

Р.С. ЧАЛОВ, Е.Р. ЧАЛОВАМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, rschalov@mail.ru, ekar28@yandex.ru**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕАНДРИРОВАНИЯ РУСЕЛ РЕК РОССИИ**

Впервые дается географический анализ проявления различных форм меандрирования речных потоков и условий развития излучин русел и излучин рукавов разветвлений русел. Показано, что неустойчивость прямолинейного движения потоков, обуславливая их извилистость (меандрирование), находит отражение, в первую очередь, в образовании и развитии речных излучин (формировании меандрирующих русел), которые представляют собой наиболее распространенный морфодинамический тип русла на малых и средних реках. Установлено, что излучины русла доминируют на реках южной части Восточно-Европейской равнины, в Западной Сибири, других низменностей, для которых характерно (по геолого-геоморфологическим условиям) свободное развитие русловых деформаций. На больших реках этих регионов излучины осложняются островами на их крыльях или в привершинных частях, а на нижней Волге, средней и нижней Оби, относящихся к категории крупнейших, свойственны рукавам раздвоенных русел (Волги и Ахтубы, Малой, Горной и Большой Оби). Выявлено, что специфическая особенность меандрирующих и разветвленных русел — пойменно-русловые разветвления с меандрирующими рукавами (до 3–6 излучин каждого). На разветвленных реках любого типа процесс меандрирования проявляется в образовании излучин рукавов, в прямолинейных неразветвленных руслах — в извилистости меженного потока среди побочной, расположенных в шахматном порядке. В условиях ограниченного развития русловых деформаций (северо-запад ЕТР, Средне-Сибирское плоскогорье) преобладают врезанные излучины и излучины рукавов разветвлений врезанного русла на больших реках. В областях сложного геолого-геоморфологического строения происходит сложное чередование свободных и врезанных излучин, разветвленного русла с излучинами рукавов врезанного и широкопойменного русла. На горных реках встречаются врезанные излучины и структурно-обусловленные изгибы русла. Распространение различных форм меандрирования отражено на мелкомасштабной карте, на которой совмещено районирование для малых и средних рек и линейная форма (внемасштабные полосы) для больших и крупнейших рек.

Ключевые слова: русловые процессы, излучины русел, разветвления, излучины рукавов, мелкомасштабная карта, районирование.

R.S. CHALOV, E.R. CHALOVALomonosov Moscow State University,
119899, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, rschalov@mail.ru, ekar28@yandex.ru**GEOGRAPHICAL PATTERNS OF RIVER CHANNEL MEANDERING IN RUSSIA**

For the first time, a geographical analysis is made of the manifestation of various forms of meandering of river flows and conditions for occurrence of bends of channels and bends of branches of channels is given. It is shown that the instability of rectilinear movement of the flows, causing their sinuosity (meandering), is reflected primarily in the formation and development of river bends (formation of meandering channels) which are the most common morphodynamic type of channel in small and medium-sized rivers. It has been established that channel bends dominate in the rivers of the southern part of the East European Plain, in Western Siberia, and in other lowlands which are characterized (according to geological and geomorphological conditions) by the free development of channel deformations. In large rivers of these regions, bends are complicated by islands on their wings or in the apical parts, whereas in the Lower Volga, and the Middle and Lower Ob, which belong to the category of the largest, are characteristic for the arms of bifurcated channels (Volga, Akhtuba, and Malaya, Gornaya and Bolshaya Ob). It has been revealed that a specific feature of meandering and branching channels is floodplain-channel branching with meandering arms (up to 3–6 bends each). In branched rivers of any type, the meandering process manifests itself in the formation of branching arms, and in rectilinear unbranched channels — in the sinuosity of the meandering flow among side channels located in a staggered order. In conditions of limited development of channel deformations (the north-west of the European territory of Russia, and Central Siberian plateau), incised bends and bends of branching arms of the incised channel on large rivers prevail. In areas of complex geological and geomorphological structure, there occurs a complex alternation of free and incised bends, and a braided channel with bends of branches of the incised and broad floodplain channel. In mountain rivers there occur incised bends and structurally conditioned bends of the channel. The distribution of various forms of meandering is displayed on a small-scale map which combines the zoning for small and medium-sized rivers and the linear form (off-scale strips) for large and major rivers.

Keywords: channel processes, channel bends, branching, arm bends, small-scale map, zoning.

ВВЕДЕНИЕ

Излучины представляют собой наиболее распространенный морфодинамический тип речного русла и вид горизонтальных русловых деформаций. Они характерны для рек с широкопойменным и врезанным руслом, для малых, средних и, в меньшей мере, больших рек. Согласно карте «Русловые процессы на реках СССР» [1], доля извилистых (меандрирующих) русел составляет 64 % от протяженности всех рек Северной Евразии длиной от 500 км, в том числе в свободных условиях развития русловых деформаций (широкопойменные русла) — 77,4 % и в ограниченных (врезанные излучины) — 58 % [2].

Развитие, эволюция, спрямление и вновь образование и развитие свободных излучин обуславливают постоянную перестройку русловой сети, сопровождающуюся размывами берегов, углублением одних и обмелением других частей русел. На излучинах врезанных русел, сохраняющих свою конфигурацию на протяжении длительных, вплоть до геологических, отрезков времени, прижимное и сбойное течение у вогнутых коренных берегов провоцирует их обрушение, оползневые и осыпные процессы. Это позволяет относить меандрирование речных русел к опасным проявлениям русловых процессов. Очевидно, поэтому оно всегда было объектом исследований и ему посвящено большое количество публикаций в отечественной и зарубежной литературе [3–20]. При этом внимание исследователей сосредотачивалось на динамике и структуре потока на излучинах, их морфологии, механизме, форме и интенсивности смещения, выделении стадий развития.

Однако при всей сравнительно хорошей изученности процессов меандрирования, динамики потока и морфологии излучин слабо освещена специфика эволюции и зависимость формы русла, в том числе на разных стадиях развития, от водности рек, стока наносов, геолого-геоморфологического строения речной долины, других факторов, определяющих особенности процессов и их морфологических проявлений на реках, протекающих в разных природных условиях. Вне исследований оказались также излучины, формирующиеся в рукавах разветвленных русел, а также те, на крыльях или в привершинных частях которых образуются острова, извилины динамической оси потока, огибающего побочни в относительно прямолинейных руслах (они рассматриваются с позиций режима перекатов, частями которых являются побочни [21–23]), и соотношения между ними и развитием излучин на разных структурных уровнях русловых процессов. Такое широкое распространение проявления процесса меандрирования свидетельствует о его всеобщности и значимости для формирования русел любого морфодинамического типа и их переформирования [24]. Извилины динамической оси потока, излучины русла от пологих сегментных до прорванных и сложных петлеобразных или синусоидальных, излучины рукавов русловых (островных), пойменно-русловых разветвлений и разбросанных русел определяют морфологический облик рек, их русловый режим, от которого, в свою очередь, зависят условия использования речных ресурсов и методы управления русловыми процессами. Правда, в литературе встречается мнение [25], что извилистость русла является ведущим признаком при типизации руслового процесса, но при этом всеобщность процесса меандрирования, его проявления в рукавах разветвлений или образование излучин меженного потока в прямолинейном русле не рассматриваются.

