

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.03 : 551.435.122

БЕРКОВИЧ К. М., ЗАЙЦЕВ А. А., НОВАКОВСКИЙ Б. А., СВЕНТЭК Ю. В.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПРИ МОРФОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ РУСЛА И ПОЙМЫ**

Дистанционные методы в географических исследованиях получают сейчас большое распространение, охватывая все более новые отрасли науки, связанные главным образом с изучением динамики природных объектов. Дистанционное зондирование в основном базируется на использовании фото- или других изображений земной поверхности. Во многих случаях фотограмметрические способы позволяют выполнять морфометрический анализ: построение графиков, диаграмм, профилей, разрезов и др. непосредственно по аэрокосмическим снимкам или изображениям. Доступность аналитической фотограмметрической обработки извлекаемой информации, ее простота при использовании ЭВМ позволяют легко автоматизировать графические построения. Это относится, в частности, к морфометрическому анализу русел и пойм, для которого целесообразность привлечения фотограмметрии существенно возрастает благодаря возможности получения по аэро- и космическим снимкам расстояний, длин, высот, площадей, объемов, углов и других количественных параметров русла и поймы. Заманчивым представляется использование фотограмметрических приемов в целях непосредственного извлечения из дистанционных данных тематической информации [1]. Таковы морфометрические характеристики русловых форм разных порядков и их динамика, всевозможные морфометрические показатели рельефа поймы и русла. Это не исключает составление по аэрокосмическим материалам специальных карт русловых процессов [2, 3], поскольку использование карт является средством познания действительности [4, 5].

В настоящее время при использовании материалов дистанционного зондирования в целях морфометрического анализа русла и поймы преобладает качественная информация. Интерпретация снимков часто ограничивается визуальным или полуинструментальным дешифрированием. Например, в ПНР по результатам визуального дешифрирования разновременных черно-белых аэрофотоснимков русла нижней Вислы составлены картосхемы русла и распределения речных течений, дана классификация разновидностей песчаных отмелей, их параметров и динамики. В Италии космические фотоснимки и изображения, полученные с ИСЗ «Skylab» и «Landsat», успешно использовались для анализа геоморфологических особенностей дельты р. По [6]. Здесь особый интерес представляют результаты цифрового анализа космических изображений с помощью ЭВМ. Это дало возможность обнаружить зависимость между поперечным геологическим сечением дельты и цифровым профилем, полученным путем арифметического умножения яркостей изображений двух различных спектральных зон. В СССР известны работы по составлению специальных карт русловых процессов с использованием космических снимков [3], а также по изучению типов русел рек в пределах крупных регионов [7, 8].

В задачи современной фотограмметрии входит обеспечение географических исследований необходимыми количественными геометрически-

ми и производными от них картометрическими данными. В этом смысле возможности фотограмметрической обработки аэро- или космических съемочных материалов хорошо известны. Она обладает мощным аналитическим аппаратом для решения таких задач. Однако классические аналитические фотограмметрические процедуры при морфометрическом анализе русла и поймы еще не нашли должного применения.

Известно, что проведение картометрических работ по снимкам невозможно без привлечения аналитических фотограмметрических приемов. Для морфометрического анализа и автоматического картографирования необходимо сформировать базы картометрических данных — информационные модели русла и поймы, хранящиеся в памяти ЭВМ. Основа картометрической базы данных — ее модель. Классификацию баз данных рекомендуется проводить в соответствии с избранной моделью [9]. Применительно к фотограмметрическим методам обработки аэро- или космических фотоснимков модель базы конкретного природного объекта, например русла и поймы, представляет собой цифровую модель местности, которая формируется путем фиксации тематических картометрических данных в дискретных точках. Критерий качества цифровых моделей — способ и плотность расположения дискретных точек, а также условия надежности соответствующей математической интерполяции между ними.

