

5. Solntsev N.A. Ucheniye o landshafte: Izbrannyye trudy [The doctrine of the landscape: Selected Works], Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 383 p. (in Russian).
6. Surkov F.A., Arkhipova O.E. Matematicheskiy instrumentariy, informatsionnyye tekhnologii i komp'yuternyye programmy dlya podderzhki prinyatiya resheniy po obespecheniyu ustoychivogo razvitiya regiona [Mathematical tools, information technologies and computer programs to support decision-making for sustainable development of the region], Ekologicheskaya strategiya razvitiya pribrezhnykh regionov: geografiya, okruzhayushchaya sreda, naseleniye. Mediko-ekologicheskiye i sotsial'no-ekonomicheskiye problemy pribrezhnykh regionov. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, YUNTS RAN, 2015, pp. 187–197 (in Russian).
7. Haase G. For the disposal and labeling of natural potentials, PGM, 1978, No. 122, pp. 113–125.

УДК 528.88: 528.856: 502.065: 004.9

DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-156-172

О.В. Зенкин¹, В.А. Мелкий²

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫХ РУСЛОВЫХ ФОРМ

АННОТАЦИЯ

В статье представлена методика расчёта оптимальной кривизны русла рек, использующая кинематическую модель структуры потока, базирующаяся на представлениях о дискретной природе руслового процесса. Приведён аналитический вид уравнения движения речного потока, с помощью которого может выполняться имитационное моделирование, связанное с поиском динамически устойчивой формы речного русла, и которое может обеспечивать контроль уровня воды в реках. Исходными данными для иллюстрации приведённых в статье методов моделирования послужили изображения, полученные со сканера MODIS на спутнике Terra, для нижнего течения р. Кур, которая сливаясь с р. Урми, образует Тунгуску – левый приток р. Амур.

Предложен модифицированный геометрический метод, применимый для расчёта углов наклона касательной к кривой и нормали в тех ситуациях, когда наблюдаемые на спутниковых изображениях пункты располагаются на координатной сети нерегулярно и, когда три точки, лежащие на кривой русла реки, не образуют равнобедренного треугольника.

Модель связывает тангенциальные и радиальные составляющие действующих на водный поток сил (центробежную, силы трения и тяготения). Кривизна k , обратная радиусу, в модели в явном виде выражается через параметр ϕ – угол, под которым уклон реки направлен по отношению к оси X . В качестве решения ищут значение угла ϕ , при котором достигается максимума корреляционная функция. Предполагается, что форма русла «неправильная» и может быть изменена таким образом, чтобы получившаяся кривая лучше коррелировала с расчётной кривой. Морфометрические зависимости для макроформ позволяют создавать ряд морфологических методов расчёта деформаций и рассчитывать смещение берега в любом створе излучины.

Предложенная методика опробована также по спутниковому снимку высокого разрешения. Представленные методы расчёта используются в качестве основы для проектов

¹ Технический нефтегазовый институт Сахалинского государственного университета; Россия, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290; e-mail: mazur_i@mail.ru

² Технический нефтегазовый институт Сахалинского государственного университета; Россия, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290; e-mail: vamelkiy@mail.ru

гидрологических геоинформационных систем, ориентированных на прогнозирование морфодинамических процессов и морфологической эволюции речных систем. Определение закономерностей развития русловых форм и количественных связей между их параметрами основываются на модельных расчётах «правильных» форм русел.

В результате исследования создана и проверена на практике методика имитационного моделирования, позволяющая выявлять динамически устойчивые формы речного русла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

моделирование, геоинформационная система, мониторинг природных процессов, дистанционное зондирование, русловые процессы, меандрирование

ВВЕДЕНИЕ

Изыскательские промерные и гидрометрические работы связаны с измерением глубин при разных уровнях воды, измерением направлений и скоростей течений, определением твёрдых взвесей, мутности, донных отложений в отобранных пробах. В силу сезонной изменчивости физико-географических условий (снеговые и дождевые паводки), а также годовой изменчивостью климата эффективность такого рода изысканий остается невысокой. Русловые процессы, размыв берегов, аккумуляция взвешенных наносов и перемещение русла делают значительную часть материалов изысканий бесполезными.

Формирование русла реки происходит в половодье и при паводках, при высоком уровне воды и в районах с высокой скоростью течения. Поскольку изыскательские работы в период половодья не проводятся, то, соответственно, за рамками исследований оказываются и те параметры кинематической структуры потока, при которых происходит переформирование русла. При падении пика паводка и установлении среднего уровня динамическая ось потока существенно меняется, уменьшается радиус кривизны, вместо одного переката образуется несколько перекатов меньших размеров. Выявление истинного положения вешей, необходимое для завершения инженерно-гидрометеорологических изысканий, невозможно без мониторинга ситуации [Соловьев, 1995]. Для любых труднодоступных территорий целесообразно использовать данные дистанционного зондирования.

Применение спутниковых данных и ГИС-технологий предоставляет возможность анализа исследовательских материалов о русловых процессах для паводковых периодов [Кошкарёв, Тикунов, 1993]. Технологии позволяют разрабатывать более эффективные способы предупреждения наводнений, заторов и зажоров льда, приносящих большой экономический ущерб.

Проведённое исследование было нацелено на создание методики имитационного моделирования, позволяющей выявлять динамически устойчивые формы речного русла, которая также даёт возможность контролировать уровень воды в реках [Зенкин, Мелкий, Малинников, Долгополов, 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для понимания направленности трансформации речного русла нужно, как можно точнее, определить радиусы кривизны его излучин и определить силы, действующие на берега при движении водного потока. Точное определение линий кривизны речных русел можно произвести по картографическим материалам и спутниковым изображениям. Поэтому основными методами в выполненном исследовании кроме математических, были картографический анализ, дешифрирование космических снимков.

Распознавание на аэрокосмических изображениях водоёмов и водотоков, как правило, не вызывает затруднений, так как изображение водной поверхности резко отличается от окружающих участков суши на изображениях любых масштабов. Результаты дистанционных измерений, осуществляемых с помощью бортовой информационно-измерительной

аппаратуры аэрокосмической системы, представляют собой зафиксированные в аналоговой или цифровой форме характеристики электромагнитного излучения, отражённого от земной (водной) поверхности или собственного излучения этой поверхности [Зенкин и др., 2015].

При дистанционном зондировании Земли наиболее широко используются данные, полученные в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитных волн. Фотографические снимки, поступающие с пилотируемых кораблей, орбитальных станций, автоматических спутников отличаются качеством изображения, и разрешением на местности, измеряемым метрами и даже десятками сантиметров.

