

УДК 528.873

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКЕ ПОРАЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО СООРУЖЕНИЯ

© 2022 г. А. С. Викторов<sup>1,\*</sup>, М. В. Архипова<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: vic\_as@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 08.04.2022 г.

Цель настоящего исследования – разработка метода использования материалов дистанционных съемок для оценки вероятности поражения линейного сооружения на примере боковой речной эрозии. В основу предлагаемого подхода вероятностной оценки поражения инженерного сооружения боковой эрозией положено то, что процесс боковой эрозии, изгибания и спрямления излучин является одновременно главным фактором формирования морфологической структуры ландшафта аллювиальных равнин. Основание решения – математическая модель морфологической структуры аллювиальных равнин. Проведена значительная проверка модели по материалам космических съемок участков долин, находящихся в различных физико-географических условиях. Общей закономерностью строения ландшафтного рисунка аллювиальных равнин в различных физико-географических условиях является экспоненциальное распределение стрелок пакетов и времени развития излучины, что подтверждается большим экспериментальным материалом. На основе модели морфологической структуры аллювиальных равнин получено в ограниченных условиях решение задачи количественной оценки вероятности поражения линейного сооружения речной эрозией; необходимые параметры могут быть оценены по материалам повторных космических съемок.

**Ключевые слова:** математическая морфология ландшафта, аллювиальные равнины, вероятность поражения сооружений, методы дистанционного зондирования, моделирование, речная эрозия, оценка риска

DOI: 10.31857/S0869780922030080

Многие исследования посвящены оценке вероятности поражения линейных сооружений опасными экзогенными процессами, в частности боковой эрозией рек [4, 5, 11, 12, 14]. Достаточно широко применение нашло и использование материалов дистанционных съемок при изучении речной эрозии [9, 10]. В различных работах исследовалось воздействие различных факторов на исследуемый процесс и риск поражения сооружения [8, 9, 15–19], однако задача не может считаться до конца решенной. Особую сложность данной задаче придает цикличность процесса, связанная с изгибанием и последующим спрямлением излучин, которое затрудняет оценку риска поражения сооружения даже при известной скорости размыва.

Цель настоящего исследования – разработка метода использования материалов дистанционных съемок для оценки вероятности поражения линейного сооружения на примере боковой речной эрозии.

### МЕТОДИКА

В основу предлагаемого подхода вероятностной оценки поражения инженерного сооружения

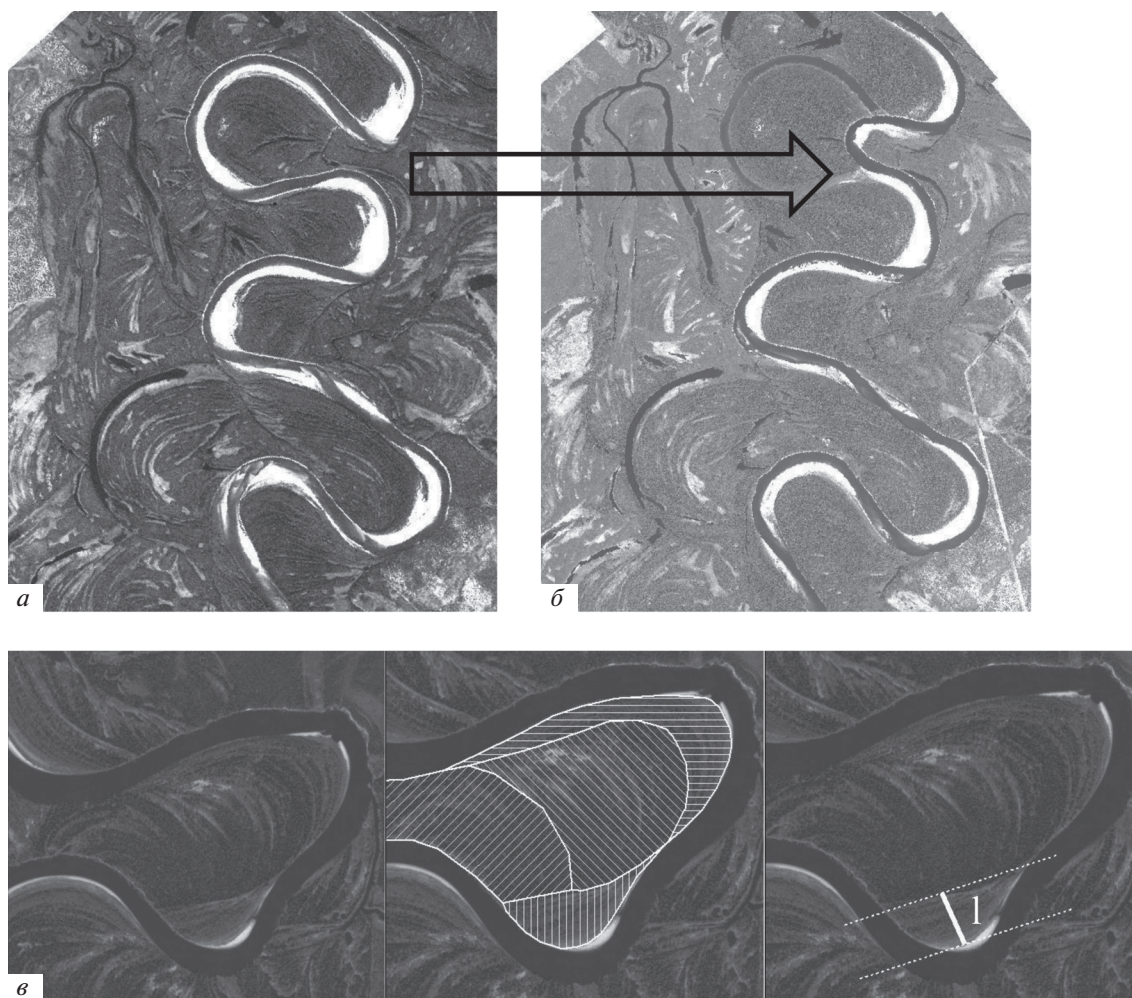
боковой эрозией положено то, что процесс боковой эрозии, изгибания и спрямления излучин является одновременно главным фактором формирования морфологической структуры ландшафта аллювиальных равнин. В силу этого в основу решения поставленной задачи могут быть положены подходы, используемые в математической морфологии ландшафта [1, 3]. Их преимущество заключается в возможности использования материалов космических съемок вместо трудно получаемой контактной информации на основе стационарных наблюдений.

