

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 556.5:551.4.04:36.222.5

Р.С. Чалов¹УПРАВЛЕНИЕ РУСЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ КАК ОСНОВА
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

Рассмотрены основные принципы и методы управления русловыми процессами на судоходных реках для обеспечения гарантированных глубин на водных путях при соблюдении требований гидро-экологической безопасности и сохранении рек как природных объектов. Они базируются на закономерностях руслового режима рек, многолетних и сезонных деформаций перекатов, учете стадийности развития форм русла и форм руслового рельефа. Показана технико-экономическая и экологическая эффективность реализации методов проектирования, опирающихся на естественные тенденции русловых переформирований и их прогнозные оценки.

Ключевые слова: формы русла, русловой рельеф, перекаты, побочни, осередки, разветвления, меандрирующие реки, дноуглубление, выправление русел, судоходные реки, гарантированные глубины, судовой ход, устойчивость, стабилизация, деформации.

Введение. Использование рек как путей сообщения среди всех других видов освоения водных ресурсов в наиболее полной мере базируется на учете особенностей их руслового режима. Это определяется зависимостью состояния судоходных трасс и методов дноуглубления от направленности и интенсивности переформирований русел на всех структурных уровнях проявлений русловых процессов. Поэтому проектирование прорезей и выправительных сооружений максимально опирается на руслоформирующую деятельность речного потока. Особенно важен учет русловых процессов на реках с неустойчивым и слабоустойчивым руслом (Северная Двина, Вычегда, Печора, Лена, Обь, Волга, Дон на незарегулированных участках, Ока), на которых условия судоходства лимитируются мелководностью перекатов и перекатных участков, многолетним и сезонным режимами их деформаций, переформированиями русла в целом. Правильный выбор трассы фарватера, стабилизация ее положения, обеспечение оптимальных для судоходства глубин определяются соответствием методов дноуглубления русловому режиму рек и прогнозным оценкам русловых переформирований [Маккавеев, 1949; Проектирование ..., 1964]. Это вместе с тем обеспечивает гидроэкологическую безопасность при выполнении путевых мероприятий и сохранение рек как природных объектов.

Такой подход, представляющий собой управление русловыми процессами, характерен для российской школы воднотранспортного использования рек. Основоположники учения о русловых процессах В.М. Лохтин и Н.С. Лелявский, будучи инженерами-путейцами, еще в конце XIX в. подчеркивали зависимость состояния водных путей от природных

условий и руслового режима рек и, соответственно, выбора методов регулирования русел рек от его особенностей. В этом – принципиальное отличие от подхода, получившего распространение на Западе, где судоходные реки подверглись гидротехническому преобразованию, канализованы и, утратив во многом свой природный облик, стали объектами экологической напряженности и активизации опасных гидрологических явлений (например, наводнений). В результате сейчас ставится вопрос о природоприближенном их восстановлении [Dingethal et al., 1985; Gebler, 1995; Румянцев с соавт., 2001].

Методика и объекты исследования. На основе многолетних (с 1957 г.) исследований руслового режима рек России для обоснования мер по улучшению условий судоходства разработаны приемы и методы проектирования судовых ходов, применение которых на практике обеспечило технико-экономическую эффективность и гидроэкологическую безопасность дноуглубления. Эти исследования, инициатором и идеологом которых был Н.И. Маккавеев, выполнялись на Северной Двине, Вычегде, Сыsole [Русловые ..., 2012], Оби, Томи, Бие, Катунь [Русловые ..., 2001], Лене, Вилуе, Алдане, Витиме, Киренге [Водные ..., 1995], Енисее [Белый с соавт., 2000; Беркович с соавт., 2003], а также на Амударье [Маккавеев с соавт., 1976] и Днестре [Беркович с соавт., 1992]. Для этих рек даны прогнозные оценки русловых деформаций, обоснованы схемы регулирования русел и рекомендации по их реализации на затруднительных для судоходства перекатных участках.

Обсуждение результатов. Врезанные или широкопойменные русла, их различная морфодинамика, степень устойчивости (или неустойчивости), пес-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. сотр., докт. геогр. н.; e-mail: rschalov@mail.ru

чаный или галечнико-валунный состав наносов, неодинаковый сток наносов и наличие местных источников его поступления, особенности водного режима, геолого-геоморфологическое строение русел и берегов определяют специфику подходов к регулированию русел на разных реках, создают большое разнообразие приемов и методов улучшения водных путей. Вместе с тем при всей специфике русловых процессов и особенностях дноуглубления создание устойчивых водных путей на реках разных бассейнов опирается на некоторые общие принципы, основывающиеся на опыте выправления русел [Маккавеев, 1940, 1949; Проектирование ..., 1964; Руководство ..., 1974]:

1. Максимальное использование работы потока в многоводную фазу режима, когда осуществляются основные русловые деформации и проходят руслоформирующие расходы воды [Проектирование ..., 1964].

2. Применение в комплексе методов разработки дноуглубительных прорезей и отвалов грунта, извлекаемого из прорезей, в качестве выправительных сооружений.

3. Использование ведущих коренных и высоких пойменных берегов, вогнутостей (выбоин) и мысов в их конфигурации, побочней, осередков и островов как естественных форм, воздействующих на направленность работы потока.

4. Выполнение капитальных дноуглубительных работ на всем протяжении затруднительных для судоходства участков, в пределах которых все формы русла (излучины, разветвления) и руслового рельефа (перекаты) развиваются сопряженно.

На *меандрирующих реках* радикальным способом улучшения условий судоходства является спрямление развитых и крутых излучин посредством разработки канала через их шпоры. Эти работы осуществляются, если кривизна излучин превысила критическое значение (отношение длины русла к шагу излучин $l/L > 1,6$). Естественным путем их спрямление возможно, если руслоформирующие расходы воды проходят при затопленной пойме. В этом случае разработка канала лишь предваряет саморазмыв вдоль наиболее пониженной тыловой части или ложбины на пойме, где сосредотачивается поток половодья. В дальнейшем канал углубляется, расширяется, а бывшая излучина превращается в староречье (рис. 1). Однако для улучшения условий судоходства и сокращения длины судового хода спрямление излучин производится редко, так как экономически себя не оправдывает. Только с этой целью в середине XX в. были искусственно спрямлены две крутые петлеобразные излучины ($l/L > 3-4$) на верхней Сухоне, а раньше была спрямлена серия излучин «Окольная Сухона» длиной 21 км, благодаря чему изменилось положение узла слияния Сухоны, Вологды и Лежи [Рулева с соавт., 2010]. Обычно реализация проектов спрямления возможна при заинтересованности других отраслей экономики: отвод реки от города из-за его разрушения при размыве вогнутого берега (таковы проекты спрямления

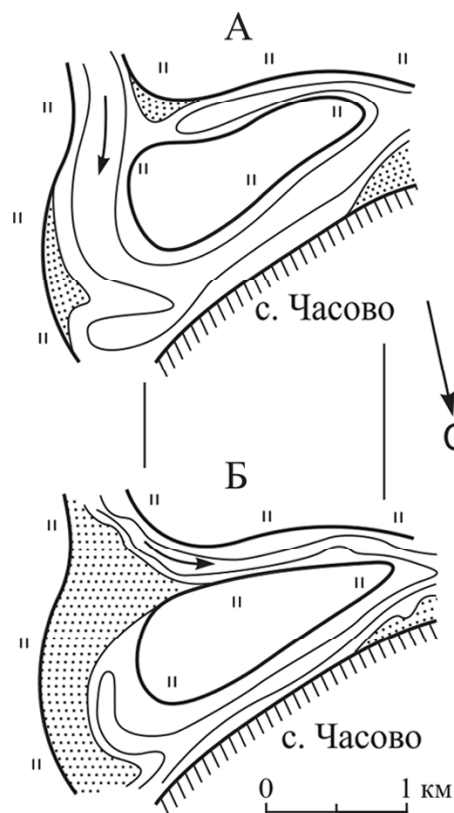


Рис. 1. Спрявление Часовской излучины на р. Вычегде. Планы русла: А – до спрямления (1946 г.), но с развивающейся спрямляющей шпору протокой; Б – после спрямления (1970-е гг.)