Наиболее доступными являются инфракрасные снимки сканера MODIS среднего разрешения со спутника Terra, которые могут применяться для исследования русловых процессов как крупных и средних рек, так и небольших. Приведённые в статье модельные эксперименты, выполнялись для расчёта динамически устойчивой кривизны русла реки Кур, которая после слияния с р. Урми образует Тунгуску – левый приток Амура (рисунок 1). Информация для экспериментов была получена на основе данных инфракрасного снимка MODIS 250-метрового разрешения.

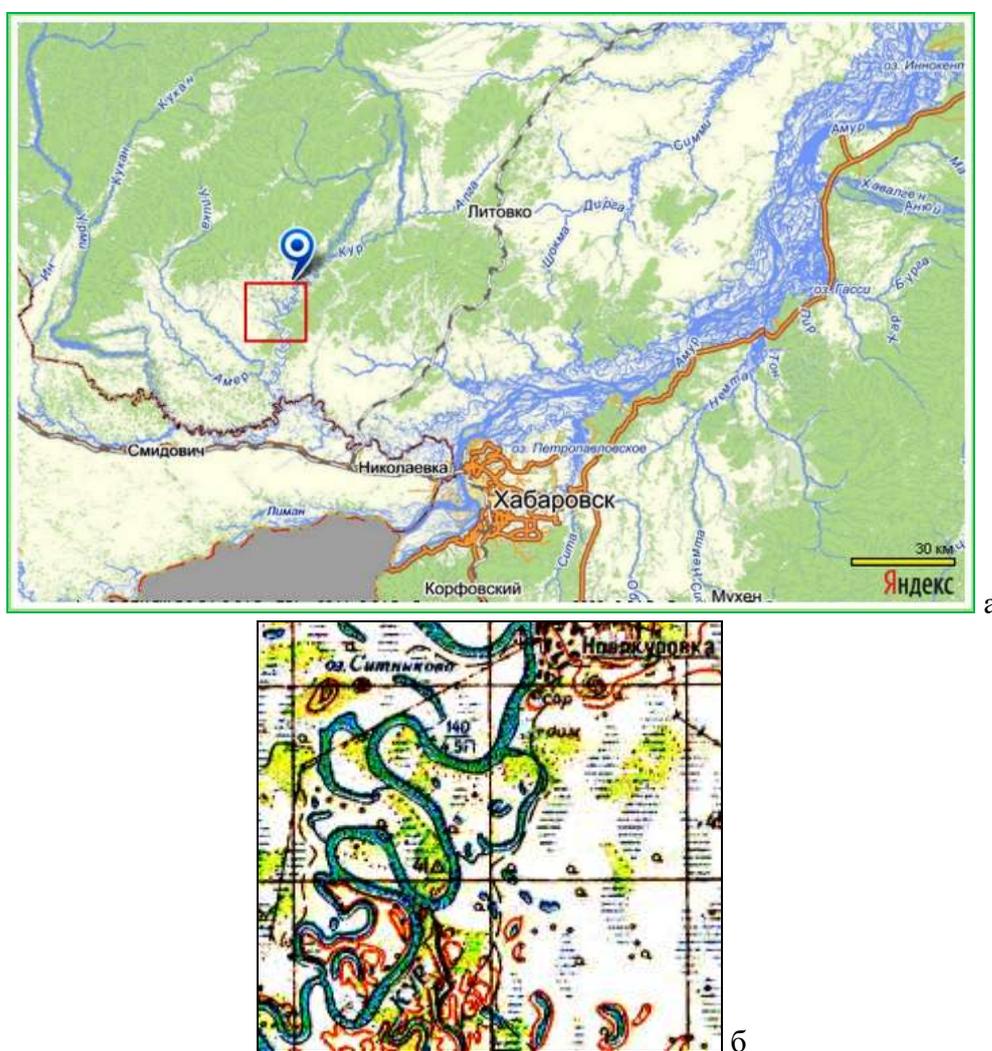


Рисунок 1. Местоположение исследуемого района:

a – обзорная карта низовьев реки Кур; б – река на топографической карте (топографическая съёмка 1983 года)

Figure 1. The location of investigated area:

a – general map of the lower reaches of the Kur river; b – river on topographic map (topographic survey, 1983)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёты, выполняемые для выявления устойчивой формы речного русла

Расчёт кривизны и углов наклона касательной α и нормали n может основываться на методе решения системы 3-х уравнений, в которые входят в качестве переменных координаты точек и центра окружности, описанной через три точки, и геометрическом методе, в котором требуются лишь координаты трёх точек [Sokolowsky, 1974]. Для расчёта углов наклона касательной к кривой и нормали в случае применения спутниковых данных, когда наблюдаемые пункты могут располагаться на координатной сети нерегулярно, предложен модифицированный геометрический метод, применимый в тех ситуациях, когда три точки, пересекающие кривую русла реки, не образуют равнобедренного треугольника.

Для определения кривизны русла в точке, соответствующей спутниковому пикселу, используются два соседних пиксела, соответствующих руслу реки.

Кривизна кривой не может быть рассчитана для крайних точек кривой, поэтому в последующих расчётах крайние точки не применяются. Алгоритм расчёта кривизны и угла наклона касательной точке по двум соседним точкам основан на известных геометрических свойствах (рисунок 2). Пусть a , b , c – длины сторон треугольника, образованного тремя ближайшими точками кривой. Радиус, проведённый из центра окружности, делит сторону c треугольника на два отрезка X и Y . Длина радиуса

$$R = abc / 4(p(p-a)(p-b)(p-c))^{0,5}, \text{ где } p = 0,5(a+b+c).$$

Для определения угла L в общем случае, когда треугольник не является равнобедренным, используем следующие геометрические свойства:

$$\begin{aligned} \sin(u/2 + g/2) &= c / 2R \\ \sin(u/2) / \sin(g/2) &= b / a. \end{aligned}$$

Обозначим $\bar{A} = 0,25 \times R \times a$; $\bar{B} = b/a$, тогда решив после несложных выкладок систему уравнений относительно g , в качестве решения системы уравнений получим выражение для угла $L = (180 - g)/2$ направления радиуса – вектора в искомой точке:

$$L = 90 - \arctg(\bar{A} / (\bar{B} \pm \sqrt{1 - \bar{A} \times \bar{A}})).$$

Это значение далее используется для расчёта углов наклона касательной α и нормали n относительно оси абсцисс. Угол наклона нормали n будет равен углу наклона стороны «а» треугольника минус «L» плюс 180. Угол наклона касательной рассчитывается через n и равен $(n - 90)$.

