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентификации в среде CurveExpert-1.40,  $A_i$  – амплитуда (половина) вейвлета (ось  $y$ ),  $p_i$  – полупериод колебания (ось  $x$ ).

Таблица 1

Ранговые распределения характерных точек и изменения местной широты продольного профиля русла малой реки Ировка

Ранг $R_\alpha$	Северная широта	Север – Юг $\alpha$ , минута	Расчетные значения		
			$\alpha$ , минута	$\varepsilon_{25}$ , минута	$\Delta$ , %
0	N56°44.75'	0	0.000	0	$\infty$
1	N56°44.73'	0.02	-0.029	-0.0493628	-246.81
2	N56°44.56'	0.19	0.231	0.0407685	21.46
3	N56°44.55'	0.20	0.167	-0.0326814	-16.34
4	N56°44.48'	0.27	0.200	-0.0698822	-25.88
...	...	...	...	...	...
285	N56°20.96'	23.79	23.779	-0.0107833	-0.05
286	N56°20.92'	23.83	23.809	-0.021413	-0.09
287	N56°20.91'	23.84	23.823	-0.017154	-0.07
288	N56°20.88'	23.87	23.865	-0.0053683	-0.02
289	N56°20.86'	23.89	23.897	0.00741297	0.03

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Характерные точки выбирали визуально относительно быстро. Повышается наглядность под углом 90° космического снимка [3]. На снимке хорошо видна растительность и другие объекты, например строения и огороды вдоль русла реки.

На спутниковых снимках измерения отличаются оперативностью и возможностью быстрого измерения координат любой принятой точки, при этом измерения происходят с очень малой трудоемкостью. Из-за трудностей векторизации в сравнении с спутниковыми снимками [3] ГИС Панорама 11 имеет высокую трудоемкость.

После идентификации формулы (1) было получено 25 вейвлетов (табл. 2, рис. 1–4).

Остатки от 25-го колебания дали высокую погрешность моделирования в истоке реки (из-за начала координаты широты) и при первом ранге характерной точки (табл. 1). Почти до четвертого ранга летом происходит пересыхание русла малой реки Ировка. По интервалам погрешности распределались следующим образом: 0–0,1% всего 95 шт. (32,76%); 0–1,0% всего 262 шт. (90,34%); от 0 до 5% всего 283 характерные точки русла малой реки Ировка, что составляет 97,59% от общего количества 290 ха-

рактерных точек. Норму погрешности измерений и моделирования примем до 5%, тогда оставшиеся 290 – 283 = 7 характерных точек русла требуют отдельного рассмотрения.

Первые три вейвлета дали по возможностям программной среды CurveExpert-1.40 коэффициент корреляции 0.9099, а последующие члены получены по отдельности. Первый член является биотехническим законом [6], и он показывает часть большей волны с периодом колебания, намного большим длины малой реки Ировка. Первое колебание показывает снижение, а второе – повышение амплитуды. Остальные вейвлеты имеют свой характер.

Таким образом, географическая широта вдоль малой реки изменяется волнообразно, на что, конечно же, влияет колеблющееся расстояние между характерными точками вдоль стрежня малой реки. Причем характерные точки выбирались по резким изменениям кривизны русла. Река Ировка является простой по структуре: она имеет одно русло без островов и разветвлений. В связи с этим стрежень проходит вдоль самого русла малой реки. По-видимому, сложные структуры реки с островами и ответвлениями требуют выделения нескольких линий водотоков. Аналогичные рис. 2 графики получены для вейвлетов 10–15.