Рассматриваемые аллювиальные равнины представляют собой гривистую поверхность с сочетанием гидроморфных и ксероморфных растительных сообществ, пересеченную руслами меандрирующих рек (рис. 1).

Главнейшими элементами аллювиальных равнин являются:

- старичные (древнестаричные) понижения,
- бывшие прирусловые повышения.

Понижения заняты озерами, болотами и другими гидроморфными комплексами и имеют дугообразную форму, наследуемую от бывших излу-



**Рис. 1.** Изображения аллювиальных равнин на материалах космической съемки: р. Хейгияха: *а* – 1964 г. (проект Согона); *б* – 2017 г., стрелкой показано место спрямления излучины; *в* – излучины р. Юган с пакетами разного возраста: старые – косая штриховка, современные формирующиеся – вертикальная и горизонтальная штриховка. 1 – стрелка в молодом пакете.

чин. Повышения, также представляющие собой дуги, заняты более ксероморфными природно-территориальными комплексами в соответствии с зональными, климатическими и геолого-геоморфологическими условиями. Повышения и понижения, прилегают друг к другу, образуют согласованные по форме и ориентировке пакеты дуг (сегменты) (см. рис. 1*в*). Пакеты разных генераций без видимого порядка и с угловым несогласием прилегают друг к другу, порой “съедают” части друг друга, создавая “рисунок футбольного мяча”, и образуют, таким образом, ландшафтный рисунок аллювиальных равнин.

Один из основных процессов развития аллювиальных равнин – размыв излучин, сопровождающийся их изгибом и завершающийся спрямлением и формированием пакета (см. рис. 1*а, б*). Затем начинается новый цикл изгибания и формирования следующего пакета. Хордой излучины

в рамках настоящей статьи мы называем отрезок, соединяющий соседние точки перегиба (с нулевой кривизной), которые являются границей излучины; стрелками пакета по аналогии со стрелкой дуги мы называем размер пакета в направлении, перпендикулярном хорде основания (см. рис. 1*б*). Интервал времени от спрямления до следующего спрямления назовем циклом развития излучины. Длительность цикла развития излучины регулируется случайными факторами: погодными условиями, локальными особенностями грунтов и др., и может рассматриваться как случайная величина.

Методика исследования включала:

- формирование модели развития процесса и получение результатов ее анализа;
- эмпирическую проверку модели, включающую:

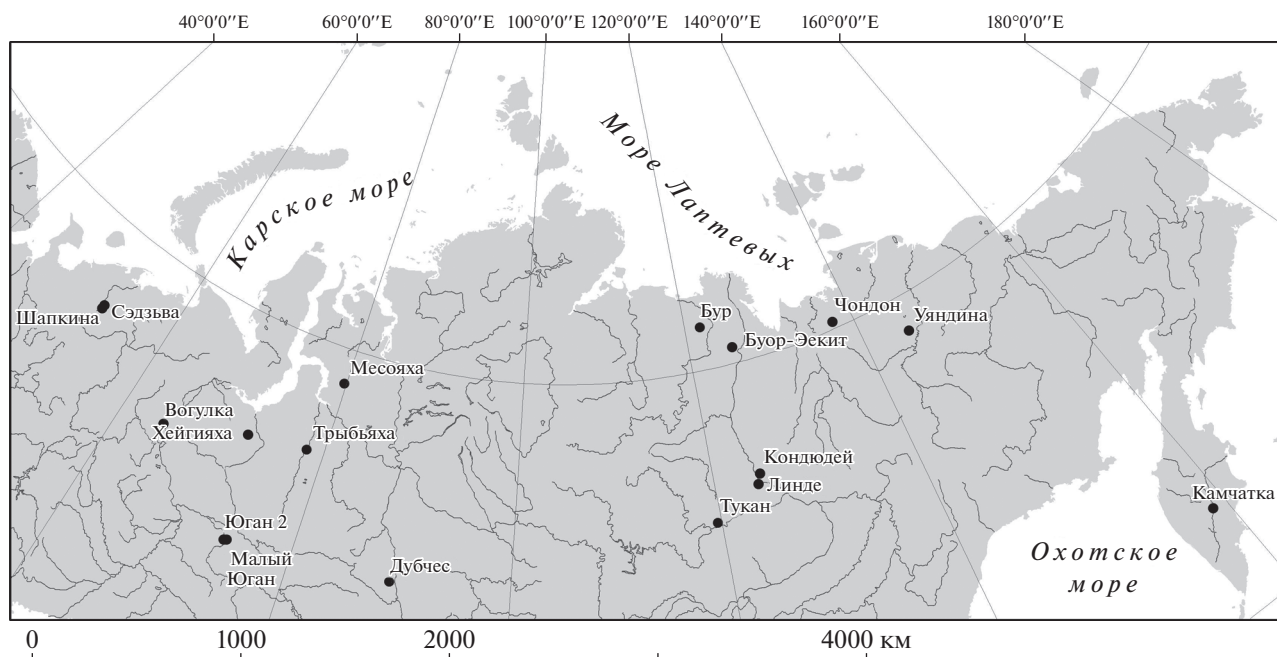


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков.