Fig. 1. Straightening of the Chasovsky meandr on the Vychegda River. Schemes of the channel: А – before straightening (1946) but with evolving groin-straightening branch; В – after straightening (1970-s)

излучин на Иртыше у г. Ханты-Мансийска [Ребковец с соавт., 2009] и на Оби у г. Колпашево [Беликов с соавт., 2010]), понижение уровня воды для снижения риска наводнений (р. Янцзы в пределах равнины Лянху [Чалов с соавт., 2006], Терек и др.).

Если спрямление излучин не производится, положение трассы судового хода согласовывается со скоростным полем потока и циркуляционными течениями, различными в зависимости от стадии развития излучин, на перевалах от одного берега к другому на крыльях или в вершине излучин. На пологих излучинах она должна располагаться в верхнем крыле вдоль выпуклого берега, в нижнем – вдоль вогнутого. Перевал фарватера от одного берега к другому при этом происходит в привершинной части излучины, смещаясь вверх по течению по мере увеличения ее кривизны. Соответственно располагаются прорези и выправительные сооружения, закрепляющие побочни и повышающие их отметки (рис. 2).

На крутых петлеобразных излучинах судовый ход прижимается к вогнутому берегу по всей их длине, и перевал фарватера от одного берега к другому находится в месте перегиба русла между соседними излучинами. Положение прорези согласовывается с режимом находящегося здесь переката: возле верхнего побочня, если перекат имеет

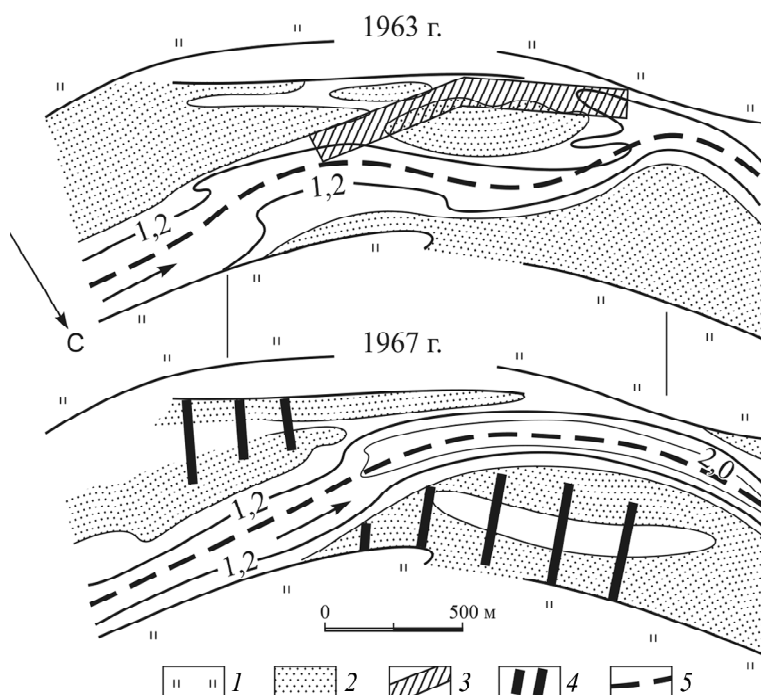


Рис. 2. Выправительные работы на IV и V Парчегских перекатах р. Вычегды: 1 – пойма; 2 – прирусловые отмели; 3 – дноуглубительная прорезь; 4 – дамбы; 5 – судовой ход

Fig. 2. Straightening of the IV and V Parcheg natural bars of the Vychegda River: 1 – floodplain; 2 – point bar; 3 – dredging cut; 4 – dams; 5 – water way

развитую затонскую часть, в нижнем положении – без затонской части. На излучинах, где нарушено условие безотрывного обтекания потоком вогнутого берега (отношение радиуса кривизны к ширине русла $r/b_p < 2,5-3$), судовой ход располагается у выпуклого берега, а отвалы грунта из прорезей укладываются в зоны отрыва потока от вогнутого берега. Применение таких приемов характерно для крутых вынужденных излучин, у которых вогнутый берег в нижнем крыле является коренным, трудно размываемым.

Укрепление размываемых участков берегов на излучинах ликвидирует одну из главных причин сезонного наращивания гребней перекатов, так как резко сокращается поступление в реку продуктов размыва, что приводит к снижению высоты гребней перекатов и росту глубины.

На **реках с прямолинейным неразветвленным руслом** выправление водного пути эффективно и легко осуществимо, если один из берегов коренной, сложенный трудноразмываемыми породами. Основным методом регулирования является правило «ведущего берега» [Проектирование ..., 1964]: прорезь разрабатывается вдоль высокого коренного берега; отвалы грунта используются для повышения отметок прирусловых отмелей в противоположной части русла или возведения здесь полузапруд. Надобность в их установке возникает также, если высокий берег име-

ет неровные очертания (для выравнивания его линии) или в местных расширениях русла. Относительная устойчивость русла, следующего вдоль такого берега, определяется особенностями гидравлического режима и скоростного поля потока в половодье при затопленной односторонней пойме.

Ограничением для расположения трассы вдоль коренного берега может быть неровная его линия в плане, выпски из оврагов, наличие скальных гряд и мысов. В первом случае у коренного берега формируются массивные отмели, стрежень потока и, соответственно, судовой ход отклоняются от него, формируются перекаты. Закрепление судовой хода осуществляется благодаря максимальному использованию направляющего воздействия на поток выступов (мысов) коренного берега – трассированием прорезей на перевале к пойменному берегу по направлению его плеча и возведением продольной дамбы на его продолжении.

Правило «ведущего берега» можно применять в русле с двусторонней поймой, где роль ведущих выполняют высокие пойменные яры, особенно глинистые, заросшие густым лесом, но при условии, что руслоформирующие расходы проходят до выхода воды на пойму. Его можно также распространять на разветвленные русла, если судоходный рукав располагается возле высокого берега. Разработка капитальных прорезей в рукавах и перевод в них трассы судовой хода (рис. 3) сопровождается трансформацией русла с сопряженными, одиночными или иными типами разветвлений в русло с односторонними разветвлениями, а при отмирании рукава – в прямолинейное неразветвленное.