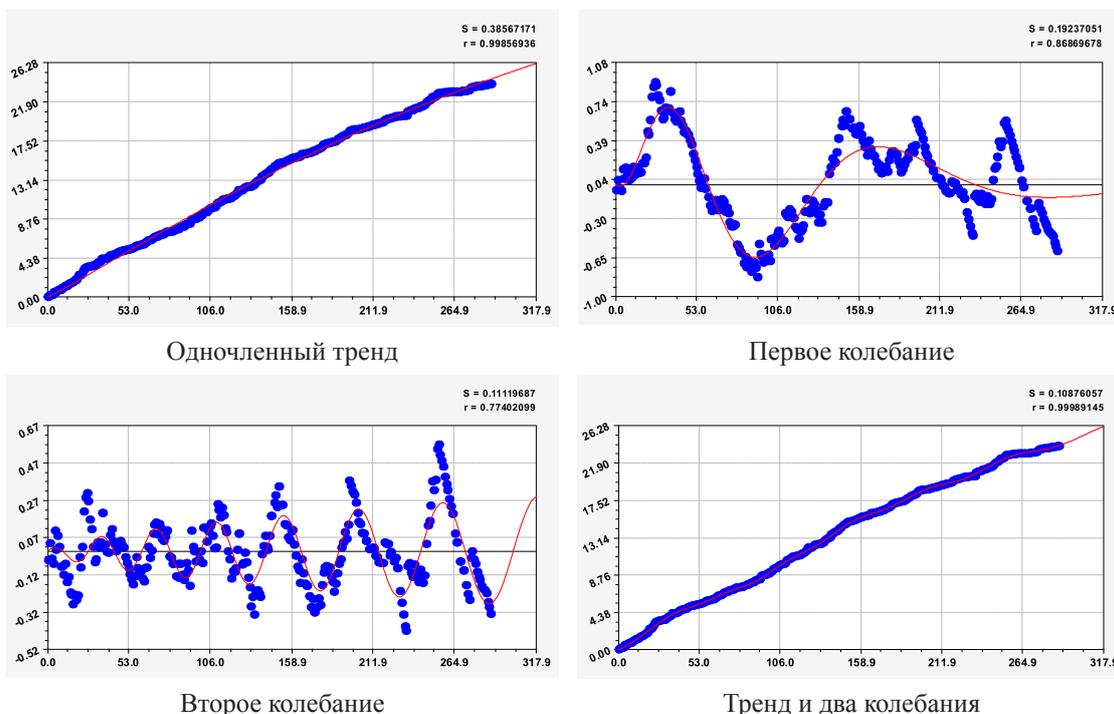


Рис. 1. Графики первых трех моделей рангового распределения широты реки Ировка

Таблица 2  
 Параметры моделей рангового распределения местной широты реки Ирровка

Номер $i$	Вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i}x^{a_{4i}}) \cos(\pi x / (a_{5i} + a_{6i}x^{a_{7i}}) - a_{8i})$											Коэф. кор. $r$	
	Амплитуда (половина) колебания					Полупериод колебания							Сдвиг $a_{8i}$
	$a_{1i}$	$a_{2i}$	$a_{3i}$	$a_{4i}$	$a_{5i}$	$a_{6i}$	$a_{7i}$						
1	0.063641	1.13065	0.0016008	1	0	0	0.58745	110.82755	0	1.80206	0	0	0.9999
2	0.00040393	3.51567	0.57696	0	0	0	0.58745	110.82755	-0.0022800	1.80206	0.15740	3.84747	
3	-0.0036181	0.79204	0	0	0	0	1.01535	8.84480	0.023405	1	0	0	0.3931
4	1.12528e-14	14.62515	0.617963	1.01535	0	0	1.01535	8.84480	0.247021	0	0	0	0.3931
5	0.00028646	1.02192	0	0	0	0	0	7.24585	0.0014330	1.1280	4.91773	0.3885	
6	6.60099e-28	18.34451	0.131461	1.15452	1.25931	0.0308397	1.15452	15.61082	0	1.09014	19.7736	0.2359	
7	5.75800e-82	38.2302	0.00700051	1.49880	15.61082	0	1.49880	15.61082	0	0	7.53893	0.5908	
8	2.44508e-7	13.87948	2.10384	0.904660	5.95729	0.872172	0.904660	5.95729	0.872172	1.13212	0.13929	0.1509	
9	9.57998e-43	21.51899	0.00423083	1.60704	2.76779	0.0212579	1.60704	2.76779	0.0212579	1.00668	8.56668	0.4394	
10	6.90749e-15	7.33887	0.0547866	0.999169	11.73840	0.0638034	0.999169	11.73840	0.0638034	0.999864	3.56826	0.1155	