Для случаев двухмерного или трехмерного морфометрического анализа цифровые модели местности могут быть получены по серии дистанционных фотоснимков известными методами планового или пространственного аналитического фотограмметрического сгущения [10]. Цифровая информация, хранящаяся в памяти ЭВМ, обрабатывается с помощью соответствующих программ, позволяющих осуществлять фильтрацию некачественных исходных данных по косвенным признакам, подбирать и модифицировать различные технологические схемы построения и последующего преобразования цифровых моделей. Алгоритмы, по которым создаются цифровые модели местности, должны обеспечивать получение конечной цифровой информации, пригодной для последующих морфометрических расчетов и их автоматизированной картографической интерпретации.

Так, для пространственного триангулирования по независимым моделям в целях получения исходных цифровых картометрических данных имеем следующую формулу для аналитического построения одиночной модели по двум взаимоперекрывающимся фотоснимкам земной поверхности

$$r_i = \frac{B}{p_{ii}} \begin{bmatrix} x_{ii}^1 \\ \frac{y_{ii}^1 + y_{ii}^2}{2} \\ f \end{bmatrix},$$

где $r_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}$ — вектор координат дискретных точек построенной модели,

x_{ii}^1, y_{ii}^1 — трансформированные значения координат левого снимка данной стереоскопической пары, y_{ii}^2 — трансформированное значение ординаты правого снимка, p_{ii} — трансформированное значение продольного параллакса. Последующий аналитический «монтаж» независимых моделей в единый маршрут с фотографическим изображением поймы и русла значительной протяженности (зависит от масштаба исходных аэрофотосъемочных материалов) в существующую опорную сеть может вестись на основе следующих уравнений пространственных аффинных преобразований совместно с уравнением цифровых результатов построения маршрута:

$$r'_i = AB r_i + r_0,$$

где $r'_i = \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix}$ — вектор аффиннопреобразованных координат, $A = \Psi(\omega, \alpha, \kappa)$ — матрица трех последовательных вращений, B — диагональная матрица аффинных параметров k, l, m ; $r_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$ — вектор начала координат.

Это уравнение нелинейно по причине нелинейности функции $\Psi(\omega, \alpha, \kappa)$. При условии, что известны приближенные значения его составляющих A^0, B^0 и r^0 ($A = A^0 + dA, B = B^0 + dB, r_0 = r^0 + dr_0$), оно решается последовательными приближениями. Если количество фототочек больше трех, то будем иметь $r_i^{0'} + dr_i' = r_i' + v_i$ или $dr_{in}' + r_{in}^{0'} - r_{in}' = v_i$ — для опорных точек и $dr_{jn}' - dr_{jp}' + r_{jn}^{0'} - r_{jp}' = v_j$ — для связующих точек. Здесь v_i — вектор поправок координат i -того фотопункта (опорной точки), v_j — вектор поправок координат связующей точки j , r_{jn} — следующий вектор j -той связующей точки в n -й модели, r_{jp} — следующий вектор j -той связующей точки p -й модели.

Эти векторные уравнения решаются методом наименьших квадратов, в результате чего получают вероятнейшие значения поправок к неизвестным $dk, dl, dm, d\omega, d\alpha, d\kappa, dX_0, dY_0, dZ_0$. После вычисления исправленных значений определяемых неизвестных $k, l, m, \omega, \alpha, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$ они подставляются в исходное векторное уравнение пространственных аффинных преобразований и если они его не удовлетворяют с заданной точностью, процесс итераций повторяется.

Как уже отмечалось, возможности качественного анализа материалов аэрофотосъемочного дистанционного зондирования в целях морфометрического анализа ограничены. Можно только оценить морфологический тип речного русла, приблизительно охарактеризовать рельеф и распространение поймы; сравнение разновременных съемок дает возможность установить некоторые особенности и скорости деформаций русла. Вместе с тем необходима оценка характера русловых процессов на реках крупных регионов, где нет возможности провести детальные полевые работы и где имеются лишь материалы сетевых наблюдений на отдельных водопостах гидрометслужбы за режимом уровней и расходов воды. Водопосты располагаются довольно редко, но по ним, рассчитывая модули стока воды и наносов, можно оценить гидрологический режим конкретных участков рек или группы рек. Для установления особенностей переформирований русла материалов этих наблюдений недостаточно. Качественный анализ аэрофотоснимков также не может дать представления о характере развития русловых процессов, так как позволяет определить в лучшем случае только тип русла и поймы и основные их морфометрические характеристики.