Для того чтобы определить условия меандрирования на реках разных размеров, отличающихся по морфодинамике, нужно понимать географические особенности и закономерности распространения излучин, где и при каких сочетаниях природных факторов возникают различные формы проявления этого процесса. Подобная задача отчасти была решена для разветвленных русел [26], для которых был выполнен анализ их распространения и условий формирования. Поэтому цель данного исследования — показать географические закономерности распространения собственно извилистых (меандрирующих) русел, образующих морфологически однородные участки, а также излучин рукавов на реках с разветвлениями русел разного типа и извилин динамической оси потока в прямолинейных руслах, свободные и ограниченные условия формирования как самих извилистых русел, так и других форм проявления меандрирования.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены материалы многолетних (с 1957 г.) исследований русловых процессов на реках с разными морфодинамическими типами русла, отличающихся по размерам (от малых до крупнейших), водному режиму и стоку наносов, геолого-геоморфологическому строению бассейнов и долин, другим природным условиям, в которых они протекают. Объектами изучения были практи-

чески все крупные равнинные реки России и стран СНГ, полугорные и горные реки Алтая, Кавказа, Средней Азии, малые реки степного Алтая и Нижегородского Предволжья, великие китайские реки Янцзы и Хуанхэ. На большинстве из них проводились крупномасштабные русловые исследования, иногда с многократной повторностью, выполнялся ретроспективный анализ переформирования русел с использованием различных картографических материалов (на судоходных реках — лоцманских карт), на которых зафиксировано состояние русел в разные периоды времени (до 300 лет), аэро- и космические снимки. Разработана морфодинамическая классификация извилистых русел [20], определены соотношения разветвлений разного типа с развитием излучин рукавов [24]. Составление карты распространения процессов меандрирования русел и рукавов разветвлений опиралось на методологию мелкомасштабного картографирования русловых процессов [27, 28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс меандрирования и формы его проявления. Н.И. Маккавеев, разрабатывая основы современного географического (гидролого-геоморфологического) направления в изучении русловых процессов и подчеркивая, что русловые процессы «нельзя рассматривать изолированно от географической среды, без учета конкретных особенностей, характеризующих ландшафт водосбора» [29, с. 3], пришел к выводу о зональности русловых процессов, вследствие чего «потоки с одинаковыми гидравлическими характеристиками могут в различных природных условиях создавать различные русловые формы и, в свою очередь, одинаковые русловые образования могут возникать под влиянием современных различных гидравлических процессов» [21, с. 15]. Это определяет многообразие условий формирования извилистых (меандрирующих), разветвленных на рукава и относительно прямолинейных, неразветвленных русел и их разновидностей, сложные взаимоотношения между процессами, их формирующими, приводящими к развитию излучин в рукавах разветвлений, образованию островов (разветвлений) на излучинах, чередованию излучин и разветвлений русел рукавов с прямолинейными неразветвленными участками русел и их рукавов.

Сам процесс меандрирования и его следствие — формирование излучин русел при единой гидромеханической его природе — имеет свою специфику на малых и крупных (средних и больших) реках (рис. 1). На малых реках, на которых ширина b_p и глубина h русла — соизмеримые величины или различаются в пределах первых десятков единиц (часто $b_p/h < 20$), формирование излучин осуществляется под воздействием на ложе реки потока, сохраняющего форму «компактной струи, имеющей размеры всего русла» [30, с. 100]. Это соответствует значению критерия квазиоднородности потока

$$\theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda},$$

где $\lambda = \frac{2g}{C^2}$ — коэффициент гидравлических сопротивлений, C — коэффициент Шези.

При таком соотношении b_p и h в потоке четко выражена динамическая ось, и на излучине русла возникает поперечная циркуляция в виде винтообразного течения, в котором поверхностные струи у вогнутого берега, размывая его, погружаются вглубь, а придонные, наименее инерционные и с малыми скоростями, по диагонали направляются к выпуклому берегу, аккумулируя возле него наносы. В результате формируются очень крутые излучины русел малых рек.

На средних и больших реках в потоке возникает широкая стрежневая зона ($4.5 < \theta < 9.5$, по [30]), винтообразное течение не возникает, замещаясь циркуляционными течениями, заключающимися лишь в отклонении донных струй потока от направления поверхностных под углом до 30° . По [4, 29], это происходит при $b_p > 20h$. Объясняя различие в формировании излучин на малых и более крупных реках, М.А. Великанов [31, с. 31] писал: «...между шириною реки (т. е. основным размером) и ее кривизной существует несомненная... зависимость..., так как интенсивность поперечной циркуляции растёт с кривизной (т. е. обратно радиусу закругления), то становится ясным, что чем больше водность (а значит, и ширина) реки, тем развитие в ней меандров идет слабее». Следствием этого является абсолютное преобладание на малых реках, формирующих широкопойменные русла в свободных условиях развития русловых деформаций (равнинные территории, сложенные рыхлыми легко-размываемыми отложениями), излучин, что позволяет выделять обширные районы, в которых подавляющее большинство рек меандрирует (включая и средние реки, также меандрирующие, но имеющие излучины больших размеров).