11	4.93135e-7	2.66385	0.0119845	1.0067	6.61980	0.00112116	1.0067	6.61980	0.00112116	0.963002	0.36049	0.4689	
12	0.00040243	1.06255	0.0132666	0.976249	0.939751	0	0.976249	0.939751	0	0	4.50696	0.1544	
13	0.00256065	0.742944	0.0117076	0.999885	2.93349	6.91697e-5	0.999885	2.93349	6.91697e-5	0.905847	0.94684	0.2387	
14	2.14587e-8	6.29076	0.228905	0.999573	1.38802	0.00169327	0.999573	1.38802	0.00169327	1.00323	2.35141	0.1599	
15	8.25269e-17	9.78903	0.353983	0.758466	2.13155	1.69978	0.758466	2.13155	1.69978	0	0	0.2122	
16	2.99522e-8	6.69529	0.528126	0.805273	4.39546	0.0011770	0.805273	4.39546	0.0011770	1.37960	2.34904	0.2666	
17	1.00663e-7	3.18087	0.00075787	1.67431	5.61483	0	1.67431	5.61483	0	0	1.74651	0.3304	
18	6.76571e-32	20.03587	0.238810	0.999523	3.11307	0.0306280	0.999523	3.11307	0.0306280	1.00022	1.80334	0.2530	
19	1.91948e-12	4.19546	0	0	27.68004	0.0405511	0	27.68004	0.0405511	1.00147	1.69522	0.2020	
20	8.76625e-6	2.21622	0.122793	0.644558	4.76183	0	0.644558	4.76183	0	0	2.98586	0.3489	
21	1.07760e-5	1.39302	0	0	3.99424	1.32155	0	3.99424	1.32155	0	0	0.2527	
22	1.51462e-17	7.83412	0.0282323	1.02879	3.67720	0.288642	1.02879	3.67720	0.288642	0	0	0.2730	
23	1.49746e-27	13.20323	0.0599409	1.00062	5.53966	0.00166063	1.00062	5.53966	0.00166063	1.00596	3.56522	0.2418	
24	7.48490e-8	3.46675	0.0349280	0.997189	4.57673	0.00043153	0.997189	4.57673	0.00043153	1.06958	0.84619	0.2217	
25	1.83106e-12	5.41165	0.0312327	1.00042	6.87889	0.00224893	1.00042	6.87889	0.00224893	1.00474	1.86238	0.1262	