Существующие в настоящее время гидроморфологические зависимости, в большом количестве получаемые по материалам натуральных и экспериментальных исследований и связывающие гидрологические и гидравлические характеристики потока (гидравлический уклон, расход воды) с морфометрией (глубина, ширина, форма живого сечения) и динамикой русла, включают в себя эмпирические коэффициенты, значения которых меняются на различных реках. Чтобы по гидроморфологическим зависимостям получить достоверные данные о характере русловых деформаций, необходимо на основе точного определения морфометрических характеристик русла и поймы вычислить соответствующие данной реке или району эмпирические коэффициенты. Поясним это на примере зависимости радиуса кривизны излучин от расхода воды и уклона в виде $R = kQ_{\text{ср}}^{\frac{1}{2}} I^{-1}$, где $Q_{\text{ср}}$ — руслоформирующий расход воды, I — гидравлический уклон [11]. Рекомендуемое при этом значение $k = 1,4 \cdot 10^{-3}$ довольно точно соответствует кривизне излучин некоторых рек бассейна Оки и Волги, однако совершенно не подходит для рек с тем же типом русла, но других регионов. Также обстоит дело с зависи-

мостями для определения скоростей размыва берегов рек (т. е. формой проявления горизонтальных деформаций), для оценки скорости смещения побочней и других крупных грядовых форм рельефа и т. п. Таким образом, для многих научных и практических целей необходима разработка методики сбора точной информации по морфометрии русла и поймы рек на основе количественного анализа материалов аэрофотосъемки методами фотограмметрии и первичной обработки такой информации с применением ЭВМ.

Данные по морфометрии русла и поймы, необходимые для проведения руслового анализа и разработки прогноза деформаций, помимо получаемых по гидрометрическим постам включают в себя характеристики продольного профиля реки, ширину русла по длине реки, кривизну русла и динамической оси потока, точные границы поймы, ее поперечный и продольный профили. Все эти показатели должны получаться с максимальной возможной степенью точности и детальности без производства полевых работ. Соответствующая обработка разновременных аэрофотоснимков позволяет получить данные о динамике русла и поймы. С уменьшением размеров рек повышаются требования к точности извлечения морфометрических параметров из-за уменьшения размаха русловых деформаций.

Продольный профиль реки — это важнейшая гидравлическая и геоморфологическая характеристика, определяющая энергию потока. Почти всегда продольный профиль рек ступенчатый. «Ступени» продольного профиля имеют различную протяженность от десятков и сотен километров до нескольких сотен метров, причем мелкие ступени как бы вложены в более крупные. Это объясняется тем, что ступенчатость продольного профиля связана с различными причинами: литологической неоднородностью горных пород, прорезаемых рекой, тектоническим планом территории, морфологией дна речных долин, формами русла (излучины, узлы разветвления), грядовыми формами рельефа русла (перекатами). Выявление ступенчатости продольного профиля, особенно самых малых ступеней, открывает широкие возможности для количественной оценки энергетических условий руслоформирования.

Ширина русла заметно изменяется по длине даже небольших отрезков рек. Это в значительной мере связано с изменением транспортирующей способности потока при руслоформирующих расходах. Там, где она ослаблена, формируется относительно широкое русло, на участках увеличения транспортирующей способности русло сужается. Ширина русла, в среднем связанная с водностью (расходом) реки, является регулятором транспортирующей способности потока. Для расширенных участков свойственны пониженные уклоны свободной поверхности в паводье и меньшие глубины, чем для суженных. В межень уклоны в расширениях русла возрастают, и скорости течения увеличиваются.