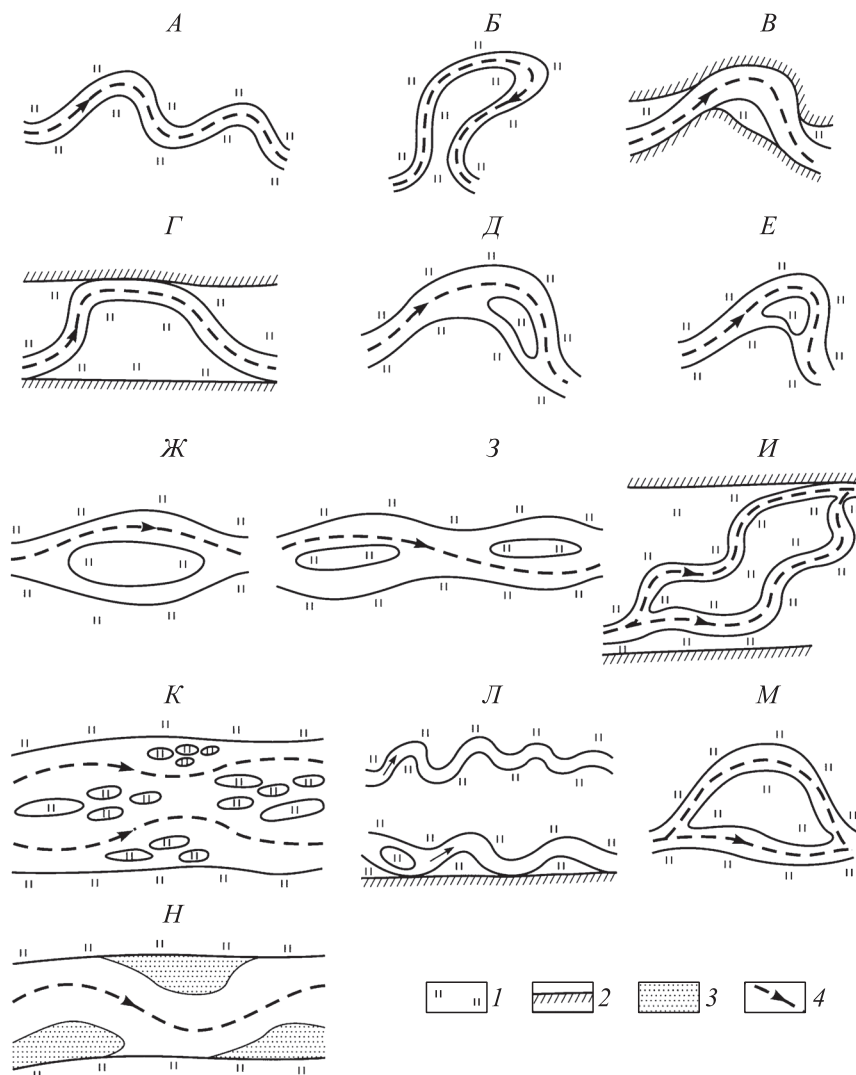


Рис. 1. Формы проявления процесса меандрирования в морфологии речных излучин, рукавов разветвленных русел и прямолинейных русел с побочными.

Излучины: А — сегментная; Б — петлеобразная; В — врезанная; Г — вынужденная и адаптированная; Д — с островом в нижнем крыле; Е — с островом в привершинной части; Ж — рукавов одиночных разветвлений; З — рукавов сопряженных разветвлений; И — рукавов пойменно-русловых разветвлений; К — рукавов параллельно-рукавных разветвлений; Л — рукавов раздвоенного русла; М — прорванные излучины; Н — меженного потока в прямолинейном русле с побочными. 1 — пойма, 2 — коренные берега, 3 — прирусловые отмели, 4 — основные направления главного течения реки.

Характерно, что связь между параметрами излучин π малых рек с показателями водоносности (Q_{ϕ} , Q_{30} , $Q_{\text{ср.макс}}$) единая, вне зависимости от их водного режима, тогда как для средних и больших рек эта связь дифференцируется в зависимости от внутригодовой неравномерности стока [20, 32]. Так, в уравнении $r = aQ_{30} + c$ (здесь r — радиус кривизны излучин) коэффициент a имеет региональный смысл, будучи связанным с показателем внутригодового распределения стока $a = f\left(\frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср.макс}}}\right)$, зако-

номерно изменяясь в направлении с запада на восток по мере изменения естественной зарегулированности стока.

На больших широкопойменных реках (а таковых, имеющих меандрирующее русло, немного — средняя Обь, Иртыш, Миссисипи, или на них встречаются лишь отдельные излучины, не создающие морфологически однородных участков, — верхняя Обь, Амур) зависимость $\pi = f(Q)$ не проявляется,

что, очевидно, объясняется повышенной изменчивостью удельных расходов половодий (паводков) во время разливов из-за отвлечения значительной части стока на затопленную пойму и в многочисленные пойменные протоки (ширина поймы на средней Оби колеблется от 10–15 до 25–30 км, количество пойменных протоков — от 1–3 до 8–10). Кроме того, на излучинах больших рек на их крыльях и в привершинных частях обычно формируются острова, в протоки между которыми и шпорой излучин (выпуклым берегом) отводится от нескольких процентов до 20–25 % расхода воды. Иногда само развитие излучин больших рек осуществляется благодаря последовательному образованию и причленению к выпуклым берегам островов (разветленно-извилистое русло). На крутых излучинах, у которых в вершине нарушается условие безотрывного обтекания потоком берегов ($r < 2,5b_p$), стрежень потока раздваивается или смещается к выпуклому берегу, возникает местное расширение русла с водоворотной зоной у вогнутого берега, в котором формируется осередок, превращающийся со временем в остров. Во всех случаях образование островов на излучинах связано с большой шириной русла, при которой критерий $\theta > 9,5$, и поток разделяется на две или несколько стречневых зон, что является причиной образования осередков и островов.

На реках с врезанным руслом развитие излучин определяется характером грунтов, создающих ограниченные условия развития русловых деформаций. В скальных грунтах, особенно кристаллических, излучины, как правило, следуют сетке тектонических разломов или зон трещиноватости горных пород, характеризуются большим разнообразием размеров и форм, которые за геологическую историю их развития лишь моделируются потоком, придающим им плавные очертания. В пластичных, полускальных и скальных осадочных грунтах врезанные излучины наследуют форму свободных, но их параметры обычно существенно больше. Это следствие, во-первых, большей (при отсутствии или малой ширине поймы) величины удельного руслоформирующего расхода и, во-вторых, отражение наибольшей водности реки за всю историю ее развития. На врезанных излучинах в скальных грунтах даже на больших реках острова формируются реже из-за стесненности потока неразмываемыми берегами.

Появление на реке острова, в том числе на крыльях излучин, вызывает рассредоточение потока и, в то же время, создает для него определенные препятствия. Возле острова поток делает изгиб, стрежни его в обоих рукавах направляются к противоположным берегам, вызывая их размыв и создавая вогнутости, в результате чего каждый рукав образует излучины, параметры которых определяются его водностью, а шпорой служит сам остров. Многоводный рукав, забирающий большую долю расхода (до 70 % и более) в одиночных разветвлениях, формирует одну излучину; в маловодном рукаве (с долей расхода нередко первые проценты) может сформироваться две-три излучины, параметры которых соответствуют его водности. В разветвлениях, возникающих в привершинных частях излучин, параметры рукавов определяются кривизной вогнутого берега и формой выпуклого.