Моделирование речного потока

При теоретическом рассмотрении потока реки порой берётся идеальный прямолинейный участок реки или канала с одинаковой формой русла, в предположении отсутствия внешних факторов, влияющих на структуру течения. В речных условиях таких идеальных случаев никогда не наблюдается. В связи с этим возникает некоторый отрыв отдельных теоретических работ от практики. Среди методов исследования речных потоков заслуживает внимания «аналоговый» метод, в основе которого лежит подбор гидрологических параметров «правильных» русел. «Подражание» естественным руслам рек с динамически устойчивыми формами – важный метод исследований, который находил применение для выправления участков русел рек.

Опыт выправления русел на Волге, Днепре, Зее [Обидиентова, 1975; Пиньковский, 1967; Попов, 1963] показал, что наряду с удачными решениями имеются многочисленные примеры, когда строительство запруд, дамб, крепление берегов не приводило к желаемым

результатам. Основной причиной неэффективности этих мероприятий, как отмечается в литературе [Соловьёв, 1995], является динамическая неустойчивость русел. Вследствие этого первостепенным шагом в направлении изучения динамических свойств является учёт сил и связей, действующих на элементы водного потока.

Элементы водного потока участвуют во вращательном движении. Кривизна русла, обусловленная балансом сил в каждой точке кривой, является важнейшей характеристикой водного потока. Извилистость реки является её естественным состоянием. Попытки «выпрямления» русла приводили к созданию условий для динамической неустойчивости потока [Simonovic, Ahmad, 2007]. И, наоборот, придание руслу реки криволинейных очертаний, по аналогии с природными, нередко приводило к получению динамически устойчивых русел. Отмеченные в литературе попытки классификации динамически неустойчивых участков рек по радиусу кривизны, без учёта направлений и величин действующих сил, в сущности, приводили авторов к не совсем достоверному выводу, что участки со слишком малым радиусом являются неустойчивыми, что также является довольно далёким от действительности утверждением.

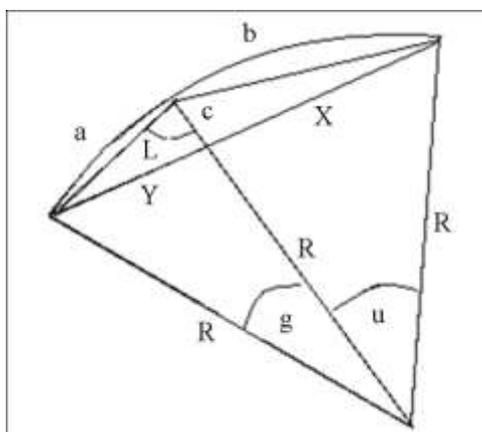


Рисунок 2. *Вспомогательное геометрическое построение для нахождения углов наклона касательной и нормали*
Figure 2. *Auxiliary geometric construction for finding the angles of inclination of the tangent and normal*

В данной работе показано, что радиус кривизны для динамически устойчивого участка одной и той же реки может быть как большим, так и малым, и кривизна определяется балансом действующих сил. В качестве таковых в модели (рисунок 3) рассмотрены центробежная, вызванная вращением Земли вокруг своей оси, сила трений (шероховатость русла, скоростные коэффициенты), сила тяготения (уклоны поверхности).

Модельные расчёты проводились для русла р. Кур в нижнем течении. Исходная информации для имитационных экспериментов – это сведения об 11 опорных точках русла реки, полученных при нанесении оси потока на снимке со спутника Terra (сканер MODIS) 250-метрового разрешения, выполненном в инфракрасном диапазоне, для которых имеются данные географической привязки – значения широты и долготы (рисунок 4).

В плановой проекции (рисунок 5), ось Y ориентирована в широтном направлении, а ось X – по долготе. Течение реки направлено по часовой стрелке. Будем считать, что этот участок естественного русла реки, не стеснён берегоукрепляющими сооружениями, спрямляющими русло, и имеет относительно устойчивое состояние скорости воды и русла.

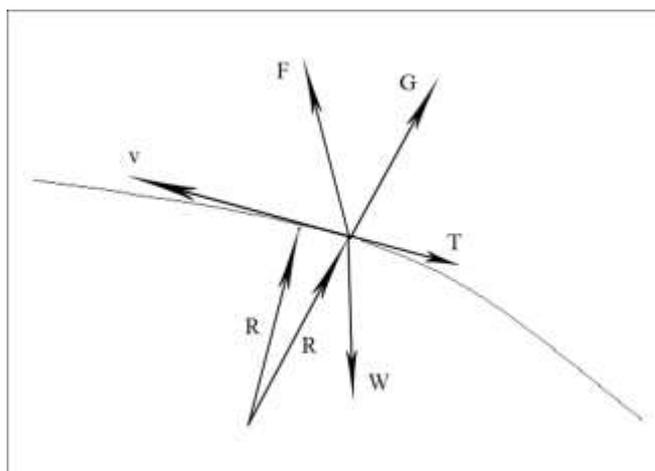


Рисунок 3. Движение элемента водного потока относительно оси вращения:
R – радиус вращения; *v* – скорость; *W* – центробежная сила вращения Земли; *T* – сила трения; *F* – сила тяготения Земли; *G* – центробежная сила.

Figure 3. The movement of the element of the water flow relative to the axis of rotation:
R – radius of rotation; *v* – velocity; *W* – centrifugal force of rotation of the Earth; *T* – frictional force; *F* – gravitational force of the Earth; *G* – centrifugal force.

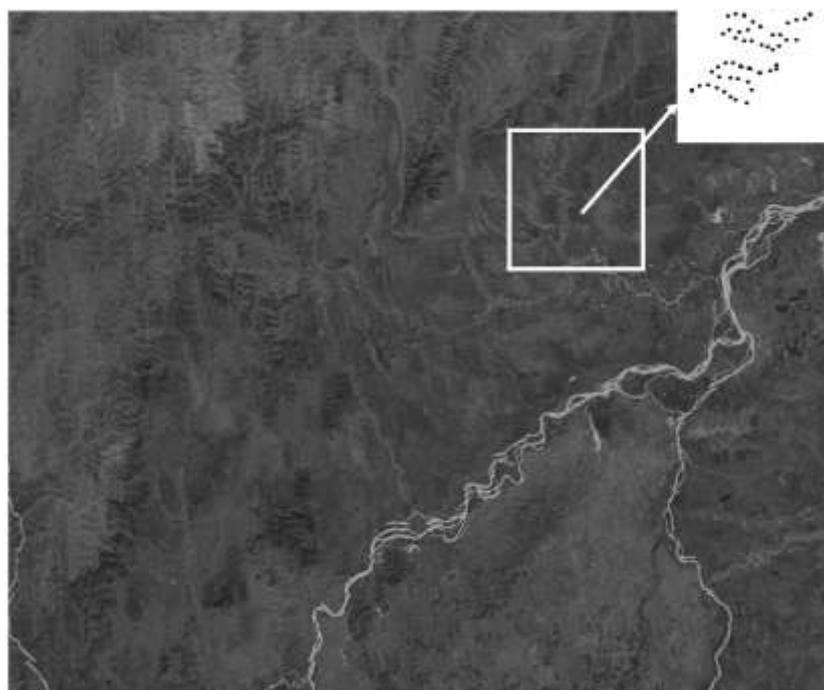


Рисунок 4. Фрагмент инфракрасного снимка, выполненного сканером MODIS, с разрешением 250 м (2 канал) для территории в бассейне р. Амур.