Извилистость характерна для всех водных потоков. Импульсом для ее развития служит движение вдоль реки побочней — крупных прибрежных скоплений наносов грядового типа. При возникновении изгибов динамической оси потока, обтекающего побочни, в потоке создается своеобразное скоростное поле (зоны ускорения и замедления потока) и циркуляционные течения. Если берега реки легко поддаются размыву, а побочни движутся сравнительно медленно, формируются изгибы всего русла — меандры (или излучины). При высокой устойчивости берегов в относительно прямолинейном русле создаются изгибы динамической оси (стержня) потока между побочнями. Степень выраженности циркуляционных течений и особого скоростного поля зависит от параметров излучин и изгибов динамической оси потока — радиуса кривизны, шага излучин и изгибов, соотношения ширины русла и его радиуса кривизны, распределения уклонов свободной поверхности на излучинах и изгибах.

Пойма, являясь продуктом русловых деформаций, играет большую роль в их развитии. Направленность вертикальных русловых деформаций обуславливает особенности поперечного профиля пойм. При преобладании врезания формируются ступенчатые поймы, состоящие из не-

скольких разновысотных ярусов. В условиях аккумуляции развиваются одноярусные, овальные или наложенные поймы. Пойма служит естественным регулятором внутригодовой неравномерности стока, аккумулируя в период половодья значительную часть расхода воды. Степень естественной «регуляции» стока зависит от ширины и поперечного профиля поймы. В условиях, когда горизонтальные деформации русла развиваются свободно, не ограничиваясь прочными, трудно- или неразрываемыми породами, формируются широкие поймы, особенно характерные для участков сравнительно ослабленной транспортирующей способности потока половодья, когда блуждание русла усиливается. Если горизонтальные деформации русла ограничены трудноразрываемыми породами, формируются узкие поймы или беспойменные участки долин.

Затопление поймы или одной из ее ступеней приводит к уменьшению скоростей течения в основном русле («кинематический эффект»), русловые деформации при этом замедляются; по мере увеличения слоя воды на пойме скорости течения в русле вновь возрастают, что приводит к интенсификации русловых деформаций. По поперечным и продольным профилям поймы и отдельных ее ступеней устанавливаются гидравлические характеристики пойменного потока и периоды относительного снижения и возрастания интенсивности русловых деформаций, а также точно выявляются места оттока полых вод в пойму и их слива обратно в русло. С первыми обычно связаны зоны аккумуляции наносов, со вторыми — участки эрозий. Кроме того, по поперечным пойменным профилям устанавливают изменение по длине транспортирующей способности потока половодья, затапливающего той или иной уровень поймы, и извилистость половодного потока. Получение указанных характеристик — необходимый элемент многих русловых исследований, требующих обычно выполнения большого объема полевых работ, включающих такие трудоемкие, как мензульные съемки, нивелирования и т. д. Применение дистанционных методов позволяет ограничиться лишь рекогносцировочными исследованиями и при этом обеспечить исследователя более полной количественной информацией.

Рассмотрим на примере небольшого участка русла р. Протвы (2,6 км) в ее среднем течении некоторые результаты дистанционных морфологических исследований¹, где их можно сопоставить с данными натурных наблюдений. Участок находится в пределах Боровской учебно-научной станции МГУ и представляет собой объект комплексных географических исследований. С 1980 г. здесь ведутся в числе других исследования русловых процессов. Это позволило сравнить данные, полученные дистанционно (по аэрофотосъемочным материалам), с измеренными в природе и таким образом установить их репрезентативность. В эксперименте использовались черно-белые аэрофотосъемочные материалы (3 снимка — 2 стереопары), полученные при строгом соблюдении соответствующих метрических фотограмметрических требований. Аэрофотосъемка выполнена в масштабе 1 : 11 500 с высоты около 800 м. Путем аналитической фотограмметрической интерпретации аэрофотоснимков получена цифровая модель русла и поймы этого участка р. Протвы, по которой с помощью ЭВМ произведены необходимые картометрические определения и морфометрические расчеты.