На реках Северной Евразии общая протяженность разветвленных русел составляет около 20 %, причем на свободные условия развития русловых деформаций (широкопойменные русла) приходится 7,4 %. Данный показатель изменяется в разных регионах от 32,5 % на реках севера Европейской части России до их отсутствия (не считая разветвлений на излучинах, разветвлений второго порядка [23] в относительно прямолинейных руслах, осередковых и точечных разветвлений на горных реках [2]). При морфологическом разнообразии разветвлений (одиночные, сопряженные, параллельно-рукавные, прибрежные — односторонние, чередующиеся, двусторонние; пойменно-русловые; раздвоенные русла) их рукава в абсолютном большинстве меандрируют, образуя одну излучину в каждом рукаве возле элементарных и малых островов, две излучины — возле больших островов [33], серии излучин в пойменно-русловых разветвлениях и морфологически однородные участки рукавов раздвоенных русел. Параметры излучин рукавов зависят от их водности и по длине остаются практически постоянными, но в раздвоенных руслах изменяются в широких пределах из-за изменчивости водности по их длине. Например, левый рукав нижней Оби — Малая Обь — в начале раздвоения забирает в половодье почти 64 % стока этой реки (без учета части стока, затопившего пойму), но почти до впадения р. Северной Сосьвы ее водность сокращается до 5 % вследствие оттока воды в рукава вторичных раздвоений и многочисленные пойменные протоки, после чего, соединяясь с ними, увеличивается до 36 % и снова уменьшается к слиянию с правым рукавом — Большой Обью, составляя 22 %. Это обуславливает неоднократные изменения по длине Малой Оби параметров излучин — радиусов кривизны — от 4,4 до 0,44 км [34].

В некоторых одиночных разветвлениях и звеньях сопряженных одиночную излучину образует один из рукавов, тогда как второй имеет прямолинейное русло (особенно при его расположении возле коренного берега). Если это второстепенный, меньший по водности рукав, в нем формируются

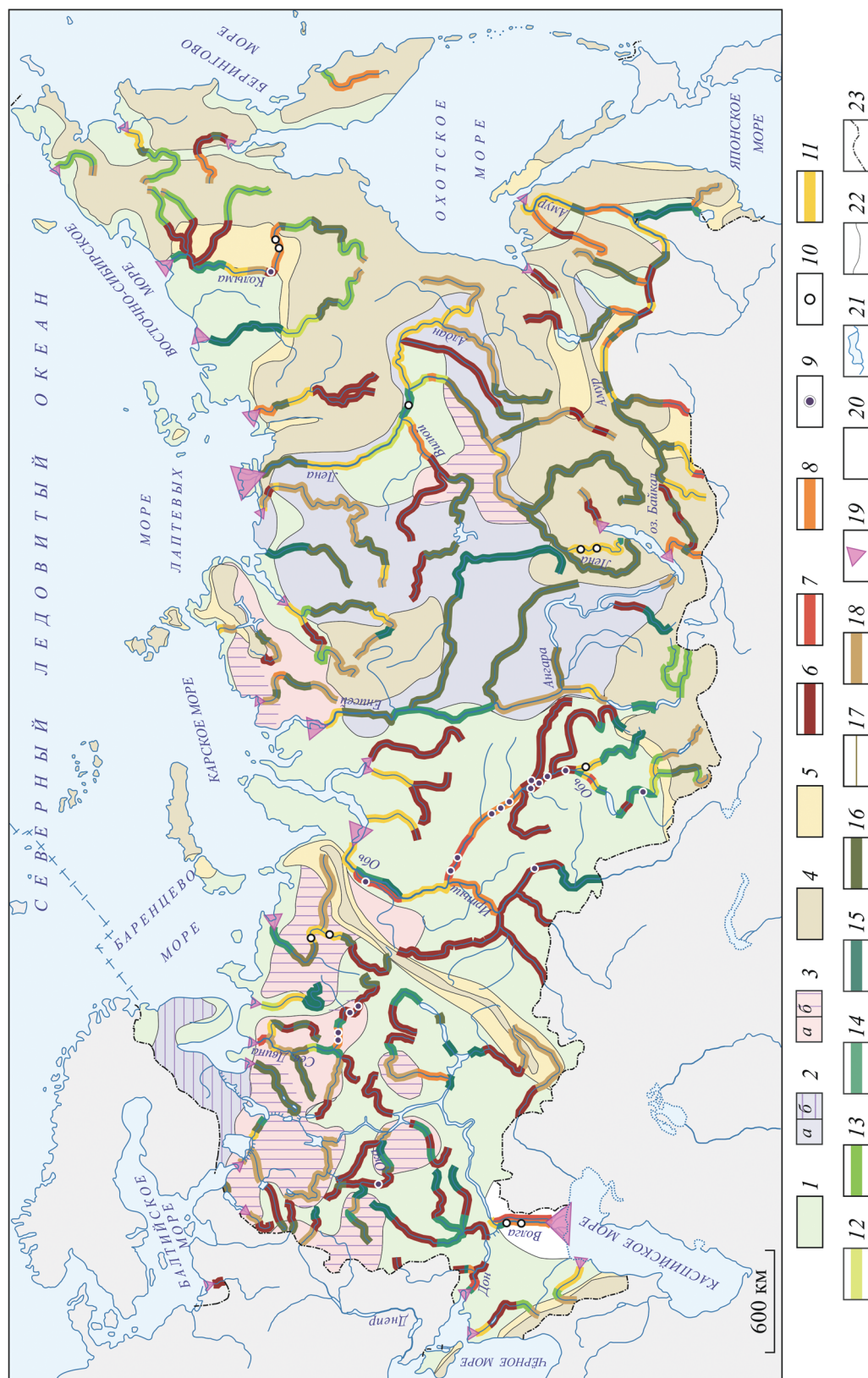


Рис. 2. Карта распространения излучин на реках России.

Районы распространения на малых и средних реках: 1 — свободные в широкопойменных руслах, в том числе с излучинными рукавами в единичных разветвлениях; 2 — врезанные, в том числе рукавов единичных разветвлений (в зависимости от литологии основы: а — при маломощном чехле рыхлых отложений на скальном основании, б — в скальных грунтах); 3 — при сложном пространственном чередовании условий ограниченного и свободного развития русловых деформаций (в зависимости от литологии основы: а — в скальных, преимущественно, осадочных грунтах, б — в пластичных отложениях); 4 — горные реки с врезанными излучинами и прямолинейным руслом со структурно обусловленными изгибами; 5 — полугорные реки в предгорьях и меж- и внутриворонных котловинах с извилистыми протоками и рукавами. Морфологические однородные участки больших и крупнейших рек с широкопо-

йменным и адаптированным руслом: 6 — свободные излучины; 7 — излучины рукавов раздвоенных русел; 8 — излучины с островами на крыльях и в при-
вершинных частях, разветленно-извилистым руслом, излучины рукавов чередующихся односторонних разветвлений; 9 — пойменно-русловые разветвления
на меандрирующих реках с извилистым (меандрирующим) руслом; 10 — пойменно-русловые разветвления на реках с разветвленным руслом (пологие
излучины рукавов); 11 — излучины рукавов одиночных и сопряженных разветвлений; 12 — излучины рукавов параллельно-рукавных разветлений;
13 — извилистость рукавов и разбросанных разветлений; 14 — извилистость динамической оси меженных потоков в прямолинейных руслах (побочный
процесс); 15 — чередование свободных, вынужденных излучин и прямолинейных участков с побочными, в том числе в рукавах раздвоенных
русел. Морфологически однородные участки больших и крупнейших рек с врезанным руслом; 16 — врезанные излучины; 17 — излучины рукавов в раз-
ветвлениях; 18 — единичные врезанные излучины, относительно прямолинейные русла, излучины рукавов единичных разветвлений. Дельтовые разветвле-
ния: 19 — излучины рукавов в дельтах рек. 20 — территории с отсутствием речной сети. 21 — волохранилища. Границы: 22 — районов распространения
излучин на малых и средних реках; 23 — государственная.

