

рашается количество пылицы ёли; содержание пылицы березы сохраняется в тех же пределах. Пыльца широколиственных пород единична.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малаховский Д. Б. Ледниковые ложбины на Северо-Западе РСФСР // Изв. ВГО. 1988. Вып. 4. С. 333—336.
2. Малаховский Д. Б., Амантов А. В. Геолого-геоморфологические аномалии на Севере Европы // Геоморфология, 1991. № 1. С. 85—95.
3. Малаховский Д. Б., Арсланов Х. А., Гей Н. А. и др. Новые данные по голоценовой истории Ладожского озера. СПб: РГО, 1993. С. 61—73.
4. Вигдорчик М. Е. Геохронологические и палеогеографические аспекты террасообразования в области последнего оледенения // Хронология ледникового века. Л.: Изд-во ГО СССР, 1971. С. 58—72.
5. Геоморфология и четвертичные отложения Северо-Запада европейской части СССР. Л.: Наука, 1969. 256 с.

Кафедра геоморфологии СПбГУ

Поступила в редакцию  
15.11.94

#### ON GEOMORPHIC FEATURES OF THE ISTHMUS BETWEEN THE ONEZHNSKOYE AND LABOZHNSKOYE LAKES

D. B. MALAKHOVSKY, N. A. GEL, R. N. DZHINORIDZE

#### Summary

The paper describes topography and genesis of the young — Late Valdai — constructional landforms and ancient erosional buried surfaces, regional geological cross-sections being given. Particular attention has been given to drainage pattern, probably affected by recent faulting. Analysis of longitudinal profile of the largest drainage system (Oyat — Tuksha — Oshta rivers) revealed maximum in the North-West region number of terraces; analytical data are given on the age of floodplains and two lower terraces.

УДК 551.4(470.23)

© 1995 г. В. А. САВИЦКИЙ

#### ОБ АСИММЕТРИИ РЕЧНЫХ ИЗЛУЧИН

В теории русловых процессов считается общепризнанным, что для речных излучин характерна асимметрия в плане. Впервые это явление отметил Р. Киношита [1]. Оно играет существенную роль в развитии меандрирующего русла, а потому исследование плановой асимметрии русла — актуальная проблема теории руслового процесса.

Необходимо заметить, что термины «меандр» и «излучина» не тождественны. Суть расхождений между двумя понятиями отражена на рис. 1, а более подробно разбирается В. И. Замышляевым и Б. Ф. Снищенко [2].

В классификации меандров Дж. Брайса [3] плановая асимметрия русла — один из типобразующих параметров. Наиболее существенный вклад в изучение рассматриваемого явления внесли М. А. Карсон и М. Ф. Лапойнт [4], которые установили следующее:

большинство меандров при углах разворота более 60° асимметричны: асимметрия в равной мере характерна для свободных и ограниченных меандров, а потому не является результатом влияния ограничивающих факторов или различной податливости размыву берегов реки;

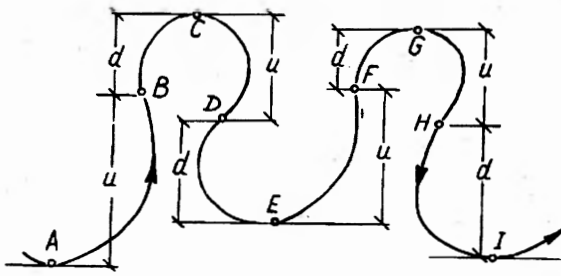


Рис. 1. Схема меандрирующего русла

*A, C, E, G, I* — вершины; *B, D, F, H* — точки перегиба; *AC, CE, EG, GI* — траверсы; *AE, EI* — меандры; *BD, DF, FH* — излучины; *d* и *u* — расстояния по вертикали между касательной к вершине излучины и параллельными ей прямыми, проведенными через точки перегиба на выходе излучины

чаще всего наблюдается один из видов асимметрии, названный авторами «задержка изгиба» и выражающийся в смещении соседних точек перегиба средней линии русла в разные стороны от оси пояса меандрирования; при этом точка перегиба верховой траверсы<sup>1</sup> «запаздывает» относительно точки перегиба низовой траверсы, а более длинные части этих траверс обращены выпуклостью вниз по долине;

физическая причина асимметрии — инерционность потока, под влиянием которой тальвег пересекает среднюю линию русла ниже точки перегиба; это явление наблюдается уже на стадии зарождения изгибов и в симметричных синусоидальных меандрах, а потому плановая асимметрия — изначально заданная характеристика меандра, обусловленная кинематикой потока на повороте русла;

асимметричность реальных меандров ставит под сомнение возможность использования для описания плана русла синусоидально-порожденной кривой, описывающей только симметричные формы меандров.