Разработка рукавов вдоль коренных или высоких пойменных берегов с использованием их в ка-

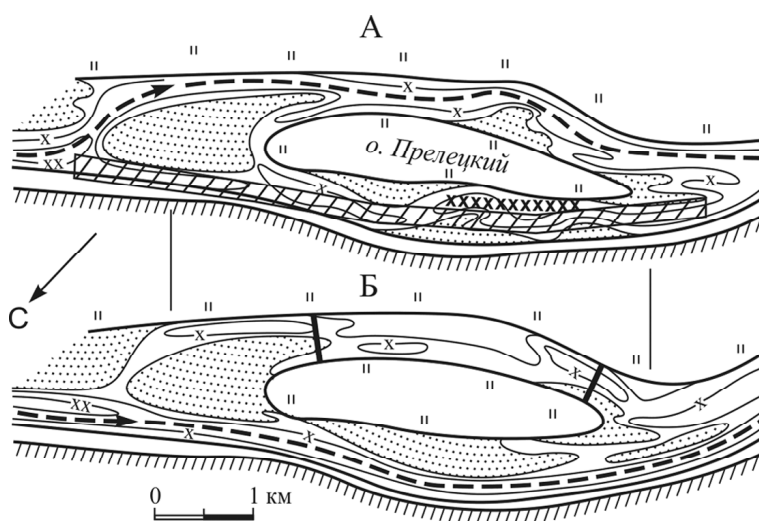


Рис. 3. Выправление русла р. Вычегды в районе Тимасовских перекатов

Fig. 3. Straightening of the Vychegda River bed near the Timasov natural bars

честве опоры судоходной трассы – метод выправления, впервые примененный на Северной Двине и на Вычегде в 50–60-е гг. [Маккавеев, 1960; Проектирование ..., 1964; Русловые ..., 2012] и в дальнейшем широко используемый на других больших судоходных реках (Оби, Лене) [Водные ..., 1995; Русловые ..., 2001].

При двусторонней пойме улучшение условий судоходства достигается закреплением побочной и разработкой переуглубленных прорезей, затрассированных в оптимальном для каждого переката положении (в соответствии с режимом его переформирования). Благодаря этому создается пологоизвилистая трасса, устойчивости глубин на которой способствует поле скоростей и циркуляционные течения.

Время разработки прорезей на перекатах на спаде половодья и отметки гребней выправительных сооружений согласуются с особенностями их режима и уровнями прохождения руслоформирующих расходов воды Q_{ϕ} . Излишне ранняя разработка прорезей приводит к увеличению объемов землечерпания и к необходимости повторных работ в меженьный период. Для сооружений межнего регулирования за расчетный руслоформирующий расход принимается нижний интервал Q_{ϕ} , для сооружений весеннего регулирования – средний интервал Q_{ϕ} или, при наличии верхнего интервала Q_{ϕ} , соответствующего затоплению поймы, уровень бровок поймы.

На *реках, разветвленных на рукава*, выбор положения судоходной трассы и методы регулирования русла наиболее сложны и разнообразны. На участках русла с *одиночными разветвлениями* или в *верхнем звене сопряженных разветвлений* мероприятием, обеспечивающим сохранение удовлетворительного состояния глубин, является заблаговременное отторжение побочной, надвигающейся на заход в судоходный рукав, когда они располагаются на таком расстоянии от него, при котором перераспределение стока еще не происходит. В про-

тивном случае растут объемы землечерпания, либо приходится осваивать развивающийся несудоходный рукав. В обоих случаях важно определить общую тенденцию развития узла разветвления и периодичности надвигания побочной.

Перераспределение расходов воды в одиночных узлах разветвления может быть вызвано увеличением кривизны судоходного рукава, что приводит к потере гидравлической выгоды извилистой формы русла ($l = 1,6L$, где l – длина русла по излучине рукава, L – шаг излучины). При этом целесообразно судоходный ход перенести в прямой рукав, причем оптимальные условия для перевода трассы фарватера в несудоходный рукав соответствуют соотношению $l > 1,4L$ для судоходного рукава.

Если разветвление находится ниже мыса (выступа) ведущего берега, следует учитывать его направляющее влияние на поток. При расположении судоходного хода возле коренного берега выше по течению это влияние наиболее существенно, так как поток отклоняется от него, вызывая развитие рукава в пойменных берегах. Воздействие на поток мыса может быть закреплено продольной дамбой, возведенной на его продолжении и частично перекрывающей заход в рукав возле него. Если влияние выступа на поток ослабевает, возможна разработка прорезей в рукаве вдоль коренного берега и перемещение в него судоходного хода. В этом случае формирующиеся ниже выступов и мысов ведущего берега побочники следует отторгать от него прорезями, пока они не разрослись настолько, что, огибая их, фарватер не переместился к противоположному пойменному берегу (рис. 4) и не стал постоянно изменять свое положение.

На участках *сопряженных разветлений русел*, где острова следуют друг за другом цепочкой, трасса судоходного хода должна последовательно располагаться в рукавах, проходящих то у одного, то у другого берега (правило «восьмерки») [Проектиро-

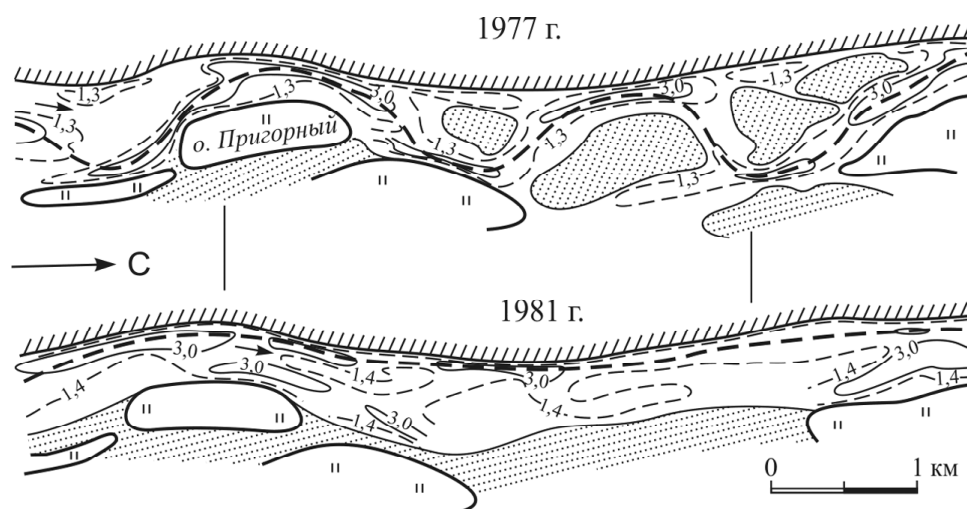


Рис. 4. Приведение судоходного хода к левому коренному берегу верхней Оби, имеющего неровные очертания (Вяткинские, Беловские перекаты), в результате отторжения от него побочной

Fig. 4. Moving the waterway to the left valley side of the Upper Ob' River indented as a result of point bars formation (Vyatkinskiye and Belovskiye natural bars)

вание ..., 1964; Русловые ..., 2001; Чалов, 2004]. Это позволяет уменьшить влияние побочной, надвигающихся на истоки рукавов, ограничить отток воды в несудоходные рукава, в максимальной степени использовать направляющее воздействие ведущих берегов и обеспечить пологий перевал фарватера из одного рукава в другой ниже по течению. При таком подходе перекаты, формирующиеся при сопряжении рукавов, в их истоках или в устье, либо не лимитируют судоходство, либо требуют выполнения дноуглубительных работ в небольших объемах. При обосновании трассы участка русла необходимо рассматривать на всем протяжении сопряженных разветвлений вплоть до тех мест, где русло приобретает иной морфологический облик. Выправление русла в отдельном звене сопряженных разветвлений может нарушить естественный ход процессов и отрицательно скажется на состоянии смежных участков русла.