побочни, обуславливающие извилистость динамической оси потока; больший по водности рукав с прямолинейным руслом обычно имеет плесовый харак-
тер, находясь под направляющим воздействием на поток ведущего берега (яра высокой поймы или коренного). Прямолинейность сохраняют рукава
возле небольших островов, образующих разветвления второго порядка: их влияние на структуру потока ограничивается только приостровной частью
потока, не охватывая всего русла. Такая ситуация возникает при соотноше-
нии ширины острова B_o и ширины русла b_p выше узла разветвлений $B_o < 0,4b_p$ [35]. В противном случае ($B_o > 0,4b_p$) рукав образует излучину.
Перераспределение стока между рукавами происходит после достижения излучиной одного из рукавов критического соотношения $l/L = 1,4-1,7$ (l —
длина рукава, L — шаг разветвлений, равный шагу излучины). В том случае,
если поток направляется в рукава выступами (мысами) коренных берегов,
излучины приобретают крутую сегментную форму, у которой $l/L > 1,7$.

Прямолинейное неразветвленное русло (этот тип на реках Северной
Евразии среди широкопойменных русел составляет 7,4 %, среди врезанных —
30,1 % [2]) может быть перекатным, в котором побочни, располагаясь в
шахматном порядке, создают извилистость меженного русла (извилины ди-
намической оси потока), и плесовым. Последнее более характерно для вре-
занных русел, особенно сформировавшихся в скальных грунтах из-за свой-
ственного им дефицита наносов. В широкопойменных прямолинейных
руслах плесовые участки редки, для них типична, как и для рек с односто-
ронними разветвлениями, формирующимися при расположении реки вдоль
коренного берега и наличия односторонней поймы, извилистость меженного
потока, огибающего побочни перекастов. Эта же особенность присуща отно-
сительно прямолинейным, основным по водности рукавам сложно развет-
вленных русел больших и крупнейших рек. Таковы некоторые рукава парал-
лельно-рукавных разветлений верхней Оби ниже слияния Бии и Катунь, а
также нижней Лены, на участках, где максимально суммарная ширина русел
(вместе с островами) составляет 3,5 и 28 км соответственно (для сравнения:
на излучинах русла Оби при той же водности — меньше 0,5 км, на прямо-
линейных неразветвленных участках нижней Лены — 2,5 км). В этих рука-
вах помимо побочней, расположенных в шахматном порядке, встречаются
осередковые разветвления и элементарные острова, образующие разветвления
второго порядка с сопровождающими их извилинами динамической оси
потока.

**Географические закономерности в распространении процессов меандри-
рования русел рек и рукавов разветвлений.** Для оценки особенностей распро-
странения извилистых (меандрирующих) речных русел, излучин рукавов
разветвленных русел и извилин динамической оси потока в относительно
прямолинейных руслах, природных условий их формирования, различной
водоносности и водного режима на реках России была составлена мелко-
масштабная карта (рис. 2). Как и при составлении карты «Русловые про-
цессы на реках СССР» [1], а затем карты русел рек, разветвленных на рука-
ва [26], для характеристики малых и средних рек, которые из-за масштаба
карты показать невозможно, применен метод качественного фона с выделе-
нием районов, в пределах которых реки характеризуются однородными или
близкими условиями формирования русел, определяющими их меандриро-
вание. Большие и крупнейшие реки показаны линейными знаками (поло-
сами), цвет которых соотносится с морфологическими проявлениями меанд-
рирования русел неразветвленных рек, рукавов разветвленных русел или
извилистости потока в прямолинейных неразветвленных руслах или рукавах
рек. При этом раздвоенные русла некоторых крупнейших рек (Оби, Волги)
показаны двумя полосами, соответствующими основным рукавам, имеющим
свои формы проявления процесса меандрирования. Специальными внесмас-
штабными значками показаны участки рек меандрирующих и разветвленных

на рукава, на которых сформировались пойменно-русловые разветвления, рукава которых представлены сериями излучин, либо в свою очередь образующими разветвления с излучинами возле островов второго порядка. Их протяженность — первые десятки километров, они образуют единичные формы среди извилистых (меандрирующих) неразветвленных русел или русловых (островных) разветвлений, не составляя протяженные морфологические однородные участки, что не позволяет полностью отразить их на карте данного масштаба.

Среди наиболее крупных районов, в которых все малые и средние реки свободно меандрируют среди широких пойм, иногда подходя к бортам долины, возле которых возникают вынужденные и вписанные излучины, — большая часть южной половины Восточно-Европейской равнины и практически вся Западная Сибирь, включая степной Алтай. На средних реках при достаточно большой ширине поймы, особенно на участках со слабоустойчивым руслом, встречаются прорванные излучины и острова на крыльях излучин. Возле бортов долины меандрирующее русло прерывается одиночными или сопряженными разветвлениями, иногда создающими короткие морфологически однородные участки, на которых рукава образуют пологие или развитые излучины. Другими районами распространения меандрирующих русел малых и средних рек являются Центрально-Якутская, Нижнеамурская, Колымо-Инди́гирская низменности и полоса приморских низменностей на севере ЕТР, Восточной Сибири и Северо-Востока России.

Второй крупный регион охватывает горные территории Северного Кавказа, Урал, юг Сибири и большую часть Восточной Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока. Здесь все малые реки горные, они характеризуются высокими уклонами, бурными потоками и в основном прямолинейными руслами; средние реки образуют структурно обусловленные изгибы, где извилистость — следствие литогенно-тектонической основы развития врезанных русел; собственно врезанные излучины, созданные потоками горных рек, очень редки.

Не меньшая по площади группа районов по условиям формирования русел приходится на плато или плоскогорья, сложенные скальными породами, с преобладанием кристаллических, обуславливающих повсеместное развитие на малых и средних реках врезанных, часто прямолинейных русел. Повышенные уклоны этих рек являются причиной частой встречаемости русел полугорного типа, а иногда и горных, вплоть до образования водопадов. Особенно характерны они для Карелии и части Кольского полуострова (Скандинавский щит), где они преобладают, имея прямолинейные русла с редкими врезанными, в основном структурно предопределенными, излучинами, и лишь при впадении в озера (в их устьевых областях) становятся равнинными с врезанными излучинами. На Средне-Сибирском плоскогорье при наличии маломощного чехла рыхлых отложений преобладают равнинные реки, формирующие врезанные и адаптированные излучины или одиночные разветвления с рукавами, образующими пологие излучины (на средних реках в местных расширениях русел или днищ долин). Эти различия на карте отражены штриховкой районов непосредственного контакта рек с породами кристаллического фундамента.