Прямоугольником выделен исследуемый участок русла реки Кур

Figure 4. Fragment of infrared image, taken by MODIS scanner, with resolution of 250 m (2 channel) for the territory in the Amur River basin.

The rectangle highlights investigated area of the Kur riverbed

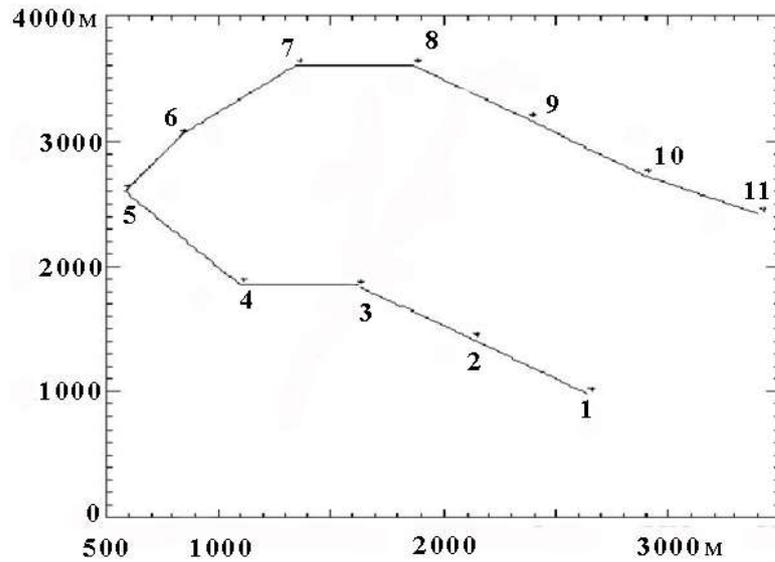


Рисунок 5. Изображение исследуемого участка русла реки в плане, полученное путем трансформации опорных точек растра космического снимка в картографическую проекцию

Figure 5. The image of the investigated area of the riverbed in plan, obtained by transforming the control points of a satellite image raster into a map projection

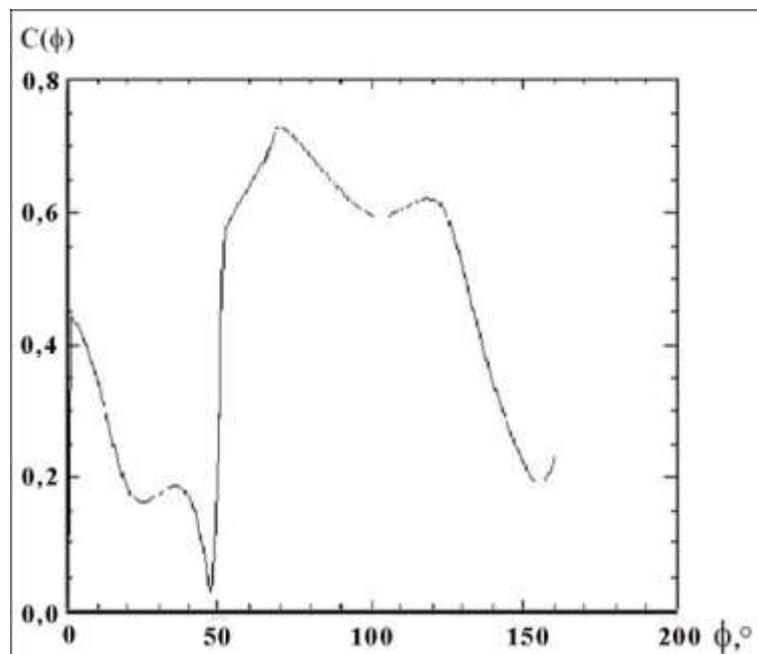


Рисунок 6. Корреляционная функция между расчётными и наблюдаемыми значениями кривизны k . Максимум функции (0,72) достигается при значении угла равно $\phi_{max}=70^\circ$

Figure 6. Correlation function between the estimated and the observed values of the curvature k . Maximum of the function (0,72) is achieved when the value of the angle is $\phi_{max}=70^\circ$

Таблица 1. Координаты точек кривой русла реки
Table 1. Coordinates of points of the riverbed curve

№	X	Y	Λ	φ
1	88640,759	6210988,890	134,27712	48,81218
2	88125,341	6211425,453	134,27249	48,81477
3	87611,036	6211862,039	134,26787	48,81736
4	87096,731	6211862,039	134,26325	48,81736
5	86581,313	6212608,839	134,25862	48,82179
6	86830,673	6213047,173	134,26086	48,82439
7	87347,204	6213608,610	134,26550	48,82772
8	87862,622	6213608,610	134,27013	48,82772
9	88379,153	6213171,933	134,27477	48,82513
10	88893,458	6212735,279	134,27939	48,82254
11	89407,763	6212425,083	134,28401	48,82070

Таблица 2. Расчёт параметров регрессионной модели русла реки
Table 2. Calculation of parameters of the riverbed regression model

№	k	v ₁	v ₂	k _{opt}	α	n
2	0,000000	-2,70902	-0,987650	0,000757368	229,739	139,739
3	-0,00115820	19,1169	6,54730	-0,00117573	67,0056	157,006
4	0,00129401	-3,49699	-1,24398	0,000825863	234,042	144,042
5	0,00148335	-0,388096	-0,36687	0,000566691	181,211	91,2111
6	0,000356152	0,314569	-0,358543	0,000523776	142,538	52,5381
7	0,00125289	0,883132	-0,456302	0,000497670	118,551	28,5512
8	0,00115211	-19,5538	6,69653	0,00113595	67,0724	-22,9276
9	3,08356e-00	-2,70925	0,987723	0,000594467	49,7406	-40,2594
10	-0,000251574	3,49017	-1,24174	0,000405773	234,012	324,012

Таблица 3. Расчёт факторов регрессионной модели
Table 3. The calculation of the regression model factors

