

УДК 556.53

ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗУ ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕХОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЧЕРЕЗ РЕКИ¹

© 2012 г. Н. И. Алексеевский, Л. А. Анисимова, М. А. Самохин, С. Р. Чалов

Московский государственный университет, им. М.В. Ломоносова

119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

Поступила в редакцию 18.12.2010 г.

Разработанная в статье технология (применительно к условиям северо-запада, центра и юга европейской территории России) обнаруживает достаточную эффективность для проведения сравнительного анализа линий электропередач по условиям отдельного и интегрального воздействия опасных гидрологических и склоновых процессов на их уязвимость, а также определения периодичности мониторинговых наблюдений, разработки состава этих исследований.

Ключевые слова: переходы линий электропередач через реки, опасные гидрологические явления, затопление, русловые деформации, надежность переходов линий электропередач через реки.

Линии электропередач (ЛЭП) относятся к одному из видов инженерных объектов, которые испытывают негативное влияние со стороны опасных природных процессов (ОПП). Однако в отличие от трубопроводного, автомобильного и железнодорожного транспорта технологии гидрологического обеспечения их создания и эксплуатации на участках перехода через реки разработаны относительно слабо. Базовые работы Государственного гидрологического института в этой области восходят к 1960–1970-м гг. [10]. За прошедшее время накопился значительный опыт изучения опасных гидрологических явлений, существенно возрос период эксплуатации ЛЭП, позволяющий оценить вклад конкретных гидрологических событий, а также их совокупности в изменении надежности работы ЛЭП. Одновременно стало очевидным, что уязвимость переходов ЛЭП через долины рек зависит не только от гидрологических, но и склоновых, гляциологических, метеорологических процессов. Цель данной статьи заключается в определении индивидуальной и консолидированной роли различных (в основном гидрологических и склоновых) процессов в нарушении безопасности функционирования ЛЭП, разработке технологии учета влияния отдельных опасных гидрологических явлений на изменение надежности работы переходов, а также интегрального влияния опасных природных про-

цессов в задачах краткосрочных и среднесрочных прогнозов условий работы этого вида транспорта.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ УЧАСТКОВ ПЕРЕХОДА ЛЭП

В общем случае участок перехода ЛЭП через долину реки выбирается с учетом генерального направления транспортного коридора от места ее получения до зон массового потребления (распределения) энергии, орографии местности и морфологии речных долин. При прочих равных условиях предпочтение отдается прямолинейной трассе транспортного коридора. Оптимизация расположения трассы ЛЭП осуществляется на этапе разработки соответствующего проекта с целью минимизации проблем ее строительства и эксплуатации. В пределах речных долин направление перехода ЛЭП через водную преграду в определенной степени предопределено генеральным направлением транспортного коридора.

Одновременно при планировании расположения опор ЛЭП учитывается морфология долины. На подходе к ее крутому коренному берегу опоры располагаются на наиболее высоком месте и в непосредственной близости от борта долины. Расстояние от крутого яра до опоры назначается при этом с учетом возможности развития опасных склоновых процессов. Обвалы, осыпи, оползни, крип не должны нарушать работу перехода за некоторый гарантированный период времени. В условиях врезанного и относительно узкого русла опоры ЛЭП могут располагаться на противоположных сторонах долины. На участках адаптиро-

¹ Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00069), ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (государственный контракт 02.740.11.0336 и проект П164).

ванного русла одна или несколько опор находятся на пойме и (или) террасах, а другая — на крутом коренном берегу. Протяженность пролета — расстояние между смежными опорами ЛЭП — обычно не превышает 1500 м. В основном же она колеблется в пределах от 450 до 750 м. Поэтому переходы через крупные реки с широкой двухсторонней поймой проектируются на наиболее узких участках речных долин, в зонах расположения скульптурных или (что менее предпочтительно) пойменных островов. При переходе через очень широкие водные преграды иногда приходится создавать искусственные основания под опоры ЛЭП.

В подавляющем большинстве случаев протяженность пролета в транспортном коридоре ЛЭП больше ширины адаптированного или широкопойменного русла. В этом случае местоположение одной или двух опор в пониженной части речной долины назначается с учетом минимизации потенциального влияния опасных гидрологических явлений. В их число входят размыв пойменных берегов, спрямление излучин, изменение структуры русловых разветвлений, глубокое затопление пойм (приводящее к механическому воздействию потока воды на опоры ЛЭП, провоцированию эрозийных процессов в районе опор), ледоход при затопленной пойме (таранное влияние льдин).

Главная опасность для опор ЛЭП на берегах адаптированного или широкопойменного русла связана с отступанием одного или обоих берегов в процессе эволюции морфодинамического типа русла или развития крупных русловых форм (побочней). В условиях блуждания реки в пределах днища долины, продольного и поперечного смещения излучин, отмирания или активизации рукавов опоры ЛЭП могут оказаться подмытыми, что соответствует возникновению аварийных ситуаций, нарушению надежного обеспечения потребителей электроэнергией. Поэтому переходы ЛЭП проектируются на наиболее устойчивых участках пониженной части долины реки [10, 11]. Под устойчивостью при этом понимается сохранение таких плановых очертаний русла и интенсивности русловых переформирований, при которых сохраняется безаварийная работа ЛЭП в пределах этой части транспортного коридора.