Четвертая группа районов выделяется благодаря сложному пространственному чередованию свободных и ограниченных условий развития русловых деформаций и, соответственно, свободных, адаптированных и врезанных излучин; для средних рек, среди которых больше широкопойменных, наряду со свободными излучинами встречаются одиночные разветвления с излучинами рукавов, огибающих острова. К ним относятся северные районы Восточно-Европейской равнины, сложенные ледниковыми отложениями, образующими моренные возвышенности (в их пределах — врезанные излучины), перемежающиеся с флювиогляциальными долинами (широкопойменные русла — излучины, на средних реках — также одиночные разветвления с излучинами рукавов) и полускальными (мергели, аргиллиты, песчаники) осадочными отложениями, создающими коренные берега широкопойменных русел. В восточных районах страны на северо-западе ЕТР, Среднерусской и Приволжской возвышенностях такие условия возникают при формировании речных русел в скальных осадочных породах, что также отмечено на карте штриховкой.

В предгорьях выделяются в виде нешироких полос вдоль гор, а также во внутригорных котловинах районы, в которых пересекающие их реки являются полугорными, имеющими разбросанные русла, представленные беспорядочным расположением многочисленных небольших островов, огибая которые в межень река превращается в сложную сеть относительно коротких извилистых протоков или исключительно осередковых разветвлений, также с извилистыми протоками. Общая особенность полугорных рек в этих условиях, вне зависимости от того, врезанные или широкопойменные их русла, — это очень высокие темпы их переформирования, проявляющиеся в изменении рисунка русловой сети практически после каждой многоводной фазы водного режима.

На больших реках, которые показаны на карте линейными знаками (см. рис. 2), процессы меандрирования, проявляющиеся в формировании извилистых русел, излучин рукавов в разветвлениях или в шахматном расположении побочней в относительно прямолинейных неразветвленных руслах (извилистость меженного русла), в общем соответствуют районам, выделенным по геолого-геоморфологическим и кинематическим условиям развития русловых деформаций. В южной части Восточно-Европейской равнины, в Западной Сибири, на Центрально-Якутской низменности, в сравнительно небольших равнинных областях Приамурья и Северо-Востока на реках доминируют свободные излучины, находящиеся на разных стадиях развития — от пологих до крутых сегментных и петлеобразных, характеризующиеся интенсивными переформированиями, размывами/намывами берегов, изменениями форм и основных параметров, периодическими спрямлениями — формированием прорванных излучин при прохождении руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме или вследствие встречных размывов берегов на крыльях петлеобразных излучин. Таковы реки Ока, Москва и Клязьма, Дон, Хопер, а также Медведица, Белая, Ветлуга и другие притоки Волги, прочие реки юга Европейской России, излучины русел многих из которых изучаются давно и стали основой общепринятых представлений о формировании излучин, хотя и не исчерпывающих их многообразие. В частности, на наиболее крупных реках (нижней Волге, представляющей основной правый рукав раздвоенного русла, нижнем течении Вятки) формирование излучин связано с развитием островов на крыльях, в основном нижних и привершинных частях излучин, протоки между которыми и шпорами (выпуклыми берегами) относительно маловодны (от 5 до 15–20 % расхода воды в реке). Но и такое отвлечение стока из основного русла обуславливает снижение параметров его излучин (радиусов r , шагов L) и увеличение степени их развитости (отношение длины l к шагу L излучины). На нижней Волге левый рукав раздвоенного русла — Ахтуба, водность которого не превышает 3–5 % от стока Волги, — меандрирует. В правом основном рукаве имеется два пойменно-русловых разветвления — Сарпинское и Саралевское с меандрирующими рукавами, отличающиеся сложными переформированиями в многолетнем плане. Пойменно-русловые разветвления формируются обычно на перевалах реки от одного борта долины к другому, но на нижней Волге — ниже изгибов ведущего коренного правого берега. Типичные разветвления этого типа встречаются на средней Оке, Вычегде. На Дону, Хопре и Медведице, на нижней Волге у г. Волгограда и других реках имеются сравнительно небольшие участки прямолинейного русла с побочнями, расположенными в шахматном порядке, и извилистостью меженного потока.

На реках северной половины Европейской территории России, где геолого-геоморфологическое строение обуславливает сложное чередование свободных и ограниченных условий развития русловых деформаций, большие реки характеризуются формированием на них врезанных (Онега, Вага) и свободных излучин (средняя и верхняя Вычегда), а самые большие реки (Северная Двина, Печора) — разнообразием проявлений извилистости широкопойменных и врезанных русел, рукавов разветвлений также врезанных и широкопойменных русел, извилистостью меженного потока среди побочней. В низовьях Северной Двины (ниже устья р. Пинеги) находится своеобразное раздвоенное русло, межукавья которого представлены высокими (незатопляемыми) островными массивами с коренным цоколем. Рукава этих разветвлений образуют пологие врезанные излучины с шахматным расположением массивных побочней.

Более однородные геолого-геоморфологические условия формирования русел рек Западной Сибири обуславливают абсолютное преобладание свободно меандрирующих русел, причем излучины характерны даже для крупнейших рек — средней Оби, начиная от ее слияния с Томью, и большей части Иртыша. Следствием очень высокой водности этих рек является то, что ниже устья р. Кети на Оби и ниже слияния с р. Тоболом на Иртыше большинство излучин осложнено формированием островов на крыльях излучин, а на крутых излучинах ($l/L \approx 1,7$) — в их привершинных частях. На широтном участке средней Оби и почти на половине длины нижней Оби вследствие прохождения руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме и ее большой ширине (от 30 до 60 км в районе впадения р. Северной Сосьвы) река раздваивается на два рукава, местами на четыре. Сток воды распределяется между рукавами раздвоенного русла в очень сложных пропорциях, и с учетом отвлечения части расхода воды в многочисленные пойменные протоки и на пойму при ее затоплении в половодье доля стока в основных рукавах колеблется от 5 до 65 % (в узле раздвоения на Горную и Малую Обь — 35 и 65 %). Рукава раздвоенного русла или меандрируют (правый рукав средней Оби и левый рукав, состоящий из следующих одна за другой протоков — Юганской Оби, Большой Салымской и Неулевой), или, как на нижней Оби, один рукав — Малая Обь — и его вторичные раздвоения меандрируют, тогда как второй, проходящий вдоль обрывов Белогорского «материка» и Полуйской