№	k	a ₀	a ₁ v ₁	a ₂ v ₂	k _{opt}
2	0,000000	0,000513111	0,000162803	8,14544e-005	0,000757368
3	-0,00115820	0,000513111	-0,00114886	-0,000539975	-0,00117573
4	0,00129401	0,000513111	0,000210157	0,000102595	0,000825863
5	0,00148335	0,000513111	2,33233e-005	3,02572e-005	0,000566691
6	0,000356152	0,000513111	-1,89045e-005	2,95701e-005	0,000523776
7	0,00125289	0,000513111	-5,30733e-005	3,76326e-005	0,000497670
8	0,00115211	0,000513111	0,00117512	-0,000552282	0,00113595
9	3,08356e-006	0,000513111	0,000162817	-8,14604e-005	0,000594467

При теоретическом рассмотрении действующих сил в качестве уравнения движения исследовалась двухпараметрическая регрессионная модель вида:

$$k(\phi) = a_0 + a_1 v_1(\phi, \alpha) + a_2 v_2(\phi, \alpha) \quad (1)$$

Эта модель связывает тангенциальные и радиальные составляющие действующих на водный поток сил (центробежную, силы трения и тяготения). Кривизна k (величина, обратная радиусу) в модели в явном виде выражается через параметр ϕ – угол, под которым уклон реки направлен по отношению к оси X , α – угол наклона касательной к кривой относительно оси X , n – угол наклона нормали к кривой относительно оси X – выражается через $\alpha, \dots, a_0, a_1, a_2$ – параметры регрессии, $v_1(\phi, \alpha) = \cos(\phi - \alpha) / \cos(\phi - n)$; $v_2(\phi, \alpha) = \cos(\alpha + 90) - (\cos(n + 90) / v_1(\phi, \alpha))$. В качестве решения ищется значение угла ϕ , при котором достигает максимума корреляционная функция:

$$C(\phi) \rightarrow \overset{\text{max}}{\phi}.$$

Значение ϕ_{max} , может быть найдено по карте визуально, что используется для проверки адекватности модели. В качестве аналитического решения задачи было найдено значение $\phi_{\text{max}} = 70^\circ$ (рисунок 6), что примерно соответствует направлению уклона реки. Корреляционная функция при этом значении угла составила 0,72. В связи с тем, что русло реки имеет не вполне «правильную» форму, а также с учётом возможных ошибок позиционирования спутниковых пикселей (~ 125 м), достичь больших значений корреляционной функции, по-видимому, не представляется возможным.

Входная и выходная информация модели

Координаты опорных точек, расположенных на кривой русла определялись по данным дистанционного зондирования. В таблице 1 для каждой точки кривой в колонках 2 и 3 приведены координаты проекции в метрах, а в колонках 4 и 5 – географические координаты в десятичном формате. Модифицированная кривая русла, получена смещением осей:

$$X = X - 86000; Y = Y - 6210000.$$

В таблице 2. приведена кривизна k для точек кривой, по которым проводились регрессионные расчёты, модельная кривизна k_{opt} при значении $\phi_{\text{max}} = 70^\circ$, а также исходные

данные наблюдаемых факторов для регрессии v_1 , v_2 . Рассчитанные параметры регрессии $a_0 = 0.000513111$, $a_1 = -6.00967e-005$, $a_2 = -8.24730e-005$ получены при значении корреляции $S(\phi)$ между расчётными $k_{\text{орт}}$ и наблюдаемыми значениями кривизны k равном 72% (рисунок 6).

В таблице 3 приведены данные расчёта значений по каждому фактору модели (v_1 , v_2).

Расчёт динамически устойчивой кривизны русла может производиться различными методами, в зависимости от практических обстоятельств. Следует отметить, что натуральное уравнение кривой является нелинейной функцией, связывающей кривизну кривой с углом наклона касательной – y_x' , и в общем случае не имеет параметрического представления в прямоугольных координатах. В двух методах, которые приведены ниже, применяются эвристические подходы к получению «правильных» кривых. В обоих методах предполагается, что форма русла «неправильная» и может быть изменена таким образом, чтобы получившаяся кривая лучше коррелировала с расчётной кривой. В первом методе поочередно модифицируются координаты опорных точек кривой. В нашем примере (рисунок 7) поиск модифицированных точек по первому методу производился при следующих условиях:

- Применение пошагового поиска модифицированных точек в квадрате со стороной 150 м с центром в опорной точке. Стороной квадрата задаётся возможный шаг эрозии берега.
- Применение критерия отбора подходящих точек вида $\delta k / \delta r$, где δk – изменение кривизны в оптимальном направлении при смещении точки от центра квадрата на величину δr .
- Координаты первых двух точек не меняются, поскольку по одной точке подсчитать кривизну невозможно.

Применение пошаговой корректировки позволило в приведённом примере повысить корреляцию до 0,84. Этот метод может найти практическое применение, например, если необходимо учесть ситуацию, когда берег реки в каком-то месте укрепляется береговыми сооружениями и становится не размываемым (в примере – участок между точками 1 и 2), и необходимо при этих условиях определить форму русла.

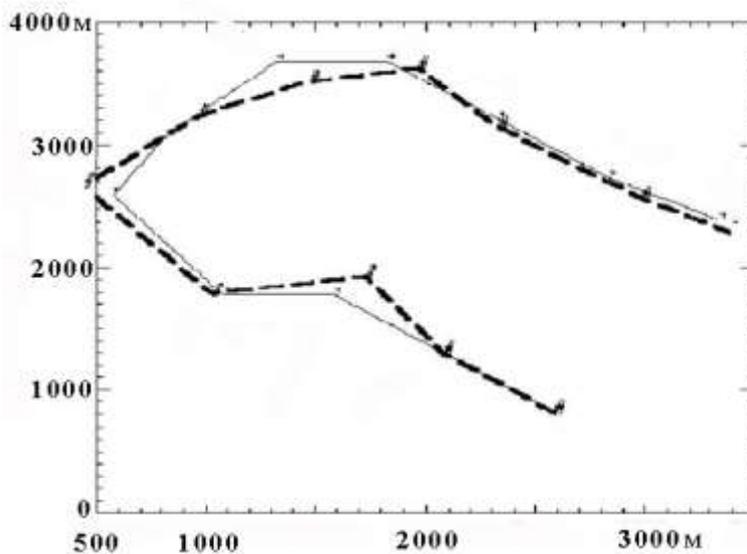


Рисунок 7. Модифицированная кривая (пунктирная линия).
 Корреляция между расчётными и модельными значениями кривизны k составляет 0,84 при значении угла равно $\phi_{\text{max}} = 70^\circ$

Figure 7. Modified curve (dashed line).
 The correlation between estimated and model values of the curvature k is 0.84 when the value of the angle is $\phi_{\text{max}} = 70^\circ$