По наблюдениям по водопосту Спас Загорье средний многолетний модуль стока в бассейне реки составляет 5,3 л/с км². По наблюдениям на временном водопосту Сатино (непосредственно в районе исследования) максимальный измеренный расход воды 145 м³/с, минимальный 4 м³/с. Амплитуда уровней более 4 м. Определенный по измеренным

расходам параметр К. В. Гришанина $M_r = \frac{H(gB)^{1/4}}{Q_{cp}^{1/2}}$, связывающий расход воды с шириной русла, 1,12 (H — средняя глубина, B — ширина русла). Принимая этот параметр постоянным для всего участка, мож-

¹ В экспериментально-вычислительных работах принимали участие И. В. Дрозд и С. И. Лукьянов.

но определить по известной ширине глубину русла при данном расходе.

Русло реки представлено двумя свободными излучинами, вынужденной излучиной и относительно прямолинейными отрезками в верхней, средней и нижней частях участка. Излучина и прямолинейный участок осложнены подводными отмелями. Берега сложены слабо устойчивыми породами: песками, супесями, легкими суглинками, дно реки во многих местах галечное или щебнистое. Средний уклон, вычисленный по натурным данным, около 0,0004, на весь участок исследования падения составляет около 1,04 м; такая же (1,0 м) величина падения уровня по данным обработки аэроснимков. Вместе с тем распределения уклонов по длине (т. е. продольного профиля) получить не удалось, так как колебания уклонов на соседних участках оказываются нередко меньше, чем точность определения высотных отметок водной поверхности.

Ширина межженного русла сильно изменяется по длине реки — от 7,5 до 28 м. Наиболее узкое русло (8—9 м) характерно для излучин верхнего относительно прямолинейного отрезка (8—10 м), несколько расширено русло (до 15—19 м) на среднем и особенно нижнем прямолинейных отрезках (ниже вынужденной излучины). В некоторых местах ширина русла сильно увеличивается, что связано с развитием подводных отмелей и островов. Аналитическая фотограмметрическая интерпретация аэрофотоснимков с последующими картометрическими и морфометрическими расчетами позволила получить детальную картину изменения ширины русла, что невозможно при применении других методов исследования. Расчеты средней глубины русла для расхода воды, при котором выполнена съемка (около 6 м³/с), дали результат, близкий к натурным данным.

Изучение извилистости русла — весьма трудоемкая задача, требующая проведения точной съемки и длительного времени на измерения. Выполнение ее методами фотограмметрии и картометрии позволило в извилистости русла Протвы выявить ранее неизвестные закономерности. Оказалось, что верхний прямолинейный отрезок длиной 700 м характеризуется ярко выраженной извилистостью динамической оси потока — семь изгибов длиной по 100—150 м обоего знака (вправо и влево) с радиусами кривизны от 150 до 300 м. Другие относительно прямолинейные отрезки характеризуются извилистостью динамической оси значительно меньшей кривизны (радиусом 400—700 м), причем в некоторых местах кривизна составляет столь малую величину, что русло может считаться прямолинейным. С вышеизложенным связан факт малой ширины русла на верхнем прямолинейном отрезке, где активно идет процесс зарождения излучин и можно ожидать высоких темпов горизонтальных деформаций. Установлено, что кривизна извилин динамической оси по длине почти постоянна, в то время как кривизна развитых излучин сильно меняется по их длине. Так, на свободной излучине в верхней части участка радиус кривизны на протяжении 150 м вначале уменьшается со 120 до 94 м, а затем возрастает до 800 м, то же отмечается и на вынужденной излучине, где радиус кривизны убывает со 140 до 76 и возрастает до 380 м в пределах 200-метрового отрезка русла. При этом вполне определенно выявляется прямая связь радиуса кривизны с шириной русла. Вместе с тем обнаруживается целый ряд отступлений от правил, связанных с микроформами рельефа русла, которые при традиционном русловом анализе не обнаруживаются.