возвышенности, характеризуется чередованием вынужденных, вписанных и свободных излучин, прорванных излучин и одиночных разветвлений с извилистыми рукавами (Горная Обь) или в основном прямолинейным руслом с извилистостью динамической оси потока (Большая Обь). Исключение составляет отрезок нижней Оби от слияния с Иртышом до раздвоения реки на Горную и Малую Обь, образующий морфологически однородный участок русла с одиночными разветвлениями с излучинами рукавов. Такое же русло характерно для среднего Иртыша выше устья р. Тары. Нет излучин на верхней Оби, где от слияния Бии и Катунь до устья Томи сменяют друг друга параллельно-рукавные, односторонние и одиночные разветвления, а в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла — сопряженные и одиночные разветвления с рукавами, образующими пологие или развитые излучины. В односторонних разветвлениях с основными (многоводными) относительно прямолинейными рукавами и в прямолинейном русле выше устья Томи развиты побочни, располагающиеся в шахматном порядке (извилины динамической оси потока). Разветвленные русла (одиночные и сопряженные) характерны для Томи и рек севера Западной Сибири — Надыма и Пура; их рукава образуют пологие и развитые излучины, параметры которых определяются водностью.

На больших реках Средне-Сибирского плоскогорья преобладают врезанные излучины (Подкаменная и Нижняя Тунгуска, нижний Енисей). Они чередуются с прямолинейным врезанным руслом и врезанным разветвленным руслом, в котором рукава образуют, огибая острова, пологие излучины. Во многих случаях острова очень высокие, незатапливаемые и, таким образом, излучины рукавов возле них являются врезанными.

Специфическая особенность региона — это развитие врезанных излучин на больших и многих средних реках, тогда как остальные средние и малые реки широкопойменные, свободно меандрирующие и, реже, разветвленные, формирующие излучины рукавов одиночных и сопряженных разветвлений. Будучи относительно маловодными, они, в отличие от больших, перемещаются по кровле трудноразмываемых горных пород, размывая перекрывающую их маломощную толщу покровных отложений и разрабатывая широкие долины (таково русло верхнего Вилюя; в верхнем течении Нижней Тунгуски чередуются свободные, вынужденные и вписанные излучины).

Врезанные русла доминируют на реках горных районов юга Сибири, плато Восточной Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока. Среди них широко распространены излучины и разветвления, преимущественно одиночные, рукава которых образуют пологие излучины. Таковы русла верхней Лены, Алдана, Витима, Олёкмы, верхнего Амура, Шилки и Аргуни. В рассматриваемых регионах большие реки, формируясь среди горных массивов, имеют уклоны и русловые процессы, соответствующие равнинным рекам. Наряду с врезанными излучинами, реки за всю геологическую историю развития выработали глубокие долины, которые иногда имеют относительно широкие днища, по которым свободно меандрируют или разветвляются их русла. При выходе рек из горных районов в межгорные котловины формируются разбросанные, многорукавные русла с интенсивным переформированием излучин многочисленных протоков и рукавов.

На низменностях Восточной Сибири, Северо-Востока и Дальнего Востока большие реки, подобно средним и малым, меандрируют и, протекая в условиях прохождения руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме [2], но при ее очень высокой залесенности, формируют излучины от пологих до крутых сегментных, прорванных и петлеобразных (верхняя Яна, Амга, Адыча, Анюй). Многие излучины осложняются разветвлением на их крыльях (нижний Вилюй, Индигирка, Колыма). Крупнейшие реки, протекающие по этим низменностям (Лена, Амур), характеризуются разветвленными руслами, в которых рукава или образуют излучины, или, будучи прямолинейными, — извилины динамической оси потока, огибающего побочни, или вторичные разветвления, возле которых поток образует изгибы. На средней и нижней Лене (в пределах Центрально-Якутской низменности) русло проходит вдоль правого борта долины, ниже устья Алдана — отрогов гор Верхоянья, характеризуется медленным врезанием, имеет сравнительно узкую пойму $B_{\Pi} = 2-4b_p$ (здесь B_{Π} — ширина поймы, b_p — ширина русла). Оно слабоустойчивое, морфологически очень сложное параллельно-рукавное, в котором основные рукава, разделяясь архипелагами островов, образуют пологие излучины. Нижний Амур, аккумулирующий наносы, напротив, имеет широкую пойму $B_{\Pi} > 10-15b_p$, отличается более простыми разветвлениями — одиночными и сопряженными, отдельными излучинами и наличием трех участков раздвоенного русла. При слиянии с р. Усури левый рукав раздвоенного русла — собственно Амур — образует серию излучин, а правый — Казакевича протока — сначала меандрирует, а после слияния с Усури имеет прямолинейное русло с излучинами меженного русла, огибающего побочни. Два других участка раздвоенного русла ниже по течению морфологиче-

ски очень сложны и имеют рукава, образующие пологие излучины или вторичные разветвления. Сложные разветвления с извилистыми рукавами характерны для Анадыря. На многих меандрирующих реках (Амгуэма и др.) излучины осложнены разветвлениями или обладают разветвленно-извилистыми руслами.

Особо на карте выделены дельтовые разветвления, в которых как магистральные (основные по водности) рукава, так и многочисленные второстепенные (маловодные) меандрируют или формируют островные разветвления, в которых рукава, огибая острова, также образуют излучины. В отличие от «речных» условий, параметры излучин дельтовых рукавов и рукавов разветвлений зависят не только от рассредоточения стока в дельтах, которое приобретает направленный характер, но и от специфических гидравлических явлений, связанных с возникновением в многоводную фазу режима кривой спада уровней, стонно-нагонных и приливно-отливных колебаний уровня моря. В частности, на участках дельтовых рукавов, где выклинивается систематический подпор от нагонов, излучины становятся заваленными с вершиной, смещенной вверх по течению реки. При этом процесс меандрирования проявляется еще на устьевых барах, где баровые бороздины приобретают извилистость уже при их формировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ распространения на территории России речных русел с меандрирующим (извилистым) руслом и разветвленных русел с рукавами, образующими излучины, показал, что извилистость потока, представляя собой отражение неустойчивости его прямолинейного движения, обуславливает всеобщность процесса меандрирования, проявляющегося на реках с руслом любого морфодинамического типа и размера — от самых малых рек до крупнейших, широкопойменных и врезанных. Наиболее распространены извилистые русла на малых и средних реках, излучины рукавов русловых и пойменно-русловых разветвлений, раздвоенных русел и извилины динамической оси потока, огибающие побочни, в относительно прямолинейных руслах и рукавах разветвлений. В условиях ограниченного развития русловых деформаций (реки протекают в областях, сложенных трудноразмываемыми грунтами) русла рек за длительную (геологическую) историю сформировали врезанные излучины и излучины рукавов разветвлений врезанных русел, или также характеризуются извилистостью динамической оси меженного потока среди побочней в прямолинейном русле. Это, в свою очередь, определило географию пространственного развития различных форм проявления процесса меандрирования.