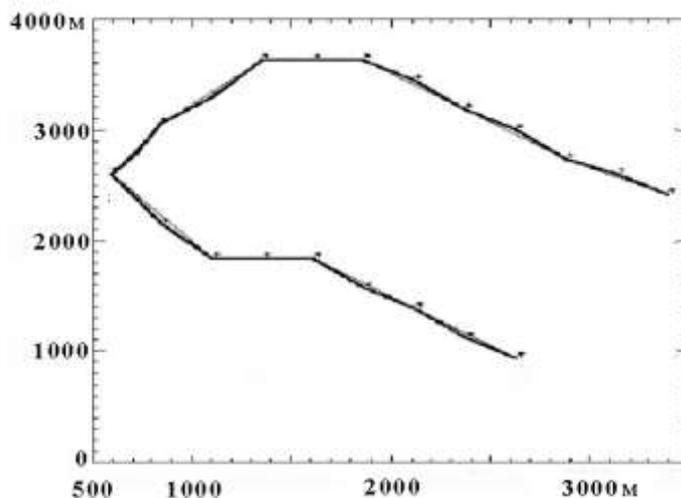


Рисунок 8. Модифицированная кривая, полученная добавлением промежуточных точек.

Корреляция между расчётными и модельными значениями кривизны k составляет 0,73 при значении угла равно $\phi_{max} = 70^\circ$.

Figure 8. Modified curve, obtained by adding intermediate points.

The correlation between estimated and model values of curvature k is 0,73, when the value of angle is $\phi_{max} = 70^\circ$.

Второй метод, который также может применяться для получения модифицированных кривых, состоит в дальнейшей дискретизации кривой – добавлении промежуточных точек – без изменения координат опорных точек. При этом необходимо учитывать, что добавление точки изменяет кривизну линии в соседних с ней точках, поэтому пересчитывать эффект добавления точек требуется для всей кривой в целом. В расчете, приведённом ниже, добавлялись промежуточные точки с координатами:

$$x_i = (x_{i-1} + x_{i+1}) / 2;$$

$$y_i = 0,5(y_{i-1} + y_{i+1}) \pm s(y_{i-1} - y_{i+1}).$$

Сглаженная кривая получена добавлением промежуточных точек при $s = 0,1$ (рисунок 8). Этим методом также может быть повышена корреляция между расчётной и модельной кривой. Для кривой, приведённой на рисунке 8, корреляция составила 0,73.

Возможно также применение методов, комбинирующие два приведённых выше подхода.

Количественная оценка скорости плановых деформаций русла

Количественное оценивание особенностей деформаций русла реки и её поймы, типизация русловых процессов имеют большое значение и дают хорошие практические результаты при изысканиях. Переход к учёту типа руслового процесса способен существенно уточнить морфометрические и гидроморфологические зависимости. Требования инженерного применения обуславливают необходимость разработки надёжных количественных методов оценки развития русловых процессов [Зенкин, Мелкий, Малинников, Долгополов, 2015]. Скорость плановых деформаций излучин рек определяют путем получения длинных статистических рядов по ряду характеристик меандрирования излучин рек и построением по этим характеристикам связей с определяющими факторами. Такими характеристиками являются, например, шаг гряды, её высота, скорость сползания, расстояние между смежными точками перегибов русла, углы входа и разворота русла, степень развитости излучины и др. [Маккавеев, 1955].

Выявляемые морфометрические зависимости для макроформ позволяют создавать ряд морфологических методов расчёта деформаций и рассчитывать смещение берега в любом створе излучины. Однако статистическая неоднородность эмпирических

гидроморфологических зависимостей позволяет оценивать лишь некоторые средние значения при различных интерпретациях (линейная, энергетическая), при разных дефицитах уклонов для прямолинейных и меандрирующих русел, и это не позволяет говорить о высокой статистической достоверности найденных эмпирических связей.

В данной работе предлагается количественный подход, при котором величина возможного смещения берега «у» рассчитывается в каждой опорной точке кривой русла по разности эмпирического и расчётного значения кривизны: $y = k - k_{opt}$ (таблица 4).

Таблица 4. Расчёт планового смещения русла
Table 4. The calculation of target channel displacement

№	K	k_{opt}	$Y = k - k_{opt}$
2	0.000000	0.000757368	-0.000757
3	-0.00115820	-0.00117573	0.000017
4	0.00129401	0.000825863	0.000469
5	0.00148335	0.000566691	0.000917
6	0.000356152	0.000523776	-0.000167
7	0.00125289	0.000497670	0.000755
8	0.00115211	0.00113595	0.000017
9	3.08356e-006	0.000594467	-0.000591

Построенная кривая даёт картину деформаций русла в плане (рисунок 9). Величина возможной деформации берега и направление деформации указаны стрелками. Длина стрелки соответствует скорости плановой деформации (смещению берега). Наибольшим смещениям (величина изменения кривизны) берег реки подвержен в точках 2, 5 и 7. Это, в целом, соответствует качественной картине цикличности развития излуины при свободном меандрировании.

Степень развитости исследуемой излуины можно классифицировать как среднюю. Следует отметить, что развитие процесса деформации русла многовариантно, зависит от рельефа исследуемого участка реки, крупности береговых отложений, руслового и пойменного аллювия и требует выполнения модельных имитационных экспериментов, учитывающих указанные факторы.

Применение закона сохранения энергии для расчёта соотношения

Форма кривой русла может также дать представление о соотношениях величин действующих сил. Для такого рода расчётов представляет интерес нахождение перемещения, поскольку работа силы трения пропорциональна этому параметру, а остальные силы и связи потенциальные. Найденное значение $\phi_{max} = 70^\circ$ может использоваться для определения работы на перемещение водного потока между точками i и j кривой (рисунок 10). Обозначим через L (~1600 м) и H (~1800 м) перемещение водного потока в поле центробежной силы и силы тяготения. Путь, пройденный потоком между точками i и j кривой $S \sim 6000$ м. Тогда по

закону сохранения энергии $W \times L - G \times H \sim T \times S$. Что при подстановке известных значений для S , W , L , H даёт соотношение между силами G и T (уклоном поверхности и трением)

$$T \sim -0.008 + 0,3G.$$

Соотношения, полученные геометрическим путем, могут использоваться для проверки корректности проведённых изыскательских работ, а иногда этой информации достаточно для того, чтобы не проводить дополнительные изыскательские работы.

Результатом выполненного исследования является создание методики определения числовых характеристик динамически устойчивых («правильных») русловых форм.