Для выбора таких участков, краткосрочного (1–5 лет) и среднесрочного (6–15 лет) прогноза русловых процессов с задачей определения будущего морфологического состояния участка реки используется достаточно хорошо разработанный аппарат руслового анализа [7, 10, 11, 15–17]. Наиболее сложной задачей остается прогноз изменения морфодинамического типа русла (эволюция относительно прямолинейного, меандрирующего или разветвленного русла), скорости размыва берегов. Для определения возможной смены типа русла устанавливается тип русла и обосновывается

теоретическая схема его развития, с учетом которой выбирается безопасное местоположение опор ЛЭП [11]. Прогноз эволюции базируется на историческом анализе русловых процессов в зоне расположения транспортного коридора ЛЭП выше и ниже по течению реки. Он основан на учете количества, вероятности превышения и условий прохождения руслоформирующих расходов воды $Q_{рф}$, оказывающих (в среднем многолетнем отношении) решающее воздействие на изменение морфодинамического типа русла [15]. Для относительно прямолинейных и меандрирующих участков водотоков важна оценка скорости движения крупных форм руслового рельефа (побочней), продольного и поперечного смещения излучин, размыва берегов.

Длительные процессы русловых деформаций тесно связаны с водоносностью рек Q_0 , межгодовой изменчивостью расхода воды Q , наносов R_p , условиями их транспорта $R_{тр}$, уклонами потока I , русла и поймы, типом и устойчивостью речных отложений и (или) горных пород [7, 10, 16]. Например, средняя скорость размыва берегов рек $C_{6с}$, м/год, выражается так

$$C_{6с} = \frac{kQ_0^2 I}{dh_6},$$

где Q_0 — средний многолетний расход, м³/с; d — средний диаметр русловых наносов, м; h_6 — высота берега, м; k — коэффициент, зависящий от ширины русла [5]. Величина $C_{6с}$ находится в зависимости от размера (порядка) рек или среднего максимального расхода воды [16]. Существуют и другие модели расчета размыва берегов, которые основаны на экстраполяции наблюдаемых деформаций или на анализе изменения потока наносов у берегового откоса [7].

Отступление берегов реки от первоначального расположения нередко связано не только с русловыми, но и со склоновыми процессами [4]. Разрушение берега в этом случае зависит от соотношения среднего угла наклона берегового откоса и угла внутреннего трения грунта, слагающего берег. Один и тот же откос становится менее устойчивым при уменьшении угла внутреннего трения, и, наоборот, при одинаковом угле внутреннего трения устойчивость откоса уменьшается с ростом его крутизны. От свойств грунта зависит и критическая высота берега, с превышением которой он может разрушаться. Чем больше сцепление частиц и угол внутреннего трения грунта, тем больше критическая высота берега. Берега, сложенные несвязными грунтами (песками, гравием, галькой), отличаются малой критической высотой, поэтому размыв русла, способствующий увеличению высоты берегового откоса, приводит к его разрушению. Деформации таких берегов слабо ре-

агируют на изменения увлажнения откоса. Наоборот, устойчивость берегов, сложенных связными супесчано-суглинистыми грунтами, зависит от изменения их увлажненности. Важную роль играет интенсивность снижения уровня воды на спаде половодья. Быстрое понижение уровня воды в реке приводит к разрыву гидравлической связи между поверхностными и грунтовыми водами, что обуславливает оседание и оползание переувлажненных (и более тяжелых) грунтов. В конкретном створе реки скорость отступления берега зависит от высоты берега, литологического строения берегов, типа и густоты растительности.

Для размыва берегов относительно прямолинейных и меандрирующих участков рек, а также перераспределения стока воды по конкурирующим водотокам многорукавного русла большое значение имеет скорость смещения макроформ руслового рельефа и их наиболее высоких частей – побочней. При большой скорости смещения побочней их отклоняющее воздействие на поток (к противоположному берегу) сохраняется короткое время, что препятствует его длительному размыву. При более медленном смещении побочней масштабы отступления берегов заметно увеличиваются. Одновременно возрастает время, в течение которого сохраняется стабильность распределения расходов воды по рукавам разветвленного русла и безопасность опор ЛЭП, находящихся на островной пойме. При быстром перемещении побочней водотоки многорукавного русла нестабильны, они могут отмирать или активизироваться, что отражается на безопасности инженерных объектов, находящихся на пойме и в русле реки [15].