В пределах каждого звена сопряженных разветвлений судовой ход должен быть расположен в крайнем правом или крайнем левом положении, при котором в максимальной степени используется направляющее воздействие на поток ведущих берегов. Если это условие не соблюдается и трасса фарватера проходит посередине русла, в рукаве возникает сложный перекатный участок. Такие перекатные участки обычно являются наиболее сложными для судоходства, и глубины на них выдерживаются посредством интенсивного землечерпания.

Для коренного улучшения условий судоходства в верхнем звене сопряженных разветвлений выбирается рукав, отличающийся наибольшей пропускной способностью и находящийся в стадии активизации. Такой рукав представляет собой часто продолжение вышележащего плеса. Наиболее благоприятны для расположения судовой ходы рукава, проходящие вдоль коренного берега, что позволяет закрепить трассу судовой ходы во всей системе сопряженных рукавов. Однако если заход в такой рукав располагается ниже мыса, отклоняющего поток к противоположному берегу, предпочтение следует отдать рукаву, проходящему в пойменных берегах. Другим

возможным ограничением использования рукавов возле коренных берегов являются плотные коренные породы или скальные гряды, подстилающие русло. Такие ограничения могут возникнуть и в промежуточных звеньях сопряженных разветвлений; в таких случаях трассу судовой ходы по правилу «восьмерки» следует располагать так, чтобы эти рукава были бы несудоходными. С другой стороны, разработка прорезы в плотных коренных грунтах, подстилающих русла рукавов, особенно в верхнем звене, способствует общему закреплению трассы судовой ходы.

В наиболее полной мере правило «восьмерки» при выправлении русла было использовано на р. Оби между г. Новосибирском и устьем р. Томи: здесь оно реализовано почти на половине длины участка или посредством разработки капитальных прорезей в ранее несудоходных рукавах или закреплением прорезями и сооружениями существующего оптимального положения трассы судовой ходы (рис. 5).

На участке с параллельно-рукавными разветвлениями судовой ходы должна располагаться на всем участке в рукаве, проходящем вдоль одного и того же берега. Выбор рукава для расположения трассы определяется устойчивостью русла обоих рукавов, их вторичной разветвленностью, условиями поступления в них влекомых (донных) наносов, характером берегов и т. д. На Северной Двине наиболее сложным для состояния водного пути является Паячный – Ягрышский перекатный участок, соответствующий параллельно-рукавному разветвлению, длиной 22 км. Здесь еще в 1950-е гг. ежегодно приходилось извлекать более 1 млн м³ грунта. Из двух рукавов разветвления правый проходит вдоль террасового берега, но в него поступают продукты размыва расположенной выше по течению песчаной Толоконной горы. Поэтому разработанный проект выправления русла, предложенный Н.И. Маккавеевым [1960], заключался в разработке системы прорезей в левом рукаве, в том числе углубляющих коренное (моренное) ложе; правый рукав перекрывался дамбами, перед заходом – по-

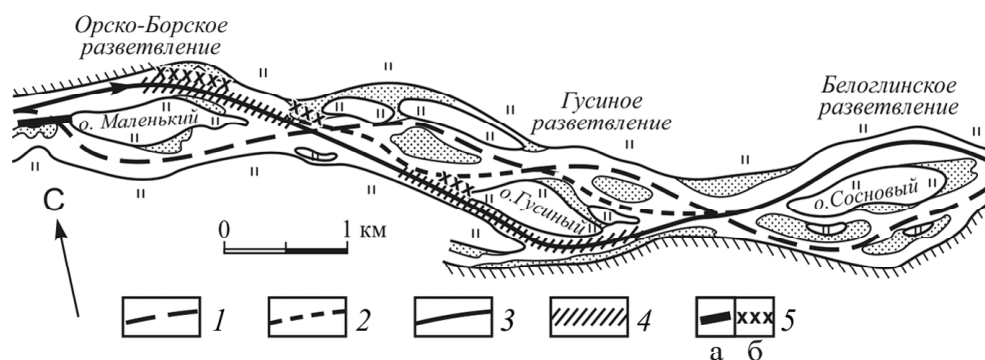


Рис. 5. Выправление русла р. Оби по правилу «восьмерки» в Орско-Борском, Гусином, Белоглинском разветвлениях. Обозначения: 1 – судовой ход в 30–50-е годы XX в.; 2 – судовой ход в 50-е гг.; 3 – судовой ход в 80-е годы (после выправления); 4 – капитальные прорезы; 5 – дамба (а) и расположение отвалов грунта (б)

Fig. 5. «Figure-eight» straightening of the Ob' River bed in Orsk-Borsk, Gusiny and Beloglinsky braidings. 1 – water way of the 1930-50-s; 2 – water way of the 1950-s; 3 – water way of the 1980-s (after straightening); 4 – main cuts; 5 – dam (a) and earth deposits location (b)

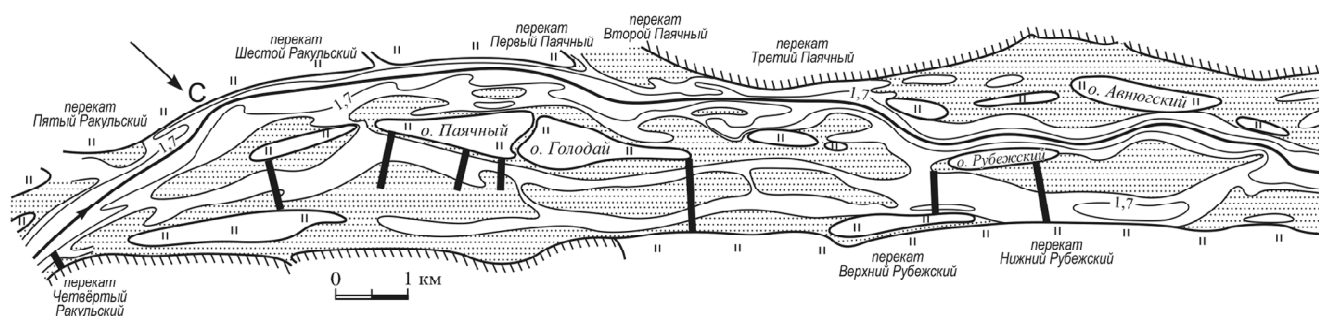


Рис. 6. Выправление Паячных, Рубежских, Коптельских, Ягрышских перекатов на р. Северная Двина (параллельно-рукавное разветвление)

Fig. 6. Straightening of Paechny, Rubezh, Koptelsk and Yagrysh natural bars on the Northern Dvina River (parallel channel braiding)

лузапрудой, ограничивающей сток воды в нем и привлекающей донные наносы (рис. 6).