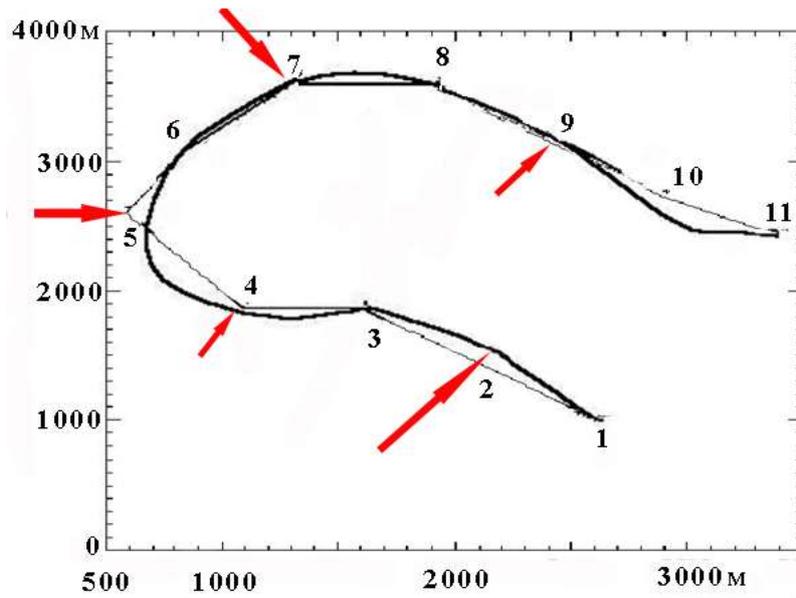


Рисунок 9. Деформации русла реки в плане
Figure 9. Deformation of riverbed in plan

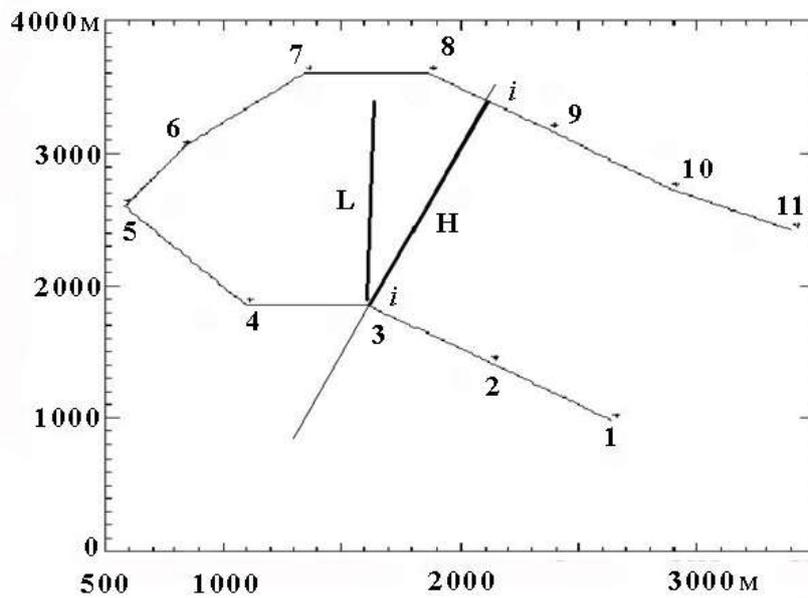


Рисунок 10. Геометрическое определение соотношения между действующими силами
Figure 10. Geometrical definition of the ratio between operating forces



Рисунок 11. Места размыва берега (точки 1-2), определённые по методике прогноза «правильной» формы русла, которые подтвердились при проверках по свежим снимкам
Figure 11. Locations of shore erosion (points 1-2), defined by method of forecast the “correct” shape of the channel, which were confirmed by tests on fresh images

Практическая проверка модели

В процессе исследования выполнялось определение параметров русловых форм по снимкам системы Terra (рисунок 4). Для проверки методики использовалось изображение, полученное по спутниковому снимку более высокого разрешения (рисунок 11). На участке размыва берега кривизна приведена к «правильным» позициям. В точках 2-3, как и следовало из рассчитанной формы «правильного» русла (рисунок 7), в результате плановых деформаций произошел размыв берега. Причём, размыв произошёл в первой точке, хотя имелись и другие точки, для которых прогнозировался существенный уровень эрозии. Если бы в точке 3 был не возможен размыв берега, то тогда следующей «критической» точкой ниже по течению была бы точка 5.

ВЫВОДЫ

1. Одним из важнейших факторов, влияющих на динамическую устойчивость отдельных участков русла реки, является его кривизна. Извилистость реки является её естественным состоянием. Однако:

- а) показатель извилистости не может быть классифицирующим признаком русловых форм;
- б) величина кривизны участка русла недостаточна, чтобы классифицировать участок русла как устойчивый, или неустойчивый.

2. Помимо кривизны русла, которой определяется действующая на участок русла центробежная сила, при определении кинематической структуры необходимо учитывать и дру-

гие физические силы, вызванные уклоном поверхности Земли и её вращением вокруг оси, а также их баланс.

3. Поскольку все перечисленные силы определённым образом проецируются на плоскость поверхности Земли, то исследование динамически устойчивых русловых форм не может производиться без учёта информации о величинах и направлениях действующих сил, и может проводиться с применением геоинформационных технологий, приспособленных для решения задач прогнозирования «правильных» русловых форм.

4. В силу сезонной изменчивости физико-географических условий (снеговые и дождевые паводки), а также годовой изменчивости климата скорость течения реки и расход воды не остаются постоянными, поэтому любая русловая форма будет всегда относительно неустойчивой. Аналитического решения в прямоугольных координатах уравнение «правильной» в данных условиях динамически устойчивой формы кривой русла не имеет, поскольку в этих координатах невозможно определить критерий устойчивости. Однако в качестве критерия может использоваться отклонение кривизны, найденное из натурального уравнения.

5. Инженерные мероприятия по регулированию потока должны учитывать прогноз плановых деформаций, т. е. подвижности русла, разделения на рукава и протоки при различных типах меандрирования.