- выбор ключевых участков,
- измерение необходимых параметров по материалам космической съемки;
  - проверку результатов анализа модели на основе использования статистических критериев;
  - аналитическое решение оценки вероятности поражения линейного сооружения боковой эрозией на основе сформированной модели.

Выбор ключевых участков базировался на соответствии критериям заявленной модели – выбирались участки рек со свободным меандрированием, также учитывалась морфологическая однородность рисунка аллювиальных равнин на материалах космической съемки. Участки выбирались с захватом пойменной зоны, они были вытянуты вдоль течения реки, длина участков составляла от 10 до 30 км. Участки расположены в различных зонально-климатических и физико-географических условиях (рис. 2).

Для изучения были выбраны космические снимки:

- архивные снимки Corona (3–7 м/пикс, 1964–1980 гг.);
- современные высокодетальные снимки 0.5–0.7 м/пикс (Pleiades, Worldview 2, 2011–2018 гг.).

Все снимки были координатно привязаны в программном пакете ArcGIS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый этап решения поставленной задачи – формирование модели развития процесса и получение результатов ее анализа.

В более ранних исследованиях [7, 3, 6] была создана модель развития морфологической структуры аллювиальных равнин. Из допущений модели для решения поставленной задачи необходимы только следующие:

1) вероятность спрямления излучины за интервал времени  $\Delta t$  зависит от величины этого интервала и не зависит от поведения других излучин, при этом вероятность более чем одного спрямления в малый интервал времени много меньше, чем вероятность одного спрямления:

$$p_1 = \mu \Delta t + o(\Delta t),$$

$$p_k = o(\Delta t), \quad k = 2, 3, \dots$$

где  $\mu$  – параметр (среднее число спрямлений излучин за единицу времени);

2) рост ширины пакета за счет формирования грив и межгривных понижений происходит с постоянной скоростью  $\epsilon$ .

Предполагается также отсутствие существенного изменения климатических условий, что проявилось бы в непостоянстве значений параметров.

В итоге математического анализа допущений получены выражения, описывающие развитие морфологической структуры аллювиальных равнин в однородных условиях для случая постоянства климатических условий, в частности [7, 3, 6]:

• спрямление излучин может быть описано вероятностным процессом – процессом Пуассона, т.е. вероятность  $k$  спрямлений за временной интервал  $t$  равна:

$$P(k, t) = \frac{(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t};$$

• время развития излучины и текущее время развития излучины (от последнего спрямления до момента рассмотрения) подчиняются экспоненциальному распределению:

$$F_{\tau}(x) = 1 - e^{-\mu x}.$$

Этот результат, который является опорным для дальнейших построений, нуждается в более репрезентативной эмпирической проверке.

Поскольку скорость роста пакета является постоянной, и если время развития излучины подчиняется экспоненциальному распределению, то и длина стрелки пакета, которая пропорциональна времени развития излучины, должна подчиняться экспоненциальному распределению, но с отличным значением параметра:

$$F_{\mu}(x) = 1 - e^{-\frac{\mu}{\varepsilon} x}.$$

Однако эмпирическую проверку модели нельзя напрямую основывать на этой закономерности, так как в процессе развития аллювиальной равнины пакеты частично или полностью стираются. Рассмотрение этой ситуации было проведено ранее при анализе возрастной дифференциации аллювиальных равнин [2]. Было показано, что, несмотря на стирание сформировавшихся (“старых”) пакетов, длины стрелок их сохранившихся фрагментов должны иметь то же самое экспоненциальное распределение. Это может быть одной из основ эмпирической проверки.

С другой стороны, проведенный с использованием теории специального класса случайных процессов (процессов восстановления) анализ позволил показать, что длины стрелок еще формирующихся (“молодых”) пакетов также должны подчиняться экспоненциальному распределению [2]. Это может быть использовано как вторая основа эмпирической проверки.

Таким образом, проверка состояла в оценке согласия эмпирических распределений длин стрелок пакетов и (отдельно) молодых пакетов экспоненциальному распределению:

$$F_{\mu}(x) = 1 - e^{-\lambda x},$$

где  $\lambda$  – параметр.

Для проверки полученных выводов по модели аллювиальных равнин была предпринята обработка материалов дистанционных съемок на участках аллювиальных равнин ряда рек Западной и Восточной Сибири и Камчатки (см. рис. 2)

(первичное эмпирическое обоснование содержится в более ранних работах [1–3, 7]).

Для каждого космического снимка в пределах однородного участка долины были выделены все возможные стрелки фрагментов пакетов количеством не менее 80 (выборка стрелок в “молодых” пакетах включала не менее 50 измерений), и определен их линейный размер. Стрелки в молодых развивающихся пакетах проводились как перпендикуляр между основанием пакета (хордой) и параллельной ей касательной к вершине пакета. Стрелки в фрагментах старых пакетов проводились как перпендикуляр между касательной в вершине дуги основания и параллельной ей касательной к вершине дуги, ограничивающей фрагмент пакета с внешней стороны. В ряде случаев возникали трудности, связанные со стиранием боковой части фрагментов из-за смещения русла, однако в целом, несмотря на указанную неопределенность, в подавляющем большинстве случаев стрелки удавалось провести. Прилегающие фрагменты пакетов отделялись друг от друга на основе угловых несогласий.