Если обеспечить устойчивость трассы судового хода в рукавах вдоль одного из берегов затруднительно или нецелесообразно (например, из-за необходимости поддержания подходов водного пути к населенным пунктам на противоположных берегах), ее на перевалах следует закреплять вдоль ухвостьев островов. Это можно достичь своевременным отторжением развивающихся здесь кос и максимальным использованием направляющего воздействия на поток выбоин и мысов ведущих берегов, воздействие которых усиливается продольными дамбами. Возможно также перекрытие протоков между островами посередине русла, что приводит к консолидации островов и уменьшает число развивающихся в их ухвостьях кос [Безденежных, 1974].

Подобное перемещение трассы судового хода последовательно из левых рукавов в правые, снова в левые и т.д. характерно для параллельно-рукавных разветвлений нижнего течения р. Мезени (два участка длиной 31,5 и 43,5 км) [Чалов с соавт., 2010]. Чем больше длина перевала, тем сложнее и многочисленнее расположенные в их пределах мелковод-

ные перекаты, больше извилистость фарватера из-за незначительности воздействия ведущих берегов и рассредоточенности потока между осередками и островами посередине русла.

На участках с чередующимися односторонними разветвлениями используется подход, близкий к правилу «восьмерки» – трасса судового хода, полого изгибаясь, перемещается от одного берега к другому подобно пологим сегментным излучинам. Ее отличает постоянное расположение в рукавах, последовательно проходящих вдоль противоположных берегов и неустойчивость на перевалах от одного берега к другому благодаря отвлечению части стока в протоки и рукава среди островов, образующих нижнее звено, и впадение рукавов и протоков со стороны верхнего звена. Закрепление прорезей осуществляется, как и на перевалах судового хода между рукавами параллельно-рукавных разветвлений: отторжение кос в ухвостьях островов прорезями, используя направляющее воздействие выступов и мысов ведущих берегов.

В разветвлениях, образующихся при слиянии рек, расположение трассы судового хода зависит от возникающего при прохождении руслоформирующих

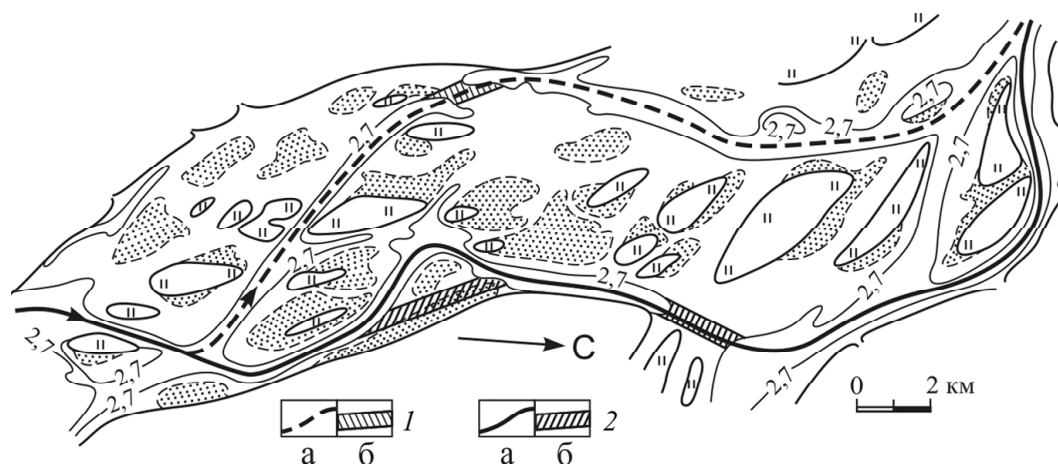


Рис. 7. Положение судового хода (а) и прорезей (б) на р. Лене в узле слияния с р. Алданом: 1 – в годы подпора Лены во время половодья; 2 – в годы с бесподпорными условиями на Лене во время половодья (план русла конца 70-х годов XX в.)

Fig. 7. Location of water way (a) and cuts (б) on the Lena River at the confluence with the Aldan River: 1 – for the Lena River water surface ascent during the spring flood; 2 – in the absence of the Lena River water surface ascent during the spring flood (channel scheme as of the late 1970-s)

расходов воды переменного подпора. В подпорных условиях судовой ход прокладывается в рукаве, образуя длинное слияние, в бесподпорных – в рукаве, образуя короткое слияние вдоль стрелки (рис. 7). На это накладывается удлинение кос от раздельной стрелки и, как следствие, общее смещение узла слияния вниз по течению, а затем прорыв стрелки в ее корневой части. Наиболее целесообразным является периодическое спрямление стрелки, не допуская ее избыточного смещения вниз.

На *перекатах, формирующихся на заходе в рукава или при их слиянии*, происходят периодические смещения судового хода, в процессе которых устанавливается крайнее верхнее или крайнее нижнее его положения, обеспечивающие наибольшие глубины и относительную стабилизацию трассы. Основной задачей выправления русла является закрепление судового хода в оптимальном положении посредством разработки прорези и укладки отвалов грунта в виде продольной дамбы, перекрывающей ту часть русла, куда судовой ход может переместиться. Крайнее верхнее положение трассы судового хода на перекатах является оптимальным, если оно поддерживается направляющим воздействием ведущих, в том числе пойменных, берегов. Если ведущий берег перед истоками рукава направляющего воздействия на поток не оказывает или в узле слияния находится зона замедления течения, прорези трассируются в крайнем нижнем положении с отвалами грунта на верхний побочень. Так как при этом создаются значительные затонские части, то повышение устойчивости судового хода достигается переуглублением прорезей.

На *реках с галечно-валунным руслом* дноуглубительные работы сопровождаются строительством выправительных сооружений, компенсирующих «посадки» уровней и уменьшающих возрастающие при этом объемы дноуглубления [Водные ..., 1995; Беркович с соавт., 1996]. Извлекаемый из прорезей грунт используется для возведения сооружений, концентрирующих поток по трассе фарватера. Наиболее эффективны сооружения межженного регулирования, стесняющие поток при низких уровнях. Нередко они могут быть единственным экономически оправданным способом увеличения глубин судового хода. Однако к их возведению следует подходить с большими предосторожностями, так как стеснение потока может привести к увеличению скоростей течения до величин, лимитирующих судоходство, и вызвать дополнительную «посадку» уровня. Полузапруды и дамбы весеннего регулирования быстро разрушаются в половодье и паводки.

Остановка движения крупных наносов на спаде уровней влечет за собой обмеление судоходной трассы, что приводит к необходимости увеличения в межень объемов дноуглубления. При их выполнении без возведения выправительных сооружений прорези трассируются, по возможности, в периферийных частях русла, где не происходит массового движения наносов в половодье и паводки.

Если перекаты располагаются сериями, при планировании дноуглубительных работ необходимо учитывать уменьшение глубины за счет «посадки» уровней на вышележащем перекате и обмеление нижележащего из-за поступления на него продуктов размыва прорези. На одиночных перекатах при разработке прорезей этими явлениями можно пренебрегать, так как их влияние не сказывается на выше- и нижележащих перекатах.