Количественная интерпретация аэрофотоснимков позволила установить превышение бровки поймы над межженным урезом реки. Для среднего уровня поймы оно составило 1,2—2,8 м, для высокого — 3,0—4,5 м. Выявлены локальные понижения бровок поймы, служащие местами оттока и слива вод половодья из русла в пойму и обратно, определена их величина, по которой можно рассчитать в зависимости от уровня воды размеры притоков.

Полученные площади живых сечений дна долины при уровне затопления средней и высокой пойменных ступеней выявили резкое их изменение по длине реки. В соответствии с этим могут быть вычислены из-

менения средних скоростей течения и транспортирующей способности потока. Так, при затоплении средней пойменной ступени до бровки высокой поймы площади живого сечения изменяются от 160 до 550 м². Принимая расход воды постоянным (около 150 м³/с) обнаруживаем, что средние скорости течения потока половодья сильно изменяются по длине. Местное снижение скоростей течения характерно для свободной излучины верхней части участка (менее 0,3 м/с), что коррелируется с измеренными здесь в период половодья малыми уклонами свободной поверхности — $9 \cdot 10^{-5}$. Для вершины вынужденной излучины характерно резкое уменьшение площади живого сечения, увеличение средней скорости до 0,6 м/с. Измеренные здесь уклоны составляют $6,6 \cdot 10^{-4}$. Наконец, на нижнем прямолинейном участке средние скорости постоянно убывают (0,4—0,5 м/с), величина уклонов — $1,9 \cdot 10^{-4}$.

Изложенное выше показывает, что возможностью метода количественной интерпретации аэрофотоснимков посредством аналитической фотограмметрии для оценки русловых процессов велики, и первые результаты показывают большую сходимость с материалами натуральных исследований. Метод может самостоятельно применяться для рек, где нет возможности провести натурные наблюдения, а также как вспомогательный на других объектах, где такие работы ведутся.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Новаковский Б. А.* Фотограмметрические аспекты совместного использования аэрокосмического и картографического методов в географических исследованиях.— Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1983, № 4, с. 73.
2. *Кирик О. М., Чалов Р. С.* Принципы и методы составления карт русловых процессов на крупных реках.— Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1980, № 5, с. 18.
3. *Кирик О. М., Сваткова Т. Г., Чалов Р. С.* Изучение русловых процессов на примере Вилюя.— В кн.: Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1980, с. 113.
4. *Салищев К. А.* Взгляд на картографию в аспекте научно-технической революции.— В кн.: Пути развития картографии. М.: Изд-во МГУ, 1975, с. 21.
5. *Берлянт А. М.* Картографический метод исследования. М.: Изд-во МГУ, 1978. 254 с.
6. *Politi V., Zilioli E.* Geomorphic features in the Po river delta (Italy), by the means of different space platforms.— Photo-Interpretation, 1980, v. 19, № 3, p. 41.
7. *Прокачева В. Г., Смищенко Д. В., Усачев В. Ф.* Дистанционные методы гидрологического изучения зоны БАМа. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 224 с.
8. *Смищенко Д. В.* Вопросы исследования телевизионных снимков с ИСЗ «Метеор» для оценки типов руслового процесса.— Тр. ГГИ, 1984, вып. 299, с. 55.
9. *Сербенюк С. Н., Тихунов В. С.* Автоматизация в тематической картографии. М.: Изд-во МГУ, 1984. 108 с.
10. *Лобанов А. Н.* Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 552 с.
11. *Маккавеев Н. И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 379 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
10.XII.1985

REMOTE SOUNDING APPLIED TO CHANNEL AND FLOODPLAIN MORPHOMETRY ANALYSIS

BERKOVICH K. M., ZAITSEV A. A., NOVAKOVSKY V. A., SVENTEK Yu. V.

Summary

Methods, theory and practical aspects of aerial remote sounding data analytical interpretation are considered as applied to quantitative data gathering on river channel and floodplain morphometry. Photogrammetrical approaches to channel process study are shown to be effective. Experiments results are in good agreement with nature studies data.