В своих исследованиях М. А. Карсон и М. Ф. Лапойнт использовали показатель асимметрии траверсы

$$z = 100u/(u + d), \quad (1)$$

выражающий в процентах смещение точки перегиба относительно оси пояса меандрирования (рис. 1). Траверсы считаются симметричными при  $z = 50\%$ .

В работах Г. Паркера с соавторами [5—7] разрабатывается математическая модель миграции сильно развитых меандров, которая описывает развитие плановой асимметрии. Согласно этой модели, асимметрия русла в плане — результат не только физических свойств потока на повороте, но и сама влияет на распределение скоростей течения между различными участками меандра и расположение участков размыва (одно из возможных проявлений закона М. А. Великанова о взаимодействии потока и русла).

Как уже можно было заметить, все названные исследования выполнены в рамках принятой за рубежом системы измерителей речного меандра. В гидроморфологической теории руслового процесса в качестве структурной единицы меандрирующего русла принята излучина. Очевидно, что результаты исследования, выполненные в системе измерителей меандра, не могут быть автоматически перенесены в систему измерителей излучины (рис. 2). Поэтому, приступая к исследованию явления асимметрии, в первую очередь необходимо решить вопрос о показателе асимметрии речных излучин.

В отечественной литературе явление плановой асимметрии излучин практически не исследовано. Различные авторы ограничились тем, что предложили для описания плана русла показатели асимметрии излучин.

<sup>1</sup> Участок русла между вершинами соседних излучин.

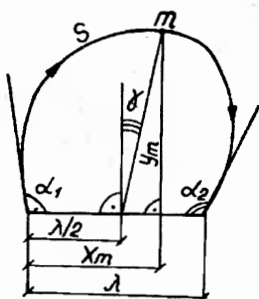


Рис. 2

Рис. 2. Плановые морфометрические измерители речной излучины  
 $S$  — длина излучины,  $\lambda$  — шаг излучины,  $\alpha_1$  — угол входа излучины,  $\alpha_2$  — угол выхода излучины,  $m$  — вершина излучины

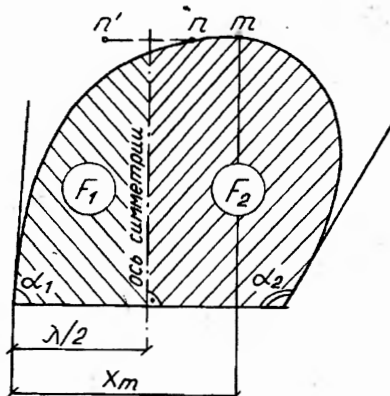


Рис. 3

Рис. 3. Схема излучины (к выводу показателя асимметрии)

Н. Е. Кондратьев [8] для этих целей использовал показатель

$$A_1 = \operatorname{tg} \gamma = (2X_m - \lambda) / 2Y_m. \quad (2)$$

Как следует из формулы (2) и рис. 2, значение показателя  $A_1$  зависит от положения вершины  $m$ , характеризуемого относительной проекцией верхней ветви излучины на линию шага  $X_m/\lambda$  и относительной стрелой излучины  $Y_m/\lambda$ . Показатель  $A_1$  может принимать одинаковые значения при различных сочетаниях  $X_m/\lambda$  и  $Y_m/\lambda$ . Поэтому с его помощью можно сравнивать по степени асимметричности лишь излучины с одинаковой относительной стрелой, что сужает возможности использования данного показателя.

Существуют и другие предложения. М. М. Гендельман [9] в качестве показателя асимметрии использовал отношение углов входа  $\alpha_1$  и выхода  $\alpha_2$  излучины (рис. 2):

$$A_2 = \alpha_1 / \alpha_2. \quad (3)$$

Для симметричных излучин, у которых  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $A_2 = 1$ . В. И. Замышляев [10] предложил показатель асимметрии в виде

$$A_3 = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha}. \quad (4)$$

Этот показатель для симметричных излучин равен нулю, а для излучин с сильной асимметрией принимает значения, близкие к единице.