Полученные выборки сравнивались с экспоненциальными распределениями со сдвигом. Использование экспоненциальных распределений со сдвигом связано с тем, что на снимках при анализе выделяются фрагменты пакетов, состоящих как минимум из двух грив и одного межгивного понижения, а из одной гривы не выделяются, это и определяет сдвиг. В выборках оценивался сдвиг как минимальное значение выборки, и осуществлялся переход к промежуточной выборке путем вычитания сдвига. Полученная выборка проверялась на согласие с экспоненциальным распределением на основе критерия Пирсона (хи-квадрат) с помощью программы Statistica.

Эмпирическая проверка для модели аллювиальных равнин дала следующие основные результаты.

Для 21 выборки из 22 (13 участков из 14) распределение стрелок всех пакетов отвечает экспоненциальному распределению со сдвигом (табл. 1, рис. 3), как это следует из модели.

Для “молодых” стрелок проверка проводилась отдельно. Проведенный анализ показал, что для 22 выборок (11 участков) распределение стрелок для всех пакетов отвечает экспоненциальному распределению со сдвигом (табл. 2, рис. 3), как это и следует из модели.

Таким образом, проведенная экспериментальная проверка показала, что сформированная модель (точнее ее фрагмент [6, 7]) согласуется с эмпирическими данными и может быть использована для решения поставленной задачи.

**Таблица 1.** Соответствие эмпирических распределений стрелок аллювиальных пакетов экспоненциальному распределению со сдвигом

Номер	Местоположение	Год съемки	Объем выборки	Сдвиг, м	Параметр $\lambda$ , 1/м	хи-квадрат	хи-квадрат (0.95)
1	Долина р. Шапкина (Коми)	1976	84	32	0.002877	<b>2.944</b>	11.070
2	Долина р. Шапкина (Коми)	2017	84	37	0.003039	<b>3.119</b>	11.070
3	Долина р. Вогулка (Западная Сибирь)	2013	89	47	0.003824	23.231	15.507
4	Долина р. Хейгияха (Западная Сибирь)	1964	76	67	0.002967	<b>6.217</b>	11.070
5	Долина р. Хейгияха (Западная Сибирь)	2017	75	54	0.002873	<b>4.682</b>	11.070
6	Долина р. Юган (Западная Сибирь)	1970	83	59	0.004571	<b>1.430</b>	9.488
7	Долина р. Юган (Западная Сибирь)	2012	83	59	0.004607	<b>1.917</b>	9.488
8	Долина р. Трыбьяха (Западная Сибирь)	2013	73	22	0.005939	<b>8.382</b>	11.070
9	Долина р. Мудуйяха (Западная Сибирь)	2013	141	97	0.002052	<b>9.496</b>	11.070
10	Долина р. Дубчек (Западная Сибирь)	2017	86	79	0.002512	<b>8.78</b>	14.067
11	Долина р. Бур (Средняя Сибирь)	2018	86	57	0.002043	<b>5.835</b>	9.488
12	Долина р. Буор-Эекит (Средняя Сибирь)	1968	77	50	0.005536	<b>2.656</b>	7.815
13	Долина р. Буор-Эекит (Средняя Сибирь)	2018	79	44	0.005425	<b>8.531</b>	12.592
14	Долина р. Тукан (Средняя Сибирь)	2017	80	19	0.004828	<b>6.787</b>	14.067
15	Долина р. Кондюдей (Средняя Сибирь)	1980	89	17	0.004121	<b>2.298</b>	9.488
16	Долина р. Кондюдей (Средняя Сибирь)	2017	89	39	0.004421	<b>0.852</b>	9.488
17	Долина р. Чондон (Восточная Сибирь)	1965	109	18	0.004201	<b>1.5688</b>	11.070
18	Долина р. Чондон (Восточная Сибирь)	2018	111	18	0.004148	<b>2.470</b>	11.070
19	Долина р. Уяндина (Восточная Сибирь)	1975	101	56	0.001887	<b>2.360</b>	11.070
20	Долина р. Уяндина (Восточная Сибирь)	2018	104	100	0.002022	<b>3.536</b>	11.070
21	Долина р. Камчатка (Камчатка)	1975	88	55	0.003108	<b>8.155</b>	11.070
22	Долина р. Камчатка (Камчатка)	2017	116	36	0.003501	<b>9.179</b>	12.592

Примечание. Жирным шрифтом выделено значение критерия в выборках, в которых наблюдается согласие с теоретическим распределением.

Обоснованная выше модель дает возможность оценить вероятность поражения линейного сооружения речной эрозией.

Расчет значений вероятности поражения линейного сооружения за заданное время функционирования должен учесть повторение циклов развития излучины и последующих спрямлений, а значит и повторение циклов размыва, и возможность поражения сооружения не в первый цикл, а в последующие.

Рассмотрим излучину и линейное сооружение, отстоящее на расстояние  $L$  от хорды излучины (рис. 4). Примем упрощение, состоящее в том, что линейное сооружение параллельно хорде излучины.