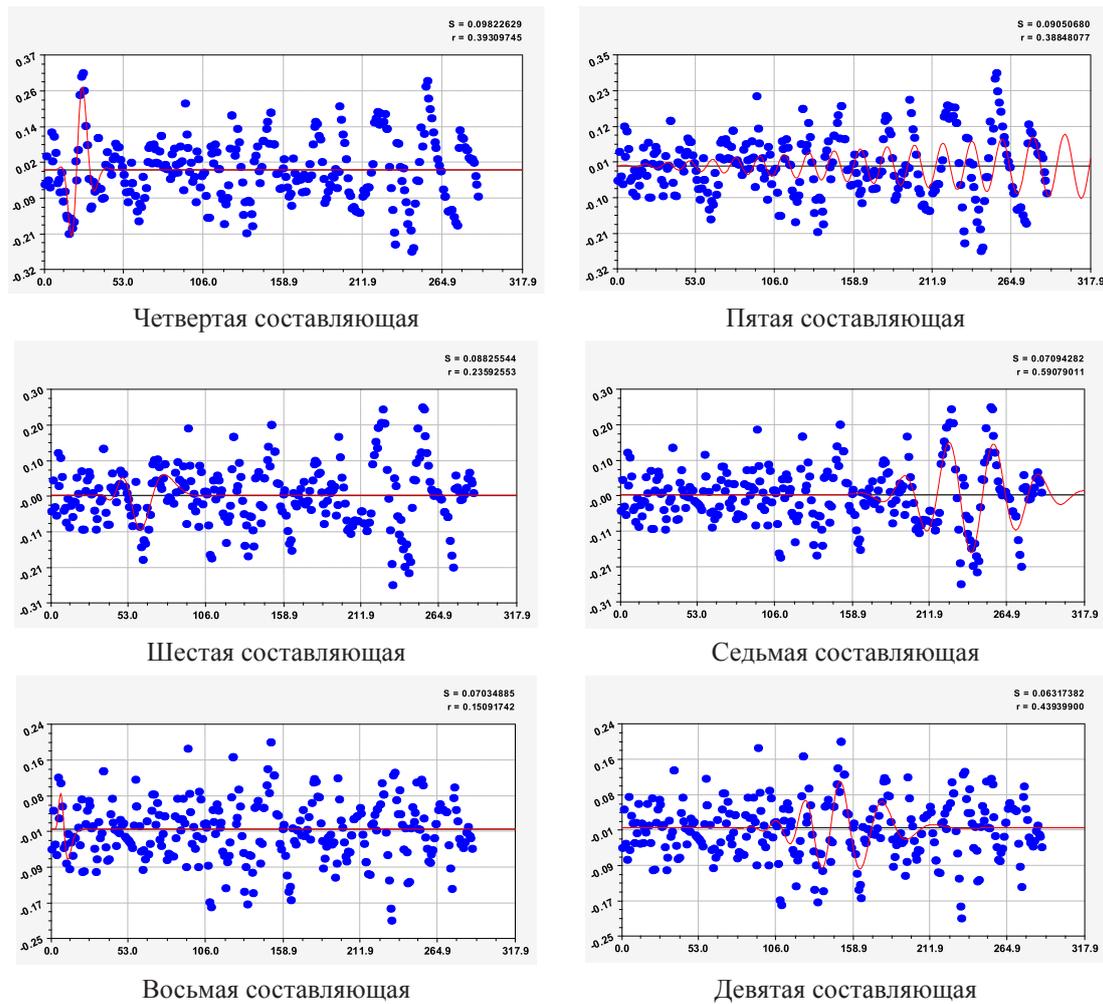


Рис. 2. Графики моделей рангового распределения широты реки Ировка (4 ... 9 составляющие)

На рис. 3 заметны несколько коротких по характерным точкам вейвлетов.

При этом 16-я составляющая общей модели (\*) находится почти около истока Ировки. Из-за обмеления многих малых рек, по-видимому, именно из-за этого резкого колебания географических координат (аналогично и по долготе) около истока реки появляются пересыхающие летом участки. 19-я составляющая показывает переход колебания широты после устья малой реки Ировка. Колебательная адаптация русла малой реки к рельефу местности происходит за долгое время. Для реки Ировка, судя по четковидной структуре, рельеф изменился в конце последнего оледенения примерно 12 тысяч лет назад. С тех пор колебания земной коры привели к сложной структуре изменения в рельефе местности, в частности широты характерных точек русла реки. На длине в 69 км реки Ировка имеются семь

озеровидных расширений и четыре притока. Поэтому бассейн р. Ировка на площади 917 км<sup>2</sup> получает еще большую сложность в колебательных изменениях географических координат.

На рис. 4 приведены графики колебаний широты по последним вейвлетам. Все они являются конечномерными колебаниями, находящимися внутри длины малой реки Ировка.

После 25-го члена (\*) процесс квантования вейвлетов сильно затрудняется. Поэтому условно можно принять, что он становится границей квантовой определенности для широты. Для продолжения квантования нужно повысить точность измерений. Во всяком случае, пока нет уверенности в том, что рельеф получает квантовую запутанность, как это происходит при моделировании асимметричными вейвлетами динамики метеорологических параметров.