Средняя скорость смещения побочней, м/сут, зависит от средней скорости потока, м/с, в многоводную фазу водного режима и их размера (порядка N_q) [1]

$$C_{гА} = 1.1 \times 10^{-6} \nu N_q^{5.4}.$$

Она также находится в зависимости от стабильности русловых отложений (коэффициента стабильности Маккавеева K_s или числа Лохтина L) [16]. При использовании коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева скорость смещения побочней, м/год, выражается так

$$C_{гА} = 116K_s^{-1.08}.$$

Скорость разрушения берегов зависит от стабильности русловых отложений. Утрата ими стабильности означает, в частности, возможность размыва отложений, снижения отметок поверхности дна. В результате процессы отступления берегов усиливаются за счет повышенной интенсивности оседания и оползания береговых блоков горных пород. Для определения направленности и интенсивности вертикальных деформаций русла наиболее часто используется анализ коэффи-

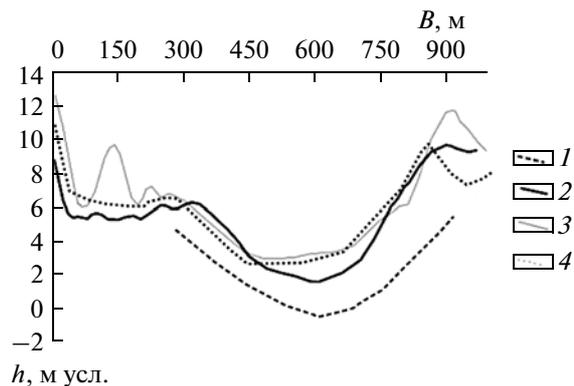


Рис. 1. Технология определения профиля предельного размыва русла реки 1 по результатам сопоставления поперечных профилей русла в створе 2, выше 3 и ниже 4 по течению от транспортного коридора ЛЭП [14].

циентов устойчивости или стабильности. Преимущества имеют коэффициенты, имеющие “тарировку” (их численные значения поставлены в соответствие с направленностью и интенсивностью деформаций поверхности дна). К таким коэффициентам относятся коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева $K_s = \frac{d}{BL}$, где B – ширина реки; а также число Лохтина L [16].

Для исключения возможности расположения опоры ЛЭП в зоне потенциального разрушения берега оценивается предельный поперечный профиль размыва русла (рис. 1). Плановые и высотные отметки этого профиля определяются в соответствии с рекомендациями, разработанными для обеспечения надежной работы подводных трубопроводов [14]. При этом учитывается, что соответствующие расчетные методы позволяют оценить возможное влияние на отметки предельного профиля размыва лишь микроформ руслового рельефа. В реальных условиях его очертания в большей степени зависят от динамики мезо- и макроформ руслового рельефа [3]. Еще одна особенность: рассчитанный поперечный профиль русла не учитывает возможность его расширения вследствие размыва берегов. Его горизонтальные очертания отражают лишь особенности морфологии русла на относительно небольшом по длине участке реки ниже и выше транспортного коридора ЛЭП (рис. 1).

Очевидно, что степень негативного воздействия русловых деформаций на опоры ЛЭП зависит не только от их географических координат, но и от высоты местности в районе их расположения. Меньшая вероятность утраты устойчивости отличает участки высокой поймы и речных террас. Этим формам внутридолинного рельефа отдается предпочтение при выборе местоположения опор. Такое положение решает также проблему защиты опор ЛЭП от опасных гидрологических явлений,

связанных с глубоким затоплением пониженной части долины в период максимального стока и ударного воздействия льдин. Если при расходах воды 1%-ной обеспеченности опоры электропередач остаются за пределами зоны затопления, то это гарантирует безаварийную работу перехода ЛЭП через реку даже в период максимального стока и ледохода. Опасность механического воздействия льдин на опоры ЛЭП при этом, конечно, сохраняется в условиях заторов. Для предупреждения этого негативного воздействия опоры снабжаются противоледовыми обводами или они устанавливаются на высоком и полом бетонном фундаменте.

При оценке безопасности переходов ЛЭП через подпертые участки рек (долинные водохранилища, устьевые участки рек с переменным (речным или водохранилищным) типом водного режима) оценивается потенциальная направленность и интенсивность волновой переработки берегов [9, 12, 14]. Характер и интенсивность переработки таких берегов определен сочетанием геологических, геоморфологических гидрогеологических, гидрометеорологических и техногенных факторов. Наиболее надежным методом оценки волновой переработки считается метод Н.Е. Кондратьева, суть которого изложена в нормативном документе [14]. Она сводится к определению расчетных повторяемостей ветров за свободный ото льда период года, характеристик и энергии ветровых волн по каждому наветренному румбу, суммарной среднегодовой мощности всего диапазона волн. На основе этих расчетов находится профиль устойчивой береговой отмели и определяется предельное смещение линии берега (рис. 1).

ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПЕРЕХОДОВ ЛЭП

С учетом этих особенностей обоснована технология оценки состояния переходов ЛЭП и сравнительного анализа переходов на участках рек, находящихся в различных физико-географических условиях (южнее границы распространения многолетней мерзлоты). В ее основу положена идея о зависимости условий эксплуатации любого перехода ЛЭП от совместного или отдельного влияния гравитационных $P(\Gamma)$, гидрологических $P(З)$ процессов, изменения морфодинамического типа русла $P(\Pi)$, размыва берегов $P(Б)$, дна $P(В)$ и ледохода $P(Л)$. В первом приближении их совместный вклад в изменение безопасности перехода равен суперпозиции частных вкладов P_i , если каждый частный вклад выражен в долях единицы и оценивается экспертно на основе обобщения имеющихся фактических данных, т.е.

$$P = P(\Gamma) + P(З) + P(\Pi) + P(Б) + P(В) + P(Л).$$

Эмпирический опыт доказывает, что эти факторы по-разному влияют на условия работы ЛЭП, что требует использования некоторых весовых коэффициентов. С их учетом уравнение (4) для определения средневзвешенной величины P_0 приобретает вид

$$P_0 = 0.125(P(\Gamma) + P(З) + 2P(\Pi) + 2P(Б) + P(В) + P(Л)).$$

Для задания числовых значений P_i разработаны специальные шкалы, в которых их величина ставится в зависимость от особенностей конкретного перехода ЛЭП. При определении относительной роли гравитационных процессов в изменении его безопасности учитывается, что они зависят от типа формы долины, соотношения ширины долины B_d и поймы $B_{п}$, глубины вреза долины H_d и превышения высокой поймы над меженной поверхностью воды в реке ΔH . Угроза для безопасности опор ЛЭП, находящихся сразу за бровкой долины, возрастает при переходе от невыраженного типа формы ее поперечного сечения к ящикообразному, трапециидальному, V -образному и каньонообразному, поскольку одновременно увеличивается вероятность опасных склоновых явлений. Увеличение отношения $H_d/\Delta H_{п}$ обычно связано с переходом от долин равнинных к долинам горных и полугорных рек с врезанным или адаптированным руслом. Оно сопровождается снижением опасности гидрологических процессов и увеличением опасности гравитационных процессов. Все эти процессы интегрально учитывает изменение относительной ширины долины $B_d/B_{п}$. Чем больше отношение $B_d/B_{п}$, тем меньше значимость гравитационных процессов в нарушении надежной работы переходов ЛЭП через реки (таблица).

Безопасность опор ЛЭП на участках речных долин во многом определена разнообразными гидрологическими факторами. Размер (площадь водосбора, порядок) реки — главный фактор уязвимости инженерных объектов на берегах рек. От порядка реки зависят сток воды, речных наносов, неравномерность внутригодового распределения стока, диапазон изменения уровней воды, уклоны дна долины, относительная ширина русла, многие другие характеристики, изменчивость которых определяет опасность водного и руслового режима рек [1, 2, 6, 13]. Например, разность высот между основанием опор ЛЭП ΔH_0 , поверхностью высокой поймы $\Delta H_{п}$ и меженным уровнем воды в реке зависит от ее порядка и дает представление о местном диапазоне колебаний отметок водной поверхности до начала затопления опор ЛЭП. Соотношение превышений уровня 1%-ной обеспеченности и высоты опор ЛЭП над меженным уровнем воды в реке, наоборот, характеризует относительную глубину затопления этих опор в пе-

Влияние градации изменения опасности влияния природных процессов P_i , баллы, на надежность работы переходов ЛЭП (обозначения переменных приведены в тексте статьи)

Характеристики	Градации						
	>2.0	2.0–1.5	1.5–1.3	1.3–1.2	1.2–1.1	1.1–1.0	1
B_d/B_{Π}	>2.0	2.0–1.5	1.5–1.3	1.3–1.2	1.2–1.1	1.1–1.0	1
$P(\Gamma)$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1
$\frac{\Delta H_{0,1\%}}{\Delta H_0}$	>1.3	1.3–1.2	1.2–1.15	1.15–1.1	1.1–1.05	1.05–1.03	<1.03
$P(3)$	1	0.9	0.8	0.7	0.5	0.3	0.1
$k = Q_{\min}/Q_{\max}$	>0.3	0.3–0.24	0.23–0.19	0.18–0.14	0.13–0.11	0.10–0.08	<0.08
$P_k(\Pi)$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1
$k_1 = \Delta(Q_{\text{рф.в}} I), \%$	>15	15–10	10–5	5–4	4–2	2–1	<1
$\Delta Q, \%/год$	>10	10–8	8–6	6–4	2–1	1.0–0.5	<0.5
$P_{k1}(\Pi)$	1	0.9	0.8	0.7	0.5	0.3	0.1
$C_{\text{пр}}, \text{м/ГОД}$	>10	10–9	9–8	8–7	0.5–0.1	0.1–0.05	<0.005
$C_{\text{пп}}, \gg$	>50	50–40	70–30	30–20	1.0–0.5	0.5–0.11	<0.11
l/λ	>1.9	1.9–1.7	1.7–1.5	1.5–1.4	1.3–1.2	1.2–1.15	<1.15
B_0/B	<1.0	1.0–1.03	1.03–1.07	1.07–1.2	1.2–1.5	1.5–1.7	>1.7
$P(\text{Б})$	1	0.9	0.8	0.7	0.5	0.3	0.1
$R_{\text{тр}}/R_{\text{р}}$	>2.0	2.0–1.5	1.49–1.20	1.19–1.02	1.00	0.99–0.80	<0.80
L	<2	2–5	5–7	7–10	10–20	20–50	>50
K_s	<6	6–10	10–15	15–20	20–50	50–100	>100
$dz/dt, \text{см/год}$	>10	10–8	8–6	6–4	1.0–0.5	0.5–0.1	<0.1
$P(\text{В})$	1	0.7	0.4	0.2	0	0.2	0.4
$k_3, \%$	100	100–80	80–60	60–10	10–5	5–1	<1
B_d/B_0	>2	2–1.8	1.8–1.6	1.6–1.4	1.4–1.2	1.2–1.1	<1.1
$P(L)$	1	0.90	0.80	0.70	0.5	0.3	0.1