Поскольку показатели  $A_2$  и  $A_3$  являются различными комбинациями величин  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то они взаимозаменяемы. Для них характерны и общие недостатки. Можно показать, что при больших углах разворота равенство углов входа и выхода обеспечивает симметрию участков русла, прилегающих к точкам перегиба, но отнюдь не гарантирует симметрию излучины в целом, которая может нарушаться за счет чередования в пределах излучины участков русла различной кривизны, что приводит к изменению положения вершины излучины.

Условие симметрии плана излучин и показатель асимметрии могут быть получены, исходя из общих геометрических представлений о симметрии плоских фигур. Плоская фигура является симметричной относительно оси симметрии, если каждой ее точке, лежащей на перпендикуляре к оси симметрии по одну сторону от нее, соответствует равноудаленная точка, лежащая на продолжении

того же перпендикуляра по другую сторону от оси симметрии. В этом случае наблюдается полное совпадение линейных и угловых характеристик, радиусов кривизны соответственных элементов плоской фигуры.

Представим излучину, заданную средней линией русла и линией шага (рис. 3). За ось симметрии примем перпендикуляр, восстановленный к линии шага через ее середину. Излучина будет симметричной относительно выбранной оси симметрии, если обеспечивается симметрия средней линии (или симметрия плоской фигуры, ограниченной средней линией и линией шага). Строгая симметрия в указанном выше смысле практически недостижима. К тому же весьма не просто разработать показатель асимметрии, основанный на разнице в расстояниях от соответственных точек до оси симметрии, так как не каждой точке средней линии можно подобрать пару по другую сторону от оси симметрии (рис. 3, точки  $n$  и  $n'$ ). Поэтому целесообразно сформулировать менее строгое и более удобное для практического использования условие симметрии излучин, в качестве которого можно принять равенство площадей частей фигуры, расположенных по разные стороны от оси симметрии. С учетом геометрического подобия плановой формы излучин одинаковой степени развитости это условие обеспечивает приближенную симметрию фигуры.

Показатель асимметрии имеет вид

$$A_F = (F_2 - F_1)/(F_2 + F_1) = (F_2 - F_1)/F, \quad (5)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  — площади верховой и низовой (относительно оси симметрии) частей плоской фигуры, ограниченной средней линией русла и линией шага и имеющей площадь  $F$ .

Для определения показателя  $A_F$  по формуле (5) необходимо вычислить площади  $F_1$  и  $F_2$ , что не совсем удобно. Поэтому целесообразно представить показатель асимметрии в виде комбинации морфометрических характеристик, описывающих асимметрию излучин.

Вернемся к рассмотренным ранее показателям асимметрии. Показатель  $A_1$  связывает степень асимметричности с перемещением вершины излучины  $m$  вдоль линии шага, а показатели  $A_2$  и  $A_3$  — со степенью неравенства углов входа и выхода. По всей видимости, положение вершины зависит от соотношения углов входа и выхода. Логика подсказывает, что вершина излучины должна располагаться ближе к большему из этих двух углов. Однако даже простые визуальные наблюдения за планами речных русел показывают, что эта ожидаемая закономерность проявляется лишь в виде тенденции, охарактеризовать которую можно при наличии показателей, определяющих положение вершины и степень неравенства углов входа и выхода.

Для характеристики асимметрии, обусловленной положением вершины, удобно использовать простой показатель:

$$A_4 = X_m/\lambda - 0,5. \quad (6)$$

Для характеристики асимметрии углами входа и выхода целесообразно использовать показатель  $A_3$ , несколько видоизменив его в соответствии с правилом знаков, заложенным в формулы (5) и (6):

$$A_5 = (a_2 - a_1)/a. \quad (7)$$

Был выполнен расчет показателей асимметрии  $A_4$  и  $A_5$  для 123 излучин различных рек п-ова Ямал и проведен последующий их регрессионный анализ, который показал, что два показателя асимметрии связаны линейной зависимостью

$$A_4 = 0,43 \cdot A_5 - 0,02 \quad (8)$$

при весьма низком коэффициенте корреляции  $R = 0,66$ , что указывает на выраженный статистический характер этой связи. Отсюда следует, что положение

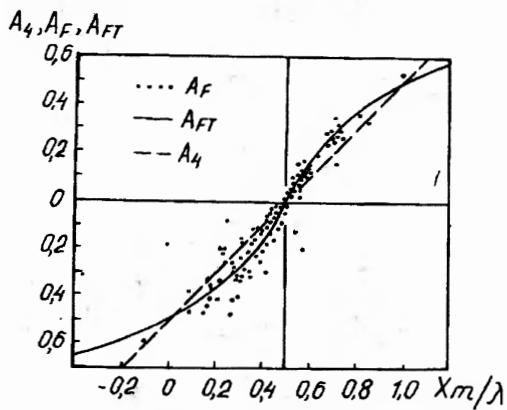


Рис. 4. Зависимость показателей асимметрии от положения вершины излучины  
Показатели асимметрии:  $A_F$  — эмпирический,  $A_4$  — обусловленный положением вершины излучины,  $A_{FT}$  — вписанного в излучину треугольника