Методика, представленная в статье, может применяться в качестве алгоритмической базы, сочетающей как средства графической визуализации, так и оптимизационные модельные расчёты, которые дают возможность контролировать уровень воды в реках, выполнять геоинформационное картографирование затопляемых участков, оценивать деградацию земель прилегающих к реке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкин О.В., Мелкий В.А., Малинников В.А., Долгополов Д.В.* Прогнозирование поверхностного стока половодий и дождевых паводков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2015. – № 3.– С. 79–84.
2. *Кошкарёв А.В., Тикунов В.С.* Геоинформатика. – М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 1993. – 213 с.
3. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в её бассейне. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 346 с.
4. *Обидиентова Г.В.* Формирование речных систем Русской равнины. – М.: Недра, 1975. – 173 с.
5. *Пиньковский С.И.* Типы речных русел Дальнего Востока // Труды Государственного гидрогеологического института. – Л., 1967, вып. 144. – С. 77–117.
6. *Попов И.В.* Русловые переформирования р. Волги на участке Волгоград – Астрахань // Труды Гос. гидрогеологического ин-та. – Л., 1963, вып. 108. – С. 4–67.
7. *Соловьев И.А.* Амуролиманский русловой процесс и водные пути. – Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 1995. – 270 с.
8. *Simonovic S.P., Ahmad S.S.* A New Method for Spatial Analysis of Risk in Water Resources Engineering Management // The Open Civil Engineering Journal, 2007. – Vol. 1. – Pp. 1–12.
9. *Sokolowsky P.* Teories of stream meander causation: a review and analysis. // J. Earth Sci. Rev., 1974. – № 10. – Pp. 121–128.

Oleg V. Zenkin¹, Vyacheslav A. Melkiy²

DEVELOPMENT OF MODEL FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF DYNAMICALLY STABLE FORMS OF RIVER CHANNELS

ABSTRACT

The article highlights the method of calculating the optimum curvature of the river channels using the kinematic model of the flow structure based on the concept of discrete nature of the channel process. It offers the analytic form of the equation of motion of river flow, which can be used simulation modeling for searching dynamically stable form of the river channel, and which can control water level in rivers. The source data for the illustrations of given in the article modeling methods have been served the images received from MODIS on the Terra satellite, for the lower reaches of the river Kur, which merges with the river Urmi, forming the Tunguska river – the left tributary of the Amur.

The modified geometric method can be used to calculate obliquity of tangent to the curve and normal in those situations when observed on satellite imagery points are located on the coordinate of the network irregularly and when three points lying on the curve of the riverbed do not form isosceles triangle.

The model assembles tangential and radial components of the forces acting on the water flow (centrifugal, friction and gravity). Curvature radius is explicitly expressed in the model through the parameter ϕ – gradient angle relative to the axis X. As solution for the value of the angle ϕ is searched, when the correlation function reaches its maximum. It is assumed that the riverbed shape “wrong” and could be modified so that the resulting curve better correlated with calculated curve. Morphometric dependences for macroforms allow creating series of morphological methods for the calculation of deformations and displacement of the shore in any section of meander scroll.

The proposed technique has been tested also on satellite imagery of high resolution. The presented methods of calculation are used as the basis for hydrological projects of geoinformation systems oriented at prediction of morphodynamic processes and morphological evolution of river systems. The determination of regularities of development of bed forms and quantitative relations between their parameters are based on modeling the “right” forms of riverbed.

The research has resulted in establishing and testing methodology of simulation modeling, which allows one to identify dynamically stable form of riverbed.

KEYWORDS:

modeling, geographic information system, monitoring of natural processes, remote sensing, river channel processes, meandering

REFERENCES

1. Zenkin O.V., Melkiy V.A, Malinnikov V.A., Dolgoplov D.V. Prognozirovaniye poverkhnostnogo stoka polovodiy i dozhdevykh pavodkov [Prediction of surface runoff flooding and runoff]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'yomka*, No 3, pp. 79–84 (in Russian).
2. Koshkaryov A.V., Tikunov V.S. *Geoinformatika [Geoinformatics]*. Moscow: Kartogeotsentr-Geodezizdat, 1993, 213 p. (in Russian).
3. Makkaveev N. I. *Ruslo reki i eroziya v eye basseyne [The river channel and erosion in its basin]*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1955, 346 p. (in Russian).
4. Obidientova G.V. *Formirovaniye rechnykh sistem Russkoy ravniny [The formation of river systems of Russian Plain]*. M., Nedra, 1975, 173 p. (in Russian).

¹ Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University; Russia, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Lenin st, 290; e-mail: mazur_i@mail.ru

² Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University; Russia, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Lenin st, 290; e-mail: vamelkiy@mail.ru

5. Pin'kovskiy S.I. Tipy rechnykh rusel Dalnego Vostoka [Types of river channels in the Far East]. Trudy Gosudarstvennogo gidrogeologicheskogo instituta. Leningrad, 1967, Vol. 144, pp. 77–117 (in Russian).
6. Popov I.V. Ruslovyeye pereformirovaniya r. Volgi na uchastke Volgograd – Astrakhan [The bed reformation in the Volga River on the site of the Volgograd – Astrakhan]. Trudy Gosudarstvennogo gidrogeologicheskogo instituta, Leningrad, 1963, Vol. 108, pp. 4–67 (in Russian).
7. Solov'yov I.A. Amurolimanskiy ruslovyoy protsess i vodnyye puti [The Amursky estuary's channel process and waterways]. Vladivostok: TIG DVO RAN, 1995, 270 p. (in Russian).
8. Simonovic S.P., Ahmad S.S. A New Method for Spatial Analysis of Risk in Water Resources Engineering Management. The Open Civil Engineering Journal, 2007, Vol. 1, pp. 1–12.
9. Sokolowsky P. Theories of stream meander causation: a review and analysis, J. Earth Sci. Rev., 1974, No 10, pp. 121–128.

DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-172-182

Nikolaos Karanikolas¹, Ioannis Toumpalidis¹

SOCIAL NETWORKS AS SOURCE OF GEO-CARTOGRAPHIC DATA ANALYSIS

ABSTRACT

The main aim of this paper is to investigate the use of data accessible through social networks on issues pertaining to contemporary needs of geographic and cartographic analysis and configuration of today's urban reality.

Today, with the widespread use of mobile devices and the free and easy access to the Internet, more and more people share information on their activities in social media.

This information may be accompanied by spatial data on the user's location at the time of publication. Following the theoretical framework of participatory planning, which wants the design basis to be the citizen, social media are probably the cradle of this approach and this logic.

The use of such data creates a new perspective on how those involved with the spatial analysis can perceive the choices and needs of people even in real time.

In this paper, we will present the results of digital data correlation with the physical space to take advantage of the various sectors of modern urban centers. The method of collection and visualization of data and the issues have been reasonably created, examined and analyzed in the context of work.

KEYWORDS:

social networks, geographic analysis, urban and participatory planning

INTRODUCTION

As urbanization levels are continuously growing at unprecedented rates, urban areas tend to acquire a very different and complex form. The large concentration of population in cities, although it can offer many socio-economic advantages, is directly related to serious environmental problems [Andrikopoulou *et al.*, 2007]. Difficulties in managing waste, natural resources, transportation, in-

¹ School of Spatial Planning and Development Engineering, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece; *e-mail*: karanik@auth.gr