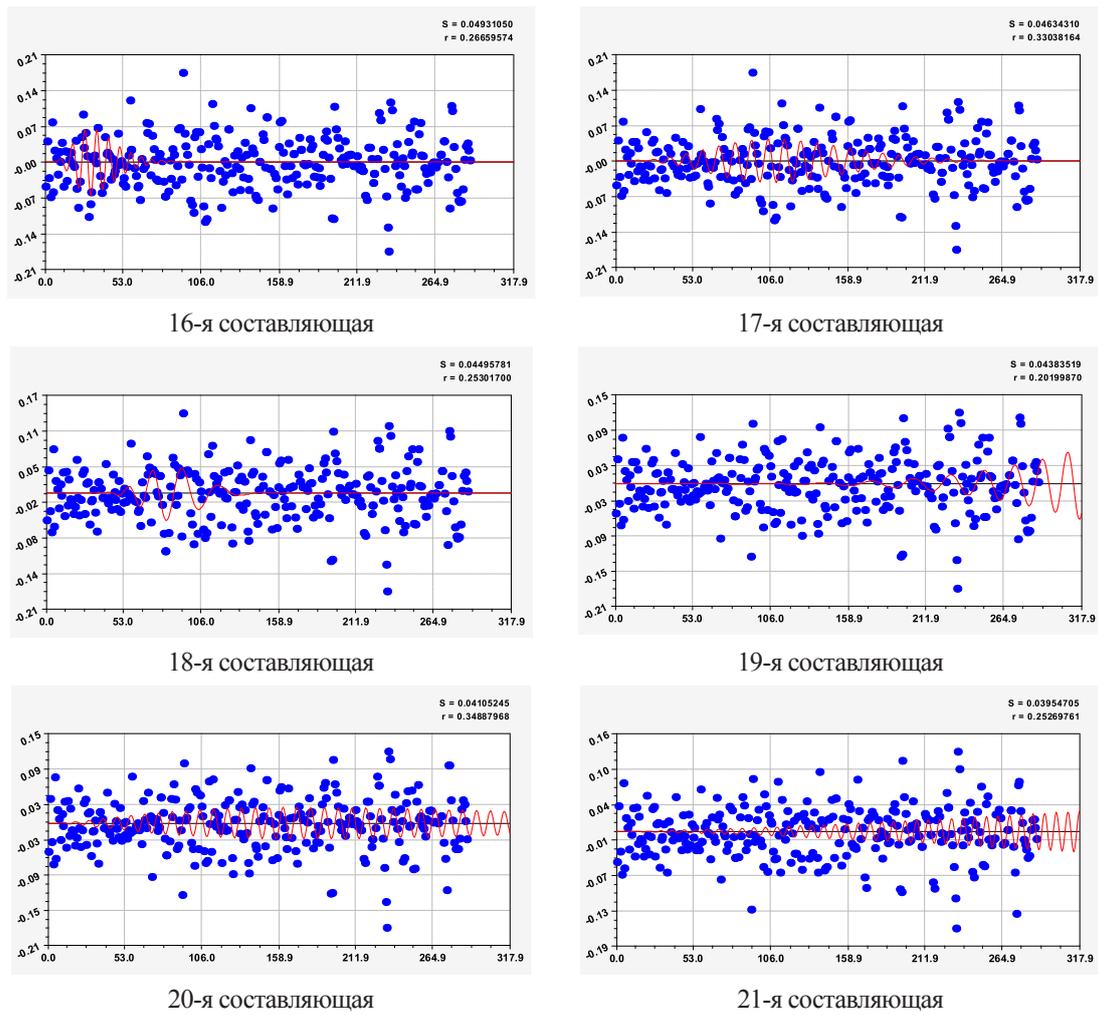


Рис. 3. Графики моделей рангового распределения широты реки Ировка (16 ... 21 составляющие)