риод половодья (таблица). Чем больше отношение $\Delta H_{0,1\%}/\Delta H_0$, тем больше опасность механического и эрозионного воздействия водного потока на опоры ЛЭП и поверхность поймы в районе их расположения. Прямую зависимость их состояния от особенностей водного режима устанавливает сравнение фактических высот расположения опор ЛЭП и уровней воды в период максимального стока воды.

Характеристики стока воды и наносов, как и условия затопления пойменных территорий, – фактор изменения планового положения русла реки в пределах речной долины, важнейшее условие стабильной работы перехода ЛЭП через реки. Если для врезанных в коренные породы русла рек роль изменения морфодинамического типа $P(\Pi) = 0$, то для адаптированных (и особенно для широкопойменных) участков рек величина $P(\Pi)$ – существенно отличается от нуля. Для таких участков рек уменьшение отношения среднего многолетнего минимального расхода Q_{\min} к максимальному рас-

ходу воды Q_{\max} означает возрастание риска опасных эрозионных явлений в районе расположения опор ЛЭП (таблица). Возможному радикальному изменению положения современного русла относительно бортов долины соответствуют относительно меньшие значения $k = Q_{\min}/Q_{\max}$ [13]. Потенциальная возможность миграции русла в пределах долины отвечает определенным значениям руслоформирующих расходов воды, а также мощности речного потока [7, 15, 17]. Наличие верхнего интервала руслоформирующих расходов воды, формирующегося в условиях частого, продолжительного и глубокого затопления пойменных массивов, – важный признак возможности блуждания реки относительно его современного положения. Смена типа русла зависит от изменения мощности потока $\Delta Q_{\text{рф.в}} I = k_1$ в период прохождения руслоформирующих расходов воды. Она наиболее вероятна при $k_1 > 15\%$ по сравнению со средними многолетними значениями. Итоговое значение опасности этого явления $P(\Pi)$ принима-

ется максимальным из значений $P_k(\Pi)$ и $P_{k1}(\Pi)$ (таблица). На участках многорукавного русла опасность для опор ЛЭП создают не столько процессы блуждания рек, сколько активизация ранее маловодных и образование новых водотоков, перераспределение в их пользу большей части общего стока воды. При ежегодном изменении водоносности рукавов ΔQ более чем на 10% следует ожидать проблем с обеспечением безопасности опор ЛЭП на островной пойме [6]. Они практически отсутствуют, если водоносность рукавов на участке многорукавного русла относительно стабильна.

Опасность размыва берегов в зонах расположения опор ЛЭП зависит от типа рек (горные, полугорные, равнинные) и геоморфологического типа их русел (врезанные, адаптированные, широкопойменные). Для врезанных русел влияние русловых деформаций на опоры ЛЭП отсутствует, так как опоры располагаются на противоположных бортах речных долин. Реальная возможность подмыва опор ЛЭП существует лишь на участках адаптированных и широкопойменных русел, поскольку вследствие большой ширины долины опоры вынужденно сооружают и в пониженных частях речной долины. Опасность этого процесса зависит от характера эволюции излучин, скорости размыва берегов C_6 , обуславливающего продольное и поперечное смещение меандр. При этом опоры ЛЭП могут оказаться подмытыми, что соответствует аварийному режиму их работы. Скорость продольного и поперечного смещения излучин находится в зависимости от стадии их развития, которая характеризуется величиной коэффициента развитости излучины l/λ , где l и λ — соответственно длина и шаг излучины [16]. Чем больше скорости продольного $C_{пр}$ и поперечного $C_{пп}$ смещения излучин, величина коэффициента l/λ , тем больше опасность потенциального влияния горизонтальных деформаций на техническое состояние опор ЛЭП. При критическом значении отношения $l/\lambda = 1.6$ утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла [16] и излучины могут спрямляться с соответствующими угрозами для безопасности перехода ЛЭП.