В широкопойменном разветвленном русле важен оптимальный выбор судоходного рукава. Таковым является рукав с относительно меньшей водностью, который обычно характеризуется большей глубиной, так как основной поток наносов устремляется в многоводный рукав [Белый с соавт., 1979; Беркович с соавт., 1996].

Реализация любого проекта не предотвращает формирование перекатов, сохраняются их многолетние и сезонные деформации; для обеспечения гарантированных глубин необходим выбор такого варианта расположения прорезей, при котором увеличивается их устойчивость и уменьшается заносимость; на первый план выдвигается учет тенденций развития русла и прогноз переформирования перекатов. Это позволяет своевременно переносить судовой ход без разработки дноуглубительных прорезей или выполнять землечерпательные работы в минимальных объемах. Их эффективность зависит от того, насколько учтен режим деформаций перекатов и перекатных участков, возможные изменения глубин на них в течение навигации. Это дает возможность минимизировать объемы землечерпания, свести работы по улучшению условий судоходства к профилактическим мероприятиям по предотвращению возможных неблагоприятных переформирований русла. Такой подход преобладал до 50-х годов XX в., когда гарантированные глубины были существенно меньше [Маккавеев, 1940, 1949; Проектирование ..., 1964], и стал вновь актуальным в настоящее время, когда резко сократилось по экономическим причинам дноуглубление.

Совокупность приемов, позволяющих выдерживать гарантированные габариты судового хода в течение навигации при минимальном дноуглублении, используя в наибольшей степени возможности саморазмыва перекатов, планируя в зависимости от них время разработки прорезей и выявления необходимости выполнения превентивных мероприятий, определяет оптимизационную модель путевых работ. Она опирается на знание многолетнего и сезонного режима перекатов, понимание того, на какой стадии переформирования находится каждый из них, в какой мере сопряжены режим смежных перекатов и прогнозные оценки их деформаций. Зная многолетний режим переформирования перекатов, следует закреплять оптимальное положение судового хода посредством разработки прорезей; если он сместился в неблагоприятное для состояния глубин положение, то его «возвращение» в наиболее выгодное возможно с помощью прорези, намечаемой на основе прогнозной оценки переформирования

ний. Во всех случаях планирование землечерпательных работ следует производить с учетом реальных (не приведенных к проектному уровню) глубин на перекате, вероятности и степени его саморазмыва или обмеления, возможностей проводить превентивные мероприятия. Такой подход может на длительный срок стабилизировать обстановку и снизить вероятность обмеления переката.

Более сложен учет сезонного режима перекатов. Аккумуляция наносов приводит часто к тому, что «разрывается» по всей ширине переката не только изобата гарантированной глубины, но и нулевая изобата. Такое явление характерно для Северной Двины, Печоры, Лены, верхней Оби. Однако реальная (дифференцированная) глубина при высоких уровнях может быть 3–5 м и более в самом мелком месте на перекате. Вопрос о том, нужно ли в таких условиях производить дноуглубление, зависит от сроков и степени саморазмыва гребня на спаде половодья и в межень. На одних перекатах к межени глубина вследствие размыва становится больше гарантированной, и тогда дноуглубительные работы выполнять нецелесообразно. На других размыв меньше, чем аккумуляция наносов в половодье, либо он не «успевает» за спадом уровней. В многоводные годы дифференцированные глубины на перекатах могут превышать гарантированные, и тогда также нет необходимости в дноуглублении.

Использование дифференцированных глубин при уровнях, превышающих проектные, дает возможность сократить объемы дноуглубительных работ, производить их только на тех перекатах, обмеление и недостаточный размыв которых к межени грозит срывом глубин. В этих условиях возрастает роль прогнозов уровней и расходов воды в маловодный период при прохождении паводков или волн попусков из водохранилищ. Методика таких прогнозов была разработана А.В. Христофоровым [Водные ..., 1995].

Учет водности важен не только при оценке сезонных и многолетних переформирований русла. Он необходим вследствие зависимости параметров русла и судового хода от расходов воды: в частности, в многоводные годы предпочтительны те положения фарватера на перекате, которые имеют большие радиусы кривизны, в маловодные годы – наоборот. Кроме того, в многоводные годы создаются благоприятные условия для отторжения побочной, углубления более прямых рукавов; системы сопряженных разветвлений иногда трансформируются в параллельно-рукавные; в маловодный период ситуация может быть прямо противоположной.

Перекаты, мелеющие в межень, требуют разработки эксплуатационных прорезей в период, когда происходит их обмеление. В одних случаях прорези должны располагаться, соединяя по кратчайшему пути плесовые ложбины, в других – там, где прослеживаются наибольшие глубины. Следует учитывать также периодические изменения положения

линии глубин, подобные многолетним, но происходящие в течение одной навигации или только ее маловодного периода. Таким образом, на основе учета многолетнего и сезонного режима перекатов можно обеспечить их поддержание при минимуме дноуглубления.

Выводы:

– применение на реках методов и приемов управления русловыми процессами, опирающимися на естественные (природные) механизмы их развития, обеспечило:

1) повышение устойчивости русел судоходных рек и 1,5–2-кратное увеличение глубин на перекатах (по сравнению с исходными);

2) укрепление (стабилизацию) форм русла и форм руслового рельефа (побочной, осередков), повышение отметок последних и, как следствие, их зарастание, а на реках с разветвленным руслом – прекращение периодических миграций потока по рукавам. В результате русло сужается, что приводит к его саморазмыву и увеличению глубин без дополнительного землечерпания. Это имеет не только технико-экономическое, но и экологическое значение: несудоходные рукава становятся объектами рыбного хозяйства и рекреации, снижается угроза занесения водозаборов, повышается надежность прогнозирования русловых деформаций при проектировании трубопроводов и мостовых переходов, происходит локализация и замедление размывов берегов. Побочным эффектом являются увеличение пропускной способности русел для ледохода, уменьшение вероятности возникновения затворов льда и связанных с ними наводнений, повышение самоочищающей способности реки, особенно в меженный период, снижение вероятности зимних заморов рыбы и улучшение водообмена между плесовыми ложбинами;

3) сокращение длины перекатов и перекатных участков и, как следствие, протяженности дноуглубительных прорезей (более чем в 3 раза) и уменьшение объемов землечерпания, то есть произошло уменьшение техногенной нагрузки на реки;

4) большую или меньшую трансформацию русла, вплоть до смены морфодинамического типа в направлении его упрощения, в частности, превращение одиночных и сопряженных разветвлений в односторонние или в прямолинейное неразветвленное русло, перекатных участков в плесовые с отдельными перекатами.