В южной части Восточно-Европейской равнины абсолютно преобладают на реках излучины русла (меандрирующие русла), которые на больших реках осложнены островами на их крыльях или в привершинных частях; на нижней Волге это характерно для основного правого рукава, тогда как маловодная Ахтуба (левый рукав раздвоенного русла) меандрирует. На севере ЕТР неоднократно чередуются врезанные и свободные излучины, разветвления больших рек (Северная Двина, Мезень, Печора) с излучинами рукавов во врезанном и широкопойменном русле, что связано со сложным геолого-геоморфологическим строением их бассейнов, а в Карелии и на Кольском полуострове исключительное развитие в скальных грунтах получили врезанные излучины. Западная Сибирь — территория сплошного распространения широкопойменных русел с преобладанием меандрирования, в том числе рукавов раздвоенного русла средней и нижней Оби и часто встречающихся в среднем течении пойменно-русловых разветвлений.

Восточные районы России отличаются широким развитием врезанных излучин и излучин рукавов разветвленных врезанных русел, чередующихся со свободным меандрированием, развивающимся на реках низменностей или, как на малых реках Средне-Сибирского плоскогорья, при их формировании в маломощной толще рыхлых отложений, перекрывающих скальные грунты. Для средней и нижней Лены характерны наиболее сложные русловые разветвления, в которых излучины рукавов образуются вне зависимости от типа разветвлений.

Выявленные особенности развития процесса меандрирования в руслах разного морфодинамического типа следует учитывать при различных видах освоения водных, минеральных и других речных ресурсов и прибрежных территорий.

Работа выполнена по планам НИР кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского научного фонда (18-17-00086 П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Русловые процессы на реках СССР.** М-б 1:4 000 000 / Под ред. Р.С. Чалова. — М.: ГУГК СССР. — 1990. — 4 л.
2. **Русловой режим рек Северной Евразии** / Под ред. Р.С. Чалова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. — 336 с.
3. **Davis W.M.** Meandering valleys and unafit rivers // *Ann. Assoc. Am. Geogr.* — 1913. — Vol. 3. — P. 3–28.
4. **Потапов М.В.** Винтовое движение жидкости в прямом открытом канале прямоугольного сечения // Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехническое применение. — М.: Сельхозиздат, 1936. — С. 102–154.
5. **Великанов М.А.** Образование речных излучин // *Изв. АН СССР. Сер. геологич.* — 1950. — № 3. — С. 59–93.
6. **Кондратьев Н.Е.** Русловые процессы в меандрирующих руслах // *Тр. ГГИ.* — 1954. — Вып. 44 (98). — С. 5–43.
7. **Федоров Н.Н.** Экспериментальные исследования процессов меандрирования // *Тр. ГГИ.* — 1954. — Вып. 44 (98). — С. 14–38.
8. **Попов И.В.** О формах перемещения речных излучин // *Тр. ГГИ.* — 1956. — Вып. 56 (110). — С. 36–57.
9. **Розовский И.Л.** Движение воды на поворотах открытого русла. — Киев: Изд-во АН УССР, 1957. — 188 с.
10. **Leopold L.B., Wolman M.G.** River meanders // *Geol. Soc. Am. Bull.* — 1960. — Vol. 71. — P. 769–794.
11. **Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В.** Смещение речных излучин // *Речной транспорт.* — 1965. — № 1. — С. 34–36.
12. **Экспериментальная геоморфология.** Вып. 2 / Под ред. Н.И. Маккавеева — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. — 173 с.
13. **Ackers P., Chariton F.G.** Meander geometry arising from varying flows // *Journ. Hydrology.* — 1970. — Vol. 11, N 3. — P. 230–252.
14. **Yang C.T.** On river meanders // *Journ. Hydrology.* — 1971. — Vol. 13, N 3. — P. 231–233.
15. **Knighton A.D.** The meander problem // *Geography.* — 1977. — Pt. 2, N 275. — P. 106–111.
16. **Callander R.A.** River meandering // *Ann. Rev. Fluid. Mech.* — 1978. — Vol. 10. — P. 129–158.
17. **Fredsoe I.** Meandering and braiding of river // *Journ. Fluid Mech.* — 1978. — Vol. 84, N 4. — P. 609–624.
18. **Nanson D.C.** Regional trend to meander migration // *Journ. Geology.* — 1980. — N 1. — P. 100–108.
19. **Матвеев Б.В.** Влияние геолого-геоморфологических факторов на образование и морфологию речных излучин // *Геоморфология.* — 1985. — № 3. — С. 51–57.
20. **Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.** Речные излучины. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 371 с.
21. **Маккавеев Н.И.** Русловой режим рек и трассирование прорезей. — М.: Речиздат, 1949. — 202 с.
22. **Проектирование судовых ходов на свободных реках** / Под ред. Н.И. Маккавеева // *Тр. ЦНИИЭВТ.* — 1964. — Вып. 39. — 262 с.
23. **Чалов Р.С.** Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. — М.: КРА-САНД, 2011. — 960 с.
24. **Чалов Р.С.** Извилистость или разветвленность потоков и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава русел // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География.* — 2021. — № 3. — С. 3–14.
25. **Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.** Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 372 с.
26. **Чалов Р.С., Чалова Е.Р.** География русел рек, разветвленных на рукава, на территории России // *Изв. РГО.* — 2019. — Т. 151, вып. 6. — С. 20–34.
27. **Чалов Р.С.** Русловые процессы на реках СССР и методика их мелкомасштабного картографирования // *Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 10: Русловые процессы и наносы.* — Кн. 1. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — С. 259–266.
28. **Чалов Р.С., Беркович К.М., Кирик О.М., Сваткова Т.Г.** Применение картографического метода при изучении русловых процессов // *География и природ. ресурсы.* — 1986. — № 3. — С. 99–108.
29. **Маккавеев Н.И.** Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 347 с.
30. **Карасев И.Ф.** Русловые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 288 с.
31. **Великанов М.А.** Русловой процесс. — М.: Госфизматиздат, 1958. — 395 с.
32. **Завадский А.С.** Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. — 27 с.
33. **Чалов Р.С., Чалова А.С., Голубцов Г.Б.** О терминологии и классификации разветвлений русел равнинных рек // *Геоморфология.* — 2021. — Т. 52, № 3. — С. 48–63.
34. **Чалов Р.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Завадский А.С., Рулёва С.Н.** Гидролого-морфодинамическая характеристика разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ханты-Мансийского автономного округа — Югры) // *География и природ. ресурсы.* — 2022. — № 2. — С. 102–114.
35. **Иванов В.В.** Условия формирования, гидролого-морфологические зависимости и деформации относительно прямолинейных неразветвленных русел: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — 26 с.

Поступила в редакцию 16.05.2022

После доработки 10.07.2022

Принята к публикации 05.04.2023