вершины мало зависит от соотношения углов входа и выхода, а поэтому при анализе плановой асимметрии излучин необходимо учитывать оба этих фактора. Так как названные факторы не являются абсолютно независимыми, условимся считать, что симметрия излучин нарушается за счет смещения вершины и корректируется неравенством углов входа и выхода.

На рис. 4 показано изменение эмпирического показателя  $A_F$ , определяющегося для тех же 123 излучин, в зависимости от положения вершины. Отклонение эмпирических данных от линейного закона изменения показателя  $A_4$  указывает на то, что асимметрия излучин, как и предполагалось, зависит не только от положения вершины, но и от соотношения углов входа и выхода.

Для определения вклада в асимметрию излучин каждого из названных факторов был выполнен многомерный регрессионный анализ зависимости  $A_F = f(A_4, A_5)$ . Уравнение трехмерной регрессии для названных выше ямальских рек имеет вид

$$A_F = 0,744A_4 + 0,334A_5 + 0,004 \quad (9)$$

при коэффициенте множественной корреляции 0,94. С учетом выражения (8) можно сделать вывод, что вклад положения вершины и неравенства углов в интегральный показатель асимметрии примерно одинаков.

Поскольку в настоящее время не существует аналитических зависимостей, удовлетворительно аппроксимирующих сложную форму средней линии мандрирующего русла, теоретическим путем связь показателя  $A_F$  с показателями  $A_4$  и  $A_5$  установить не удастся. Поэтому обратимся к попыткам провести аналогию между морфометрическими характеристиками излучины и вписанного в нее треугольника, основанием которого является линия шага, а высотой стрела излучины. В. И. Замышляев и А. А. Майский [11] установили достаточно тесные корреляционные связи между морфометрическими характеристиками излучин и вписанных в них треугольников, в том числе и показатели асимметрии, вычисленные в соответствии с формулой (4). Поэтому можно ожидать определенной связи показателей асимметрии излучин и вписанных треугольников, вычисленных по площадям (формула (5)).

Возможные схемы вписанных в излучины треугольников представлены на рис. 5. Решение треугольников относительно площадей  $F_{1T}$  и  $F_{2T}$  и подстановка их в формулу (5) позволяют в результате несложных математических преобразований

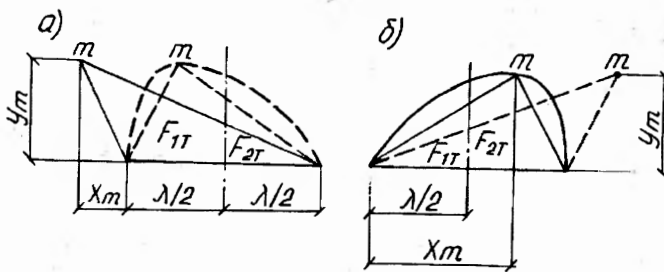


Рис. 5. Схемы вписанных в излучины треугольников  
 а — отрицательная асимметрия, б — положительная асимметрия

получить выражение показателя асимметрии для вписанного в излучину треугольника

$$A_{FT} = \frac{A_4}{0,5 + |A_4|}, \quad (10)$$

справедливое для излучин с положительной и отрицательной асимметрией.

График этой функциональной зависимости представлен на рис. 4 в виде сплошной линии. Кривая  $A_{FT}$ , описывающая асимметрию площади вписанного в излучину треугольника, вполне удовлетворительно аппроксимирует эмпирический закон изменения показателя асимметрии  $A_F$ , что позволяет использовать выражения (10) для вычисления показателя плановой асимметрии излучин.

Анализ гистограммы распределения показателя  $A_F$  для 123 излучин рек Ямала (рис. 6) позволяет сделать следующие выводы: абсолютные значения показателя не превышают 0,6; 60% излучин имеют отрицательную асимметрию, а 40% — положительную; наиболее часто повторяются значения показателя от 0 до  $-0,12$  (21,1%).