Найдем вероятность поражения линейного сооружения за время  $t$ , при этом ограничимся рассмотрением интервала времен  $t \leq 2t_0$ , где  $t_0$  – время достижения излучиной линейного сооружения при непрерывном размыве (от момента спрямления):

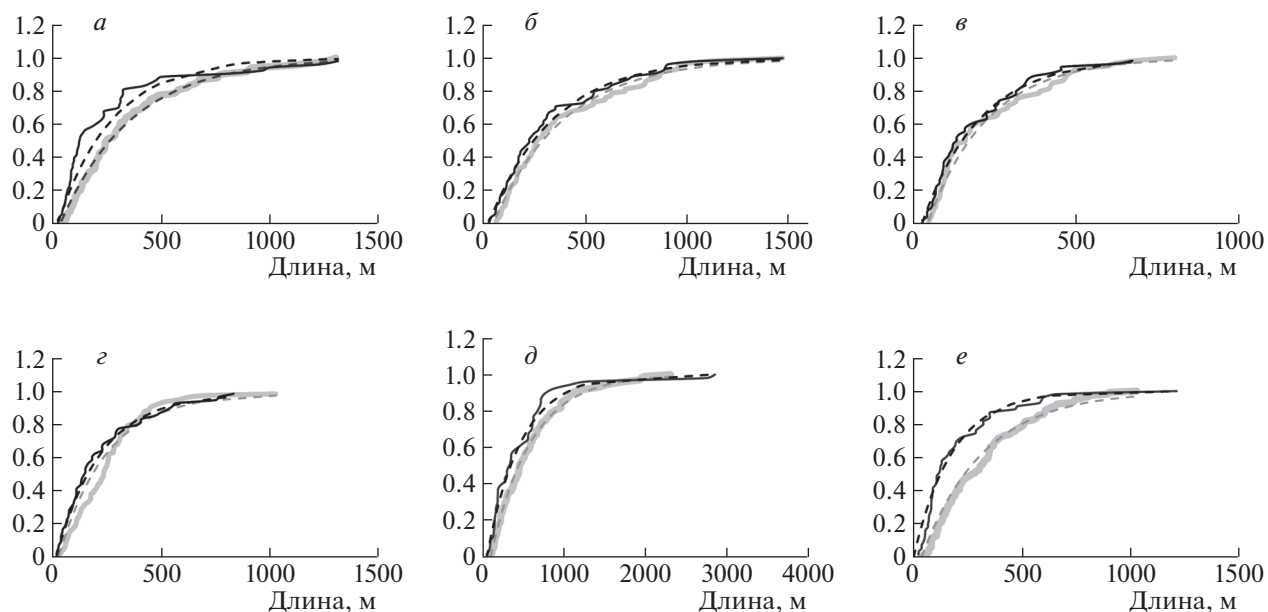
$$t_0 = \frac{L}{\varepsilon}. \tag{1}$$

Поражение линейного сооружения боковой эрозией на  $k$ -ом цикле отвечает выполнению условия:

$$\tau_k \geq t_0,$$

где  $\tau_k$  – длительность  $k$ -го цикла развития излучины.





**Рис. 3.** Графики эмпирического и теоретического распределения длин стрелок пакетов для: *a* – р. Шапкина (2017), *б* – р. Хейгияха (2017), *в* – р. Буор-Экит (2018), *г* – р. Чондон (2018), *д* – р. Уяндина (2018), *е* – р. Камчатка (2017). Штриховыми линиями показаны теоретические распределения, сплошными – эмпирические распределения длин стрелок пакетов; серым цветом показаны распределения для всей совокупности стрелок, черным – распределения для молодых (формирующихся) стрелок.

Поражение линейного сооружения боковой эрозией на *k*-ом цикле в первый раз (без поражения на предыдущих циклах) отвечает выполнению условий:

$$\tau_i < t_0, \quad 0 \leq i \leq k - 1, \\ \tau_k \geq t_0.$$

Учитывая независимость циклов и экспоненциальное распределение их длительности, вероятность

поражения линейного сооружения боковой эрозией в первый раз на *k*-ом цикле можно записать выражением:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} \times \\ \times \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-1} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda e^{-\lambda x_1} \lambda e^{-\lambda x_2} \dots \lambda e^{-\lambda x_{k-1}} dx_{k-1} dx_{k-2} \dots dx_1.$$

Интегрируя по последней переменной, получаем:

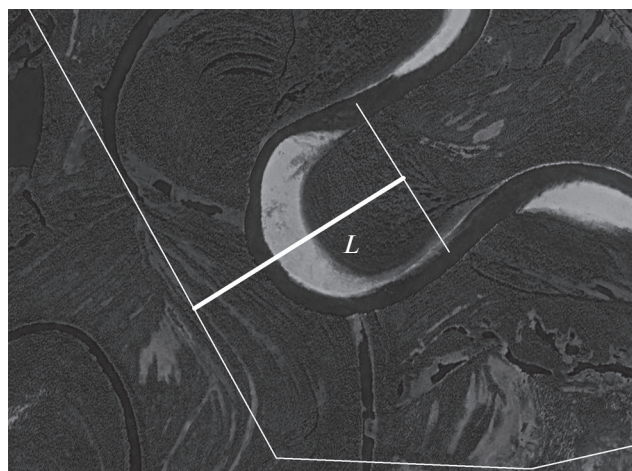
$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda e^{-\lambda x_1} \lambda e^{-\lambda x_2} \dots \lambda e^{-\lambda x_{k-2}} \times \\ \times \int_0^{\min[t_0, (t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})]} \lambda e^{-\lambda x_{k-1}} dx_{k-1} dx_{k-2} \dots dx_1.$$