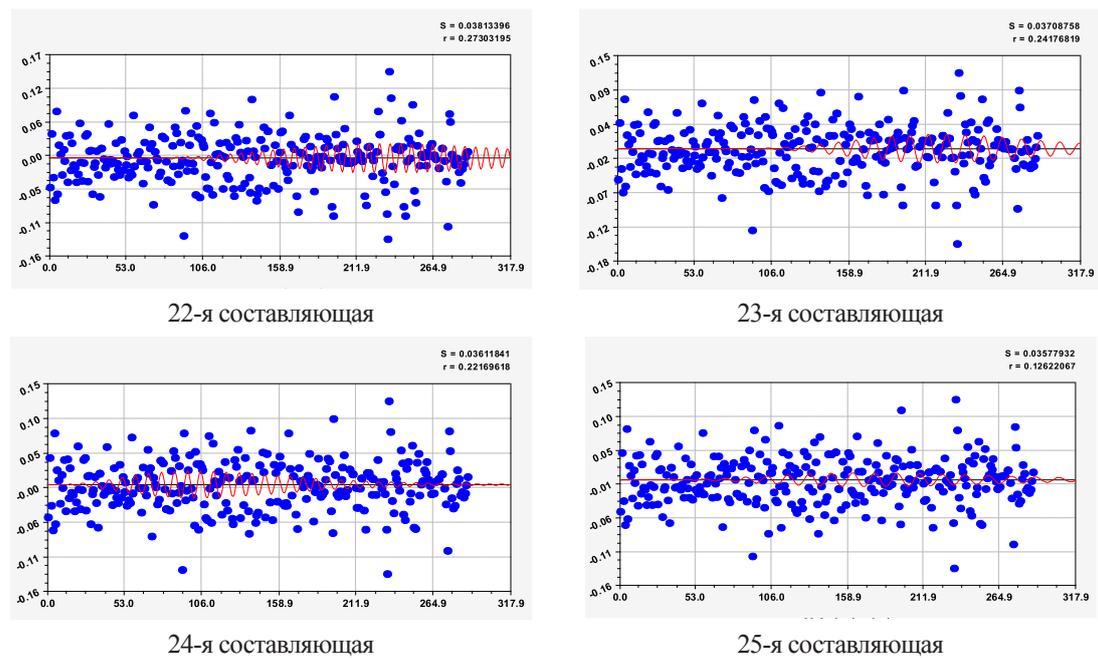


Рис. 4. Графики последних моделей рангового распределения широты р. Ировка (22 ... 25 составляющие)

## Заклучение

Спутниковые снимки в программной среде по инструкции [3] позволяют оперативно изучать территорию малых рек и составлять таблицы координат, в частности по местной широте, для статистического моделирования. При этом особое значение приобретает волновое изменение местной широты от Севера на Юг (от истока до устья малой реки Ировка).

Изменение местной широты по рангам характерных точек вдоль стрежня русла малой реки Ировка позволило идентифицировать 25 членов в виде асимметричных вейвлетов. Причем все 25 вейвлетов являются конечномерными, то есть каждый из них имеет начало и конец колебательной адаптации к долговременным изменениям рельефа. При этом значительная часть колебаний происходит внутри общей длины реки Ировка длиной 69 км.

Первые три члена дали коэффициент корреляции 0.9099, уровень адекватности более 0.9 или сильнейшей связи. Остальные 22 члена повышают уровень адекватности почти до 1. Местная широта малой реки Ировка по измерениям на космических снимках 2015 г. дает высокую определенность процесса квантования. Поэтому метод [7] идентификации изменения координат точек русла рекомендуется для изучения структуры и других малых рек.

## Список литературы / References

1. Садков С.А. Исследование морфологической структуры равнин с развитием просадочных процессов на основе подходов математической морфологии ландшафтов // Геоморфология. 2019. № 1. С. 48–58. DOI: 10.31857/S0435-42812019148-58.
2. Садков С.А. Morphological structure of plains subject to ground Subsidence on the basis of mathematical morphology of landscapes approach // Geomorphology. 2019. № 1. P. 48–58 (in Russian).
3. Салугин А.Н., Кулик А.В. Математическое моделирование развития продольного профиля делювиального склона // Геоморфология. 2019. № 1. С. 59–65. DOI: 10.31857/S0435-42812019159-65.
4. Salugin A.N., Kulik A.V. Mathematical modeling of the development of the long profile of a deluvial slope // Geomorphology. 2019. № 1. P. 59–65 (in Russian).
5. Карты высот, уклонов. [Электронный ресурс]. URL: <http://votetovid.ru/#56.201192,48.95536,17z,51v30l> (дата обращения: 02.10.2019).
6. Maps of heights, slopes. [Electronic resource]. URL: <http://votetovid.ru/#56.201192,48.95536,17z,51v30l> (date of access: 02.10.2019) (in Russian).
7. Мазуркин П.М., Зверев В.И., Толстухин А.И. Статистическая гидрология: учебное пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 274 с.
8. Mazurkin P.M., Zverev V.I., Tolstukhin A.I. Statistical Hydrology: A Training Manual. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2002. 274 p. (in Russian).
9. Тарбеева А.М. О происхождении четковидной формы русел малых рек криолитозоны // Геоморфология. 2018. № 1. С. 88–95. DOI: 10.7868/S043542811801008X.
10. Tarbeeva A.M. On the Origin of Beaded River Channels Shape in the Permafrost Zone // Geomorphology. 2018. № 1. P. 88–95 (in Russian).
11. Ермолаев О.П., Рысин И.И., Голосов В.Н. Картографирование овражной эрозии на востоке Русской равнины // Геоморфология. 2017. № 2. С. 38–51. DOI: 10.15356/0435-4281-2017-2-38-51.
12. Yermolayev O.P., Rysin I.I., Golosov V.N. Mapping assessment of gully erosion in the east of the russian plain // Geomorphology. 2017. № 2. P. 38–51 (in Russian).
13. Мазуркин П.М. Wavelet Analysis Statistical Data. Advances in Sciences and Humanities. 2015. Vol. 1.No. 2. P. 30–44. DOI: 10.11648/j.ash.20150102.11.