Таким образом, наряду с технико-экономическим эффектом (увеличение глубин, уменьшение объемов землечерпания и т. д.), выправительные и дноуглубительные работы привели к общей стабилизации и увеличению устойчивости русел, локализации и сокращению негативных (опасных) проявлений русловых процессов;

– в 90-е гг. XX в. дноуглубление на реках России было прекращено или сокращено до уровня 30–40-х гг. В результате на перекатах, которые при выправлении не имели естественных гидравлических предпосылок для стабилизации русла, расположенных ниже участков выправления и принявших на себя

поток наносов, проходящий через них транзитом, формирующихся ниже местных источников поступления наносов или намываемых на спаде половодья, глубины в межень вернулись в исходное состояние, восстановился прежний режим деформаций [Чалов, 2004]. Это повлекло за собой раннее закрытие навигации, ограничение судоходства или его прекращение на многих реках (Вычегда, Мезень). Вместе с тем на Оби, Северной Двине, Лене, Вычегде на участках, на которых выправление русел было успешным, его эффект сохраняется, и эти участки до сих пор не являются затруднительными для судоходства;

– возвращение рек в исходное состояние первой половины XX в. отрицательно сказалось в использовании водных ресурсов рек, поскольку хозяйственная инфраструктура, связанная с реками и приречными территориями, развивалась с учетом эксплуатации рек как водных путей. Произошло усиление опасных проявлений русловых процессов, уменьшение глубин на перекатах, сопровождающееся повышением уровня воды, и, как следствие этого, возросла вероятность возникновения ледовых заторов и угроза наводнений (Северная Двина, Лена, Обь, Иртыш, Енисей).

Благодарности. Выполнено по плану НИР кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, при поддержке грантов РФ (проект № 14-17-00155) и РФФИ (проект № 15-05-03752).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безденежных М.М. Улучшение путевых условий на Оби // Речной транспорт. 1974. № 7. С. 31–34.
- Беликов В.В., Завадский А.С., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Результаты моделирования спрямления русла р. Оби в районе г. Колпашево // Речной транспорт (XXI век). 2010. № 5. С. 82–87.
- Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.А., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология, динамика и регулирование русла р. Киренги в связи с транспортным освоением зоны БАМ // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. Вып. 7. С. 119–135.
- Белый Б.В., Виноградова Н.Н., Иванов В.В., Никитина Л.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология и деформации русла верхнего Енисея между Саяно-Шушенской ГЭС и Красноярским водохранилищем // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. Вып. 12. С. 158–183.
- Беркович К.М., Виноградова Н.Н., Иванов В.В., Чалов Р.С. Переформирования русла Енисея ниже Красноярской ГЭС в условиях интенсивной техногенной нагрузки // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. Вып. 14. С. 144–161.
- Беркович К.М., Зайцев А.А., Панин А.В., Чалов Р.С. Проблемы учета русловых процессов при организации и проведении путевых работ на равнинных реках с галечно-валунным руслом // Тр. Акад. водохоз. наук. Вып. 3. Водные пути и русловые процессы. М., 1996. С. 56–58.
- Беркович К.М., Злотина Л.В., Иванов В.В., Никитина Л.Н., Рязанов П.Н., Турыкин Л.А., Чалов Р.С., Чернов А.В. Развитие русла среднего и нижнего Днестра в условиях интенсивной антропогенной нагрузки // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. С. 141–165.
- Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
- Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 202 с.
- Маккавеев Н.И. Выбор трассы при выправлении рек с малоустойчивым руслом // Речной транспорт. 1960. № 3. С. 39–42.
- Маккавеев Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С. Опыт прогноза изменений рельефа русла неустойчивой реки (на примере Амударя) // Геоморфология. 1976. № 2. С. 43–49.
- Маккавеев Н.И., Советов В.С. Трассирование землечерпательных прорезей на перекатах равнинных рек Европейской части СССР // Тр. ЦНИИРФ. Вып. 3. 1940. 60 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. М.: Транспорт, 1964. Вып. 36. 262 с.
- Ребковец А.В., Боровков С.В., Николаев В.Ф. Инженерное регулирование русла Иртыша // Речной транспорт (XXI век). 2009. № 1. С. 37–39.
- Руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий на затруднительных участках свободных рек. Л.: Транспорт, 1974. 310 с.
- Рулева С.Н., Завадский А.С., Кичигин А.Н., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Условия формирования и морфология русла реки Сухоны // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 5. М.: МАКС пресс, 2010. С. 421–439.
- Румянцев И.С., Чалов Р.С., Кромер Р., Нестманн Ф. Природоприближенное восстановление и эксплуатация водных объектов. М.: МГУП, 2001. 286 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: ООО «Журнал “РТ”», 2012. 492 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
- Садовский Г.Л. Пособие по трассированию землечерпательных прорезей. М.: Речной транспорт, 1961. 183 с.
- Чалов Р.С. Проблемы русловых процессов в связи с развитием и совершенствованием водных путей на свободных реках на современном этапе // Основные направления развития и совершенствования водных путей. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 13–26.
- Чалов Р.С., Власов Б.Н., Лю Шугуан, Чжао Еань, Юй Вэньчоу. Специфические формы разветвленного русла р. Янцзы и их эволюция // География и природные ресурсы. 2006. № 2. С. 151–157.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Чалов С.Р. Морфология, переформирования русла и перекатов р. Мезени (нижнее течение) // Географический вестник. 2010. № 3(14). С. 82–87.
- Dingethal F.J., Jürging P., Kaule G., Wintzierl W. Kitsgrube und Landschaft. Handbuch über den Abbau von Sand und Kies, über Gestaltung, Rekultivierung und Renaturierung. Hamburg-Berlin: Vtrlag Paul Parey. 1985. 250 p.
- Gebler R. Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischauflstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer // Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe. Heft 181. 1995. P. 25–57.

Поступила в редакцию 22.09.2016
Принята к публикации 09.02.2017

R.S. Chalov¹CONTROL OF FLUVIAL PROCESSES AS A BASIS
FOR WATERWAY IMPROVEMENT

General principles and techniques of controlling the fluvial processes on navigable rivers are discussed, which aim at maintaining the safe depths of waterways with respect for hydroecological safety requirements and the need of preserving rivers as natural objects. They are based on the regularities of river channel regime and long-term and seasonal deformations of natural bars, as well as on the consideration of the evolution stages of channel forms and forms of channel relief. Technical-economic and environmental efficiency of designing methods supported by the natural trends of channel re-formation and their prognostic evaluation is demonstrated.

Key words: channel forms, channel relief, natural bars, point bars, braid bars, river braids, meandering rivers, channel dredging, channel stabilization, navigable rivers, safe depths, waterway, stability, regulation, deformations.

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation (project № 14-17-00155) and the Russian Foundation for Basic Research (project № 15-05-03752).