Так как  $t \leq 2t_0$  и, следовательно,  $(t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2}) \leq t_0$ , а значит

$$\min[t_0, (t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})] = \\ = (t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2}),$$

то

$$P_k(t) = \\ = e^{-\lambda t_0} \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda e^{-\lambda x_1} \lambda e^{-\lambda x_2} \dots \lambda e^{-\lambda x_{k-2}} \times \\ \times \int_0^{(t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})} \lambda e^{-\lambda x_{k-1}} dx_{k-1} dx_{k-2} \dots dx_1,$$



**Рис. 4.** Схема к выводу выражения вероятности поражения линейного сооружения боковой эрозией: тонкими белыми линиями показаны линейное сооружение и хорда излучины, *L* показана утолщенной белой линией; пояснение в тексте.

**Таблица 2.** Соответствие эмпирических распределений длин стрелок “молодых” аллювиальных пакетов экспоненциальному распределению со сдвигом

Номер	Местоположение	Год съемки	Объем выборки	Сдвиг, м.	Параметр $\lambda$ , 1/м	хи-квадрат	хи-квадрат (0.95)
1	Пойма р. Шапкина	1976	53	25	0.004645	<b>1.899</b>	7.815
2	Пойма р. Шапкина	2017	53	25	0.003961	<b>7.506</b>	7.815
3	Пойма р. Сэдьзва	1976	53	21	0.006619	<b>1.188</b>	9.488
4	Пойма р. Сэдьзва	2017	50	21	0.006571	<b>4.867</b>	9.488
5	Пойма р. Хейгияха	2017	56	32	0.003123	<b>5.760</b>	9.488
6	Пойма р. Хейгияха	1964	56	31	0.003153	<b>4.160</b>	9.488
7	Пойма р. Юган	2012	52	27	0.004163	<b>0.606</b>	7.815
8	Пойма р. Юган	1970	51	43	0.004579	<b>1.816</b>	7.815
9	Пойма р. Малый Юган	2012	61	17	0.005762	<b>0.856</b>	5.99
10	Пойма р. Малый Юган	1970	57	13	0.00594	<b>4.544</b>	11.07
11	Пойма р. Буор-Эекит	2018	55	47	0.002343	<b>5.430</b>	5.99
12	Пойма р. Буор-Эекит	1968	60	34	0.004938	<b>2.010</b>	7.815
13	Пойма р. Линде	2017	55	27	0.003436	<b>5.370</b>	9.488
14	Пойма р. Линде	1980	55	32	0.003289	<b>8.186</b>	9.488
15	Пойма р. Кондюдей	2017	68	19	0.006955	<b>1.110</b>	9.488
16	Пойма р. Кондюдей	1980	68	19	0.007304	<b>0.617</b>	9.488
17	Пойма р. Уяндина	2018	53	74	0.002383	<b>1.101</b>	5.99
18	Пойма р. Уяндина	1975	56	54	0.002374	<b>5.214</b>	5.99
19	Пойма р. Чондон	1965	57	18	0.00568	<b>1.793</b>	9.488
20	Пойма р. Чондон	2018	52	18	0.004934	<b>4.072</b>	11.07
21	Пойма р. Камчатка	2017	58	22	0.005626	<b>1.807</b>	5.99
22	Пойма р. Камчатка	1975	57	35	0.003619	<b>4.322</b>	9.488

Примечание. Жирным шрифтом выделено значение критерия в выборках, в которых наблюдается согласие с теоретическим распределением.

и, интегрируя по  $x_{k-1}$ , после упрощения, получаем:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} \left[ \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda^{k-2} e^{-\lambda(x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})} \times \right. \\ \left. \times dx_{k-2} \dots dx_1 - e^{-\lambda(t-t_0)} \lambda^{k-2} \times \right. \\ \left. \times \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \int \dots \int dx_{k-2} \dots dx_1 \right].$$

Для второго интеграла можно использовать формулу для объема  $n$ -мерного симплекса [13]:

$$\int_{\substack{0 \leq x_i \\ x_1 + x_2 + \dots + x_n \leq h}} \dots \int dx_n \dots dx_1 = \frac{h^n}{n!}.$$

В этом случае получаем:

$$P_k(t) = P_{k-1}(t) - e^{-\lambda t} \lambda^{k-2} \frac{(t - t_0)^{k-2}}{(k - 2)!},$$

и затем:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda t} \left[ 1 + \lambda(t - t_0) + \frac{[\lambda(t - t_0)]^2}{2!} + \dots + \frac{[\lambda(t - t_0)]^{k-2}}{(k - 2)!} \right].$$

Соответственно, суммируя по  $k$ , в итоге получаем общую вероятность поражения линейного сооружения боковой эрозией за время  $t$  при  $t \leq 2t_0$ :

$$Q(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ e^{-\lambda t_0} + \sum_{m=0}^{+\infty} \left[ e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^m \frac{[\lambda(t - t_0)]^k}{k!} \right], & t_0 \leq t < 2t_0. \end{cases}$$

Частичная ( $k$ -я) сумма этого ряда может быть представлена как:

$$Q_k(t) = kP_k(t) - e^{-\lambda t} \left[ 1 \cdot 1 + 2\lambda(t-t_0) + 3 \frac{[\lambda(t-t_0)]^2}{2!} + \dots + (k-1) \frac{[\lambda(t-t_0)]^{k-2}}{(k-2)!} \right].$$

Учитывая, что первый член, как можно показать, стремится к нулю, а ряд можно представить, как сумму двух сходящихся рядов, после упрощения получаем выражение:

$$Q(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ [\lambda(t-t_0) + 1]e^{-\lambda t_0}, & t_0 \leq t < 2t_0. \end{cases}$$

Необходимые для расчета вероятности поражения линейного сооружения параметры вытекают из выражений для расчета вероятности поражения линейного сооружения за заданное время функционирования и включают:

- *природные параметры развития процессов:*
  - среднее число спрямлений излучины за единицу времени,
  - скорость размыва борта излучины в точке максимального размыва;
- *задаваемые параметры:*
  - отстояние линейного сооружения от хорды излучины,
  - расчетное время функционирования.