Интегральное воздействие разнообразных механизмов разрушения берегов проявляется в том, что постепенно или скачкообразно уменьшается расстояние от опор ЛЭП до бровки межени берегов реки. Чем больше отношение ширины современного русла реки B к расстоянию между ближайшими к руслу опорами ЛЭП на противоположных ее берегах B_0 , тем меньше опасность негативного влияния гравитационных и эрозионных процессов на надежность работы перехода (таблица). В зависимости от наличия информации величина $P(B)$ определяется по изменчивости одного или всех факторов разрушения берегов. В по-

следнем случае в качестве основного принимается фактор, вызывающий наибольший размыв русла. Время безопасного функционирования перехода ЛЭП соответствует условию

$$T \leq \frac{L_0}{C_6},$$

поскольку оно зависит от расстояния между берегами реки и опорами ЛЭП L_0 , а также от скорости разрушения берега C_6 .

Предпосылки для вывода системы поток—русло из состояния устойчивого равновесия возникают также в тех случаях, когда соотношение между транспортирующей способностью и расходом наносов руслового генезиса $R_{тр}/R_p \neq 1$. Если при $R_{тр}/R_p = 1$ величина $P(B) = 0$, то при $R_{тр}/R_p > 1$ на участке реки доминируют процессы понижения отметок дна, а при $R_{тр}/R_p < 1$ — процессы аккумуляции наносов и повышения отметок дна. В первом случае увеличение величины $P(B)$ соответствует возрастанию вероятности оползневых процессов на склонах коренных и пойменных берегов в условиях понижения сезонных уровней воды. Во втором случае аналогичное изменение величины $P(B)$ обусловлено направленным повышением уровней воды, вызванным аккумуляцией речных наносов.

Важной локальной характеристикой вертикальных деформаций русла обоснованно считается устойчивость русловых отложений, зависящая от их гранулометрического состава, гидравлических характеристик потока. Переход от песчаного состава русловых отложений к кристаллическим породам, вскрывающимся на дне потока, сопровождается увеличением их устойчивости (числа Лохтина, коэффициента стабильности Н.И. Макавеева и др.). Надежность работы переходов ЛЭП по признакам интенсивности вертикальных деформаций русла низка при скорости размыва дна реки $dz/dt > 10$ см/год, она относительно повышена, если $dz/dt < 0.1$ см/год [6].

В условиях ледохода существенные угрозы для опор ЛЭП создает движение отдельных крупных льдин и ледяных полей, поступающих в пределы поймы в период половодья. Степень влияния ледохода на опоры ЛЭП зависит от многих факторов: уровней воды, определяющих место приложения нагрузки от льдин [8], заторности участка реки k_3 , соотношения протяженности пролета ЛЭП над рекой B_0 и шириной зоны затопления местности в период ледохода $B_{л}$. Чем больше заторность участка реки и отношение $B_{л}/B_0$, тем больше опасность нарушения надежной работы перехода ЛЭП $P(L)$ (таблица).

При известных значениях P_i определяется средневзвешенная величина P_0 , если роль всех i значений $P < 0.6$. В этом случае надежность пере-

хода ЛЭП в большей или меньшей степени зависит от набора разнообразных и опасных природных явлений. Если величина $P_0 < 0.2$, $P_0 = 0.2–0.4$, $P_0 = 0.4–0.6$, то состояние перехода можно квалифицировать как устойчивое, относительно устойчивое и слабоустойчивое соответственно. При значении P_i для фактора i и (или) при $P_0 = 0.6–0.8$ состояние перехода считается неустойчивым, а при $P_0 = 0.8$ и больше – аварийным.

Сопоставление некоторых переходов ЛЭП в пределах ЕТР по надежности работы. Рассмотренная технология использована для сравнительного анализа состояния переходов ЛЭП, находящихся в различных физико-географических условиях. Восемь переходов находятся на реках северо-запада европейской территории России (ЕТР). Бассейны этих рек, как правило, отличаются высокой степенью заозерности и заболоченности, что определяет пониженный сток наносов. Для рек характерен неразветвленный относительно прямолинейный или слабомеандрирующий тип русла, галечный состав аллювия. Многие реки протекают в ограниченных условиях развития русловых деформаций (врезанные и адаптированные русла). Шесть переходов организовано через реки в центре ЕТР. Они обладают хорошо выраженным внутриводораздельным рельефом с широкой постоянно затопляемой поймой. Долины этих рек хорошо освоены, а их сток существенно изменен под влиянием хозяйственной деятельности. Они относятся к равнинным, свободно меандрирующим и постоянно замерзающим рекам с продолжительным ледоходом. Еще восемь переходов располагаются в долинах равнинных (часто зарегулированных) и полугорных рек Северного Кавказа. Большинство из переходов расположено в предгорных условиях, что определяет повышенные уклоны потока и скорости течения. Для всех рек характерен повышенный сток речных наносов, отсутствие выраженных ледовых явлений, меандрирующее или многоорукавное русло, односторонняя или двухсторонняя пойма. Русла этих рек отличает повышенная неустойчивость.