REFERENCES

- Bezdenzhnykh M.M.* Uluchshenie putevykh uslovij na Obi [Improvement of waterway conditions on the Ob' River] // *Rechnoj transport*. 1974. № 7. P. 31–34 (in Russian).
- Belikov V.V., Zavadskij A.S., Ruleva S.N., Chalov R.S.* Rezul'taty modelirovaniya spryamleniya rusla r. Obi v rajone g. Kolpashevo [The results of modeling the Ob' River bed straightening near the town of Kolpashevo] // *Rechnoj transport (XXI vek)*. 2010. № 5. P. 82–87 (in Russian).
- Belyj B.V., Berkovich K.M., Borsuk O.A., Zajcev A.A., Lodina R.V., Chalov R.S., Chernov A.V.* Morfologiya, dinamika i regulirovanie rusla r. Kirengi v svyazi s transportnym osvoeniem zony BAM [Morphology, dynamics and regulation of the Kirenga River bed due to transport development of the BAM (Baikal–Amur Mainline) area] // *Erozija pochv i ruslovyje processy*. M.: MGU, 1979. V. 7. P. 119–135 (in Russian).
- Belyj B.V., Vinogradova N.N., Ivanov V.V., Nikitina L.N., Chalov R.S., Chernov A.V.* Morfologiya i deformacii rusla verhnego Eniseya mezhdru Sayano-Shushenskoj GES i Krasnojarskim vodohranilishchem [Morphology and deformation of the upper Yenisei River bed between the Sayano–Shushenskaya HPP and the Krasnojarsk Reservoir] // *Erozija pochv i ruslovyje processy*. M.: MGU, 2000. V. 12. P. 158–183 (in Russian).
- Berkovich K.M., Vinogradova N.N., Ivanov V.V., Chalov R.S.* Pereformirovaniya rusla Eniseya nizhe Krasnojarskoj GES v uslovijah intensivnoj tehnogennoj nagruzki [Reshaping the Yenisei River bed downstream Krasnojarsk hydroelectric power station under the intense anthropogenic impact] // *Erozija pochv i ruslovyje processy*. M.: MGU, 2003. V. 14. P. 144–161 (in Russian).
- Berkovich K.M., Zajcev A.A., Panin A.V., Chalov R.S.* Problemy ucheta ruslovykh processov pri organizacii i provedenii putevykh rabot na ravninnykh rekah s galechno-valunnym ruslom [The problems of fluvial processes accounting for the organization and implementation of waterway works on the plain rivers with gravel and boulder riverbed] // *Tr. Akad. vodohoz. Nauk*. 1996. V. 3. *Vodnye puti i ruslovyje processy*. P. 56–58 (in Russian).
- Berkovich K.M., Zlotina L.V., Ivanov V.V., Nikitina L.N., Ryazanov P.N., Turykin L.A., Chalov R.S., Chernov A.V.* Razvitie rusla srednego i nizhnego Dnestra v uslovijah intensivnoj antropogennoj nagruzki [The development of the Middle and Lower Dniester River bed under the intense anthropogenic load] // *Ekologicheskie problemy erozii pochv i ruslovykh processov*. M.: MGU, 1992. P. 141–165 (in Russian).
- Chalov R.S.* Problemy ruslovykh processov v svyazi s razvitiem i sovershenstvovaniem vodnykh putej na svobodnykh rekah na sovremennom etape [The issues of fluvial processes in relation to the actual development and improvement of waterways on free rivers] // *Osnovnye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya vodnykh putej*. M.: MGU, 2004. P. 13–26 (in Russian).
- Chalov R.S., Vlasov B.N., Lju Shuguan, Chzhao Ean', Juj Vjen'chou.* Specificheskie formy razvetylenogo rusla r. Yanczy i ih evoljucii [The specific forms of the braided Yangtze River bed and their evolution] // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2006. № 2. P. 151–157 (in Russian).
- Chalov R.S., Zavadskij A.S., Ruleva S.N., Chalov S.R.* Morfologiya i pereformirovanie rusla i perekatov r. Mezeni (nizhnee techenie) [The morphology and reshaping of the Mezen' River bed and riffles in its lower reaches] // *Geograficheskij vestnik*. 2010. № 3(14). P. 82–87 (in Russian).
- Dingethal F.J., Jürging P., Kaule G., Wtinzlerl W.* Kitsgrube und Landschaft. Handbuch über den Abbau vjn Sand und Kies, über Gestaltung, Rekultivierung und Renaturierung, Vtrlag Paul Parey, Hamburg-Berlin, 1985, 250 p.
- Gebler R.* Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer // *Institut für Wasserbau und Kulturtechnik dtr Universität Karlsruhe*. 1995. Heft 181. P. 25–57.
- Makkaveev N.I.* Ruslovoj rezhim rek i trassirovanie prorezej [River channel regimes and cuts tracing]. Moscow: Rechizdat, 1949. 202 p. (in Russian).
- Makkaveev N.I.* Vybor trassy pri vypravlennii rek s maloustojchivym ruslom [Choice of waterway for straightening rivers with unstable beds] // *Rechnoj transport*. 1960. № 3. P. 39–42 (in Russian).
- Makkaveev N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S.* Opyt prognoza izmenenij rel'efa rusla neustojchivoy reki (na primere Amudar'i) [Experience of forecasting the changes of the channel relief for unstable rivers (case study of the Amu Darya River)] // *Geomorfologiya*. 1976. № 2. P. 43–49 (in Russian).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor; Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography.; e-mail: rschalov@mail.ru

Makkaveev N.I., Sovetov V.S. Trassirovanie zemlecherpatel'nyh prorozej na perekatah ravninnyh rek Evropejskoj chasti SSSR [Tracing of the dredging cuts in the riffles of plain rivers of the European part of the USSR] // Tr. CNIIRF. 1940. V. 3. 60 p. (in Russian).

Proektirovanie sudovyh hodov na svobodnyh rekah [Designing navigable passes on free rivers] // Tr. CNIIEVT. M., 1964. V. 36. Transport. 262 p. (in Russian).

Rebkovec A.V., Borovkov S.V., Nikolaev V.F. Inzhenernoe regulirovanie rusla Irtysha [Engineering regulation of the Irtysh River bed] // Rečnoj transport (XXI vek). 2009. № 1. P. 37–39 (in Russian).

Rukovodstvo po proektirovaniju koren'nogo uluchshenija sudohodnyh uslovij na zatrudnitel'nyh uchastkah svobodnyh rek [Design guidelines for the radical improvement of navigability of the intricate reaches of free rivers] // Transport. Leningrad, 1974. 310 p. (in Russian).

Ruleva S.N., Zavadskij A.S., Kichigin A.N., Chalov R.S., Chalov S.R. Usloviya formirovaniya i morfologiya rusla reki Suhony [Morphology and formation conditions of the Sukhona River bed] //

Eroziionnye i ruslovyje processy. M.: MAKSS press, 2010. V. 5. P. 421–439 (in Russian).

Rumyancev I.S., Chalov R.S., Kromer R., Nestmann F. Prirodopriblizhennoe vosstanovlenie i ekspluatatsiya vodnyh ob'ektov [Close-to-nature restoration and maintenance of water bodies]. M.: MGUP, 2001. 286 p. (in Russian).

Ruslovyje processy i vodnye puti na rekah bassejna Severnoj Dviny [Fluvial processes and waterways on the rivers of the Northern Dvina River Basin]. OOO «Zhurnal “RT”». M., 2012. 492 p. (in Russian).

Ruslovyje processy i vodnye puti na rekah Obskogo bassejna [Fluvial processes and waterways on the rivers of the Ob' River Basin]. RIPJeL plus. Novosibirsk, 2001. 300 p. (in Russian).

Sadovskij G.L. Posobie po trassirovaniyu zemlecherpatel'nyh prorozej [Manual for tracing of dredging cuts] // Rečnoj transport. 1961. 183 p. (in Russian).

Vodnye puti bassejna Leny [Waterways of the Lena River Basin]. M.: MIKIS, 1995. 600 p. (in Russian).

Received 22.09.2016

Accepted 09.02.2017