Природные параметры развития процессов должны определяться на основе разработанной модели по материалам космических съемок. Среднее число спрямлений – величина обратная средней длительности цикла развития излучины, а средняя скорость размыва излучины в точке максимального размыва определяется по двум повторным снимкам как отношение величины размыва  $\Delta r$  к интервалу между съемками ( $\Delta t$ ):

$$\varepsilon = \frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

Таким образом, использование разработанной модели морфологической структуры аллювиальных равнин позволяет получить метод количественной оценки вероятности поражения линейного сооружения боковой эрозией. От части принятых упрощений можно отказаться. Так, например, чуть видоизменив (1), нетрудно учесть ситуацию, когда линейное сооружение непараллельно хорде излучины.

## ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы.

- Дистанционные методы могут быть использованы при оценке вероятности поражения линейных сооружений.

- Перспективной основой решения задачи оценки вероятности поражения линейных сооружений является использование моделей математической морфологии ландшафта.

- Общей закономерностью строения ландшафтного рисунка аллювиальных равнин в различных физико-географических условиях является экспоненциальное распределение стрелок пакетов и времени развития излучины, что подтверждается большим экспериментальным материалом.

- На основе подходов математической морфологии ландшафта получено в ограниченных условиях решение задачи количественной оценки вероятности поражения линейного сооружения речной эрозией; необходимые параметры могут быть оценены по материалам повторных космических съемок.

*Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С.* Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 180 с.
2. *Викторов А.С.* Модель возрастной дифференциации аллювиальных равнин // *Геозкология*. 2007. № 4. С. 302–309.
3. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
4. *Викторов А.С., Архипова М.В., Капралова В.Н., Орлов Т.В.* Математическая модель риска поражения инженерных сооружений иницированными термокарстовыми процессами // *Геозкология*. 2020. № 3. С. 82–90. <https://doi.org/10.31857/S086978092003010>
5. *Викторов А.С., Березин П.В., Капралова В.Н.* Разработка программного пакета оценки природных рисков на основе материалов повторных дистанционных съемок // *Исследование Земли из космоса*. 2017. № 5. С. 57–65. <https://doi.org/10.7868/S0205961417050062>
6. *Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др.* Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: РУДН, 2016. 232 с.
7. *Викторов А.С., Трапезникова О.Н.* Математическая модель морфологической структуры аллювиальных равнин как одна из основ дешифрирования материалов космических съемок // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 2. С. 44.
8. *Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф., Кирюхина З.П., Добровольская Н.Г.* Экспериментальные



- исследования размыва береговых обрывов и откосов // Геоморфология. 2016. № 2. С. 51–58. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-2-51-58>
9. Падалко Ю.А., Чибилев А.А. Проблемы развития русловых процессов в бассейне р. Урал // ДАН. 2017. Т. 475. № 6. С. 702–705. <https://doi.org/10.7868/S0869565217240215>
  10. Панин А., Сидорчук А., Чернов А. Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.
  11. Скапинцев А.Е., Потапов А.Д., Лаврусевич А.А. Инженерная защита трубопроводов от эрозионных процессов // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 140–151.
  12. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства магистрального газопровода “Сила Сибири” на участке Чайядинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 4. С. 41–55.
  13. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 3. М.: Физматлит, 2003. 662 с.
  14. Чигир В.Г., Власов. С.В., Горбатов В.А., Паух М.В. и др. Использование материалов дистанционных съемок для повышения надежности газопроводов в криолитозоне // Газовая промышленность. 2014. № 7 (709). С. 48–55.
  15. Экология эрозионно-русловых систем России / Р.С. Чалов (ред.) М.: Географический ф-т МГУ, 2002. 163 с.
  16. Roslan Zainal Abidin, Mohd Sofiyana Sulaiman, Naimah Yusoff. Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia // International Soil and Water Conservation Research. 2017. V. 5. Is. 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.002>
  17. Joung R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales // Austral. Geogr. 1970. V. 11. № 3. P. 269–277.
  18. Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E., et al. Subarctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period // Earth Surface Processes and Landforms. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>
  19. Xiaorong Li, James R. Cooper, Andrew J. Plater. Quantifying erosion hazards and economic damage to critical infrastructure in river catchments: Impact of a warming climate // Climate Risk Management. V. 32. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100287>

## THE USE OF REMOTE SENSING DATA FOR PROBABILISTIC ASSESSMENT OF IMPACT ON A LINEAR STRUCTURE

A. S. Victorov<sup>a,#</sup> and M. V. Arkhipova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: vic\_as@mail.ru*

This research is aimed at developing the remote sensing technique for assessing probability of impact on linear engineering structures by the example of lateral river erosion. The suggested approach for assessing probability of impact on linear engineering structures takes into account the process of lateral erosion, bending and straightening of bends is at the same time the main formatting factor for the landscape morphological pattern of alluvial plains. The base of the technique is a mathematical model of the landscape morphological pattern for alluvial plains. It was essentially tested at key sites within river valleys in different nature environments. The exponential distribution of arrows of the packages and time of bend development is a general law of the landscape morphological pattern of the alluvial plains in different nature environments; numerous testing results confirm it. The model of the alluvial plain morphological pattern gives a solution of the quantitative assessment of the impact probability to a linear structure by river erosion under limited conditions; the necessary parameters can be estimated from the remote sensing data.