Указанные отличия определяют пространственную неоднородность влияния конкретных факторов на безопасность эксплуатации переходов (рис. 2). Относительная опасность гравитационных процессов $P(\Gamma)$ максимальна для рек северо-запада ЕТР, берега которых подвержены склоновым процессам ($P(\Gamma) = 0.9$). Наоборот, минимальные значения ($P(\Gamma) = 0.05$) отмечены на реках юга, где слабовыраженные долины равнинных рек отличают пологие склоны, повышенное значение соотношения ширины долины B_d и поймы B_n , малая глубина вреза долины H_d . В этом же направлении постепенно уменьшается относительная опасность влияния ледохода $P(L)$ на надежность работы ЛЭП.

Вероятность нарушения безопасности перехода за счет размыва берегов и смены морфодинамического типа русла возрастает при переходе от условий врезанных, адаптированных рек к водотокам с широкой поймой, от полугорных – к равнинным рекам. Максимальная опасность этих процессов характерна для рек Северного Кавказа. Для них величины $P(\Pi)$ и $P(B)$ одинаковы и равны 0.7. Для этих рек минимально время безопасного функционирования перехода ЛЭП (меньше 15 лет). Преимущественно галечно-валунный состав русловых отложений и соответствующее ему увеличение устойчивости русла определяют меньшую опасность функционирования этих переходов по условиям развития вертикальных деформаций $P(B)$. Если для рек на северо-западе ЕТР величина $P(B)$ меняется от 0.1 до 0.8, на реках центра ЕТР – от 0.2 до 0.5, то на реках Северного Кавказа – от 0.05 до 0.2.

Вероятность нарушения безопасности переходов по условиям подтопления опор (затопления пойменных территорий $P(З)$) возрастает на участках, где опоры расположены на пойме. Относительная глубина затопления этих опор в период половодья максимальна для равнинных и крупных широкопойменных рек. При сооружении ЛЭП высотное расположение опор выбирается с приоритетной минимизацией величины $P(З)$. Поэтому для всех изученных переходов $P(З) < 0.4$. Максимальные значения этой вероятности в (0.3–0.4) могут отмечаться в любых природных условиях. Отсутствие опасности этого гидрологического явления оказалось характерным для небольших зарегулированных прудами равнинных рек Северного Кавказа.

Интегральная оценка безопасности переходов определена изменчивостью (при переходе от северо-западного и центрального к южному району исследований) влияния горизонтальных деформаций. На реках северо-запада ЕТР значения P_0 меняются от 0.13 до 0.58, на реках центра ЕТР – в более узком (от 0.21 до 0.36), а на реках Северного Кавказа – в более широком диапазоне значений (от 0.03 до 0.7). С учетом этих значений можно определять комплексное состояние переходов ЛЭП и меры, направленные на ликвидацию (предупреждение) угроз для этого вида транспорта.

Оценка состояния переходов ЛЭП через реки по разработанной технологии демонстрирует зависимость от региональных гидрологических условий. Это свидетельствует о ее восприимчивости к характерным опасным природным процессам и адекватности. На ее основе можно разрабатывать программы гидрологического мониторинга переходов ЛЭП на этапах их эксплуатации. Частота наблюдений зависит от интегрального показателя опасности гидрологических явлений. Если $P_0 < 0.2$, мониторинг следует проводить 1 раз