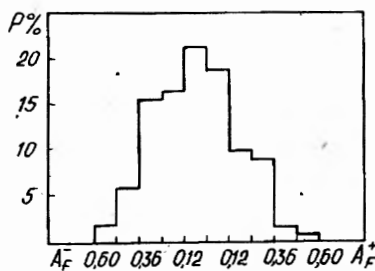


Рис. 6. Гистограмма распределения эмпирического показателя асимметрии  $A_F$

На основании гистограммы может быть предложена следующая классификация излучин:

- $|A_F| \leq 0,12$  — слабоасимметричные излучины (40%);
- $0,12 < |A_F| \leq 0,36$  — умеренно асимметричные излучины (51,5%);
- $0,36 < |A_F| \leq 0,60$  — сильно асимметричные излучины (8,5%).

Как следует из гистограммы, преобладание излучин с отрицательной асимметрией наблюдается во всех трех классификационных группах, но наиболее отчетливо оно проявляется среди излучин с умеренной и сильной асимметрией.

Принято считать, что с увеличением развитости излучин увеличивается их асимметрия [12]. Г. Паркер с соавт. [6] приводят совмещенные планы русла р. Миссисипи, из которых видно, что с течением времени излучины становятся

асимметричными. Асимметрия может быть при этом как положительной, так и отрицательной.

Исходя из этого логично ожидать наличие связи показателя асимметрии с изменяющимися во времени характеристиками развитости излучин. Однако попытка установить зависимость показателя  $A_F$  от угла разворота  $\alpha$  для тех же ямальских рек оказалась безуспешной. Отсутствие связи можно объяснить тем, что не существует общего для всех излучин закона формирования плана русла. Это предположение подтверждается наличием положительно и отрицательно асимметричных излучин и многообразием их форм. Вероятно, подобные связи могут быть установлены в результате наблюдений за отдельными излучинами (или группами однотипных излучин) на протяжении полных циклов их развития. При этом могут быть выявлены причины, приводящие к выбору знака асимметрии и определяющие ее количественные характеристики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kinoshita R.* An investigation of channel migration in the Ishikari river//Publ. Depart. of Resour., Office of Sci. and Technol. Japan, 1961. № 13. P. 25—32.
2. *Замышляев В. Н., Смищенко П. Б.* Меандрирование русел рек//Гидрометеорология. Сер. 37.27. Гидрология суши: Обзорная информация. 1986. Вып. 2. 46 с.
3. *Brice J. C.* Evolution of meander loops//Geol. Soc. Amer. Bull. 1974. V. 85. № 4. P. 581—586.
4. *Carson M. A., Lapointe M. F.* The inherent asymmetry of river meander planform//J. Geol. 1983. V. 91. № 1. P. 41—55.
5. *Parker G., Sawai K., Ikeda S.* Bend theory of river meanders. Part 2. Nonlinear deformation of finite-amplitude bends//J. Fluid Mech. 1982. V. 115. P. 303—314.
6. *Parker G., Diplas P., Akiyama J.* Meander bends of high amplitude//J. Hydraul. Eng. ASCE. 1983. V. 109. № 10. P. 1323—1337.
7. *Parker G., Andrews E. D.* On the time development of meander bends//J. Fluid Mech. 1986. V. 12. P. 139—156.
8. *Кондратьев Н. Е.* Гидроморфологические основы расчетов свободного меандрирования//Тр. ГГИ. 1968. Вып. 155. С. 5—38.
9. *Гендельман М. М.* Гидроморфологические закономерности свободного меандрирования речных русел и пути их инженерного использования (на примере р. Иртыша): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ГГИ, 1982. 16 с.
10. *Замышляев В. И.* Математическое моделирование плановых переформирований русел меандрирующих рек: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ГГИ, 1982. 27 с.
11. *Замышляев В. И., Майский А. А.* Морфометрические зависимости для одноплесовых излучин//Вопросы гидрологии суши. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 103—110.
12. *Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Смищенко Б. Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.

ГГИ, г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию  
05.06.92

#### ON THE ASYMMETRY OF RIVER MEANDERS

V. A. SAVITSKY

#### Summary

It has been established that the meander asymmetry in plan may be quantitatively assessed using the meander's apex deviation from the axis of symmetry and inequality of the angles of entry and exit. The contributions of the two factors to the meander asymmetry are about the same. An index of asymmetry is introduced —  $A_{F1}$ , which takes into account both factors, and another index —  $A_{F2}$  which approximates regularities of  $A_{F1}$  changes. The two indices may be applied both to describe meanders' pattern, along with other morphometric characteristics, and to investigate into importance of asymmetry in the meander evolution.