**Keywords:** *mathematical morphology of landscapes, alluvial plains, probability of impact to engineering structures, remote sensing data techniques, modelling, river erosion*

### REFERENCES

1. Victorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 180 p. (in Russian)
2. Victorov, A.S. *Model' vozrastnoi differentsiatsii alluvial'nykh ravnin* [Model of age differentiation of alluvial plains]. *Geoekologiya*, 2007, no. 4, pp. 302–309. (in Russian)
3. Victorov, A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The main problems of mathematical morphology of landscape]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p. (in Russian)
4. Victorov, A.S., Arkhipova, M.V., Kapralova, V.N., Orlov, T.V. *Matematicheskaya model' riska porazheniya inzhenernykh sooruzhenii initsiirovannymi termokarstovymi protsessami* [Mathematical model for risk of damage to engineering structures by human-induced thermokarst processes]. *Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 82–90. <https://doi.org/10.31857/S0869780920030108> (in Russian)

5. Viktorov, A.S., Berezin, P.V., Kapralova, V.N. *Razrabotka programmnogo paketa otsenki prirodnykh riskov na osnove materialov povtornykh distantsionnykh s'emok* [Development of a software package for natural risk assessment based on repeated remote sensing data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, no. 5, pp. 57–65. <https://doi.org/10.7868/S0205961417050062> (in Russian)
6. Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V. et al. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical morphology of cryolithozone landscapes]. Moscow, RUDN Publ, 2016, 232 p. (in Russian)
7. Viktorov, A.S., Trapeznikova, O.N. *Matematicheskaya model' morfologicheskoi struktury allyuvial'nykh ravnin kak odna iz osnov deshifirovaniya materialov kosmicheskikh s'yemok* [Mathematical model of the morphological pattern of alluvial plains as one of the bases for remote sensing data interpretation]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, no. 2, pp. 44. (in Russian)
8. Larionov, G.A., Litvin, L.F., Krasnov, S.F., Kiryukhina, Z.P., Dobrovol'skaya, N.G. *Eksperimental'nye issledovaniya razmyva beregovykh obryvov i otkosov* [Experimental research of the cliffs and banks washaway]. *Geomorfologiya*, 2016, no. 2, pp. 51–58. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-2-51-58> (in Russian)
9. Padalko, Y.A., Chibilev, A.A. *Problemy razvitiya ruslovykh protsessov v basseine r.Ural* [Problems of riverbed evolution in the basin of the Ural River]. *Doklady Akademii Nauk*, 2017, vol. 475, no. 6, pp. 702–705. <https://doi.org/10.7868/S0869565217240215> (in Russian)
10. Panin, A.V., Sidorchuk, A.Yu., Chernov, A.V. *Osnovnye etapy formirovaniya poim ravninnykh rek Severnoi Evrazii* [The main stages of the flood-plain formation in northern Eurasia]. *Geomorfologiya*, 2011, no. 3, pp. 20–31. (in Russian)
11. Skapintsev, A.E., Potapov, A.D., Lavrusevich, A.A. *Inzhenernaya zashchita truboprovodov ot erozionnykh protsessov* [Engineering protection of pipelines from erosion processes]. *Vestnik MGSU*, 2013, no. 7, pp. 140–151. (in Russian)
12. Strokova, L.A., Ermolaeva, A.V. *Prirodnye osobennosti stroitel'stva magistral'nogo gazoprovoda "Sila Sibiri" na uchastke Chayandinskoe neftegazokondensatnoe mestorozhdenie-Lensk* [Natural features of constructing the main gas pipeline "Power of Siberia" on a Chayandinskoye oil and gas field site – Lensk]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. (in Russian)
13. Fikhtengol'ts, G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus]. Moscow, Fizmatlit Publ., vol. 3, 2003. 632 p. (in Russian)
14. Chigir, V.G., Vlasov, S.V., Gorbatov, V.A., Raukh, M.V., et al. *Ispol'zovanie materialov distantsionnykh s'emok dlya povysheniya nadezhnosti gazoprovodov v kriolitozone* [The use of remote sensing data to improve the reliability of gas pipelines in the permafrost zone]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2014, no. 7 (709), pp. 48–55. (in Russian)
15. *Ekologiya erozionno-ruslovykh sistem Rossii* [Ecology of erosion-channel systems in Russia]. R.S. Chalov, Ed., Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU, 2002, 163 p. (in Russian)
16. Roslan Zainal Abidin, Mohd Sofiyani Sulaiman, Naimah Yusoff. Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 5, issue 1, 2017, pp. 26–35.
17. Joung, R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales. *Austral. Geogr.* 1970, vol. 11, no. 3, pp. 269–277.
18. Lotsari, E. Hackney, C. Salmela, J. Kasvi, E. Kemp, J. Alho, P. Darby, S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>.
19. Li, X., Cooper, J.R., Plater, A.J. Quantifying erosion hazards and economic damage to critical infrastructure in river catchments: Impact of a warming climate. *Climate Risk Management*, 2021, vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100287>