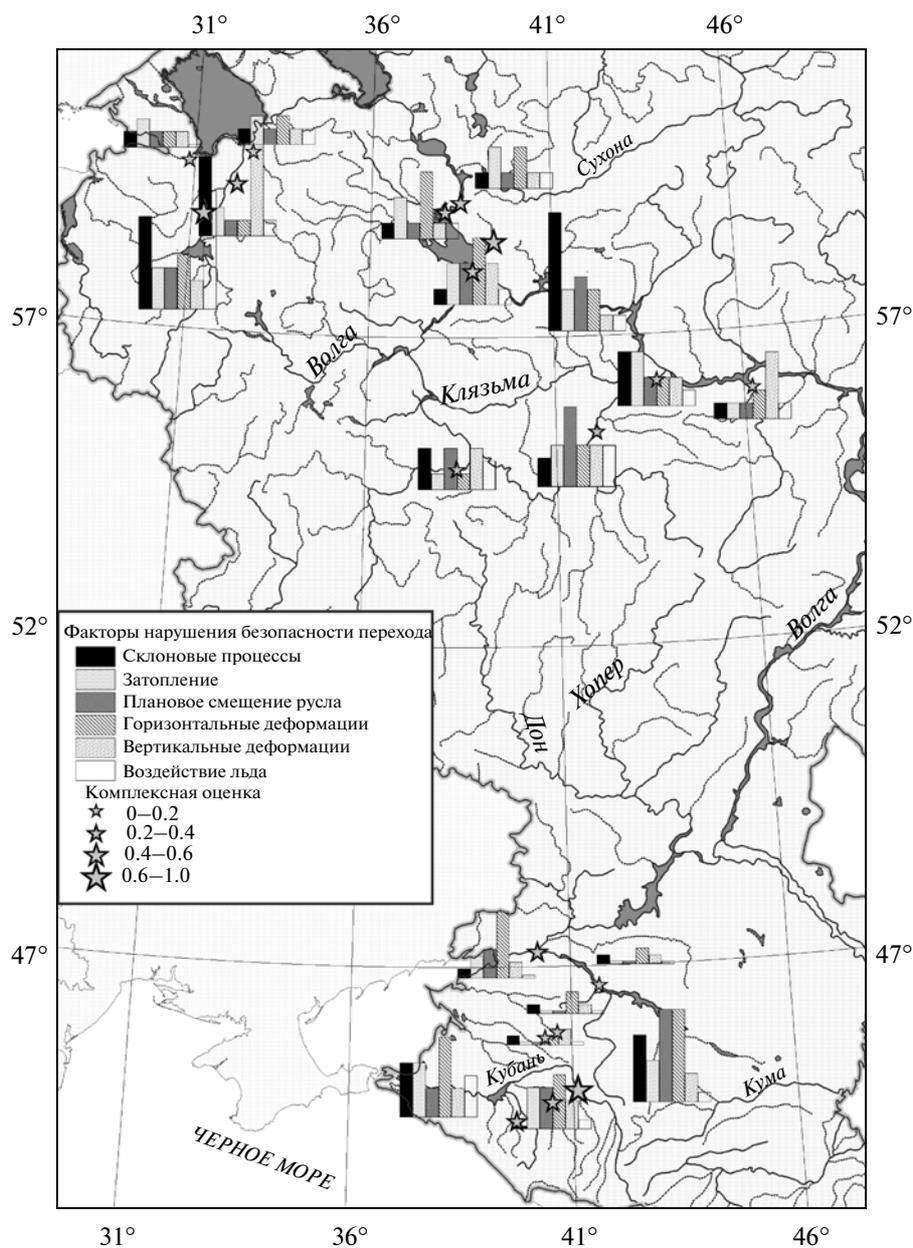


Рис. 2. Карта-схема состояния переходов ЛЭП через реки по безопасности их эксплуатации.

в 5 лет. Для переходов, характеризующихся относительно устойчивым состоянием ($P_0 = 0.2-0.4$), мониторинг гидрологической обстановки проводится 1 раз в 3 года. При $P_0 = 0.4-0.6$ и $P_0 > 0.6$ состояние перехода квалифицируется как слабоустойчивое и неустойчивое, что соответствует необходимости ежегодного обследования переходов ЛЭП. При наличии оценок опасности природных процессов P_i , равных $0.6-0.8$ или превышающих 0.8 , их мониторинг должен иметь внутригодовую ритмику.

ВЫВОДЫ

Безопасность переходов ЛЭП через речные долины зависит от многих природных явлений. Их влияние на экономически эффективную и безопасную эксплуатацию этого класса инженерных сооружений существенно изменяется по территории ЕТР. Уменьшение вероятности воздействия опасных гидрологических явлений на эти сооружения требует учета их специфики для равнинных, полугорных и горных рек, различных морфодинамических типов русла, участков рек с наличием или отсутствием поймы, большим или меньшим

затоплением опор ЛЭП. На этапах эксплуатации ЛЭП важно иметь технологии индивидуальной и консолидированной оценки влияния опасных природных явлений на безопасность работы опор и ЛЭП в различных природных условиях и в разные сезоны года. Разработанная технология такой оценки применительно к условиям северо-запада, центра ЕТР и Северного Кавказа обнаруживает достаточную эффективность для проведения сравнительного анализа ЛЭП по условиям раздельного и интегрального воздействия опасных гидрологических и склоновых процессов на их уязвимость, а также для определения периодичности мониторинговых наблюдений, разработки состава этих исследований.

СЕПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
2. *Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество и окружающая среда. М.: Издательский дом «Гордец», 2004. Т. VI. С. 345–374.
3. *Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Иванов В.В., Чалый А.П.* К учету опасных природных процессов на переходах трубопроводов через реки // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2008. Вып. 16. С. 147–172.
4. *Беркович К.М., Власов Б.Н.* Особенности русловых процессов на реках Нечерноземной зоны РСФСР // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1982. № 3. С. 28–34.
5. *Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А.* Механизм переформирования берегов Волги в Рыбинске // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2003. Вып. 14. С. 131–144.
6. *Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экологическое русловедение. М.: ГЕОС, 2000. 332 с.
7. *Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
8. Методические указания по определению ледовых нагрузок на опоры мостов. СПб.: Росгидрометцентр, 1993. 47 с.
9. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82.. М.: ГОССТРОЙ СССР, 1989. 53 с.
10. *Попов И.В.* Деформация речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 364 с.
11. Рекомендации по инженерным изысканиям для прогноза переработки берегов водохранилищ, М.: ПНИИИС, 1986. 61 с.
12. Рекомендации по учету руслового процесса при проектировании ЛЭП. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 180 с.
13. *Ржаницын Н.А.* Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 263 с.
14. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефте- и газопроводов). ВСН 163-83. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 12 с.
15. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
16. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. М.: ЛКИ, 2008. Т. 1. 608 с.
17. *Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В. и др.* Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.