

Оценка перспектив развития речного транспорта России на основе прогноза изменений стока и морфодинамики гидросети вследствие глобального потепления климата

С. Г. Смолина

Институт системного анализа РАН

Практическая актуальность экологических проблем, связанных с взаимодействием общества с окружающей средой, с изменением климата, с участвовавшими случаями природных катастроф в настоящее время диктует необходимость качественных прогнозов и обоснованности принимаемых решений на всех уровнях управления. В [7, 10] рассматривались возможности моделирования динамики различных компонентов геоэкоосистем регионального уровня как неотъемлемых частей единых по своей природе природно-территориальных комплексов. И проблема водных ресурсов является одной из ключевых.

Потребность в предвидении будущего режима речного стока возникла, прежде всего, из необходимости предотвращения ущерба хозяйственным объектам и населению от наводнений, связанных с различными природными процессами (паводками, половодьями, нагонными явлениями и др.). Предвидение водного режима рек необходимо и при эксплуатации уже созданных водохозяйственных систем: гидроэнергетических установок, водоснабжения, орошения, использования рек как транспортных систем.

Обеспечение мер противопаводочной защиты и требований к качеству воды, максимальная выработка гидроэлектроэнергии, удовлетворение запросов сельского, рыбного и водного хозяйства, рациональное расходование воды и ряд других проблем оптимального использования водных ресурсов — создают повышенные требования к надежности и детальности гидрологических прогнозов.

По сроку заблаговременности прогнозы можно разделить на краткосрочные (день, месяц, сезон), долгосрочные (от года до нескольких лет) и сверхдолгосрочные. Для перечисленных проблем два последних типа прогнозов наиболее актуальны.

Эта область гидрологического прогнозирования активно развивается в последние десятилетия, что связано не только с возрастающими требованиями к оптимизации использования водных ресурсов, но и с развитием современных информационных технологий, усовершенствованием систем сбора и обработки информации, развитием математического моделирования водных ресурсов, а также с все возрастающими катаклизмами и аномалиями климата в последние десятилетия.

Изменение водности рек при глобальном потеплении климата неизбежно скажется на условиях навигации по ним. Сток рек (его величина, внутригодовая и многолетняя изменчивость) — внешний фактор русловых процессов, который, в свою очередь, определяет глубину русла, в том числе на перекатах, являющихся главной лимитирующей условия судоходства формой руслового рельефа. Климат обуславливает продолжительность физической навигации, которая соответствует времени, когда русло свободно ото льда, между концом ледохода и появлением первых ледовых явлений.

На практике габариты судовых ходов и длительность навигации определяется технико-экономическими соображениями. Гарантированная глубина на перекатах, устанавливается по специальным формулам в зависимости от размеров расчетных судов, плотов или их составов (осадки судов и запаса глубины под днищем). Эта глубина поддерживается с помощью дноуглубительных средств, но до определенных пределов, которые зависят от гидравлических условий каждой реки. Однако такие максимально возможные по гидравлическим условиям глубины достигаются редко, так как их поддержание обычно экономически невыгодно.

До середины XX в. глубины на судоходных реках в многоводный период (межень) были близки к естественным. Дноуглубление носило эксплуатационный характер и было призвано обеспечить движение флота в маловодный период. Начиная с 50-х и вплоть до конца 80-х гг. XX в. проводилась крупномасштабная реконструкция водных путей, в том числе посредством проведения капитальных землечерпательных и выправительных работ. Это привело к существенному (до 2–2,5 раз) увеличению гарантированных глубин, стабилизации трасс судовых ходов и общему улучшению условий судоходства. С начала 90-х гг. дноуглубление на реках было резко сокращено или полностью прекратилось. Начался процесс восстановления естественного руслового режима рек, который в настоящее время привел к снижению глубин практически до естественных. Однако на

реках создалась иная картина в расположении перекатов по длине реки и относительно форм самого русла. Это привело к необходимости максимального использования дифференцированных глубин, зависящих от уровня воды, и проведения дноуглубления в минимальных размерах лишь при уровнях, близких к проектным (т. е. соответствующих гарантированной глубине), которые на всех реках уменьшились до величин, близких к естественным (если не возникли дополнительные искусственные факторы — регулирование стока за счет ГЭС).

На малых реках, на которых в межень снижение водности не обеспечивает глубин, необходимых для движения транспортного флота, транзитное судоходство осуществлялось только в период высокой воды, так называемым экспедиционным методом. Уже в 60–70-е гг. в связи с массовым переходом водного транспорта на крупнотоннажный флот на многих малых реках судоходство было закрыто, особенно в экономических или интенсивно развивающихся районах (европейская часть России, центр и юг Западной Сибири), где шло переключение традиционно речных грузопотоков на строящиеся автомобильные и железнодорожные дороги.

Оценить изменения глубин на перекатах при увеличении водности (или ее сокращении для юга европейской территории России (ЕТР)) вследствие повышения среднегодовых температур воздуха возможно на основе совместного анализа кривых расходов воды Q и графиков связи глубин на перекатах T .

При этом кривые расходов воды $Q = f(H)$, где H — соответствующие им уровни, а глубины на перекатах $T = f(H)$ — выражают зависимость от уровней воды на опорных гидрологических постах. Такие графики ежегодно или за многолетний период строятся службой пути государственных бассейновых управлений водных путей и судоходства и их структурных подразделений — районами водных путей. Эта работа достаточно трудоемкая, требует значительного времени и может рассматриваться как перспективная. Она должна проводиться с учетом сезонного и многолетнего режима перекатов, устойчивости русла, особенностей грядового движения наносов.

Экспертный анализ изменения глубин (увеличения/уменьшения) при увеличении (уменьшении) водности рек может быть выполнен в первом приближении по существующим формулам:

- по модифицированной формуле Х. М. Полина [5], Седых и др. [6]:

$$T = 0,5 \sqrt[3]{K_n Q_{np}}, \quad (1)$$

где K_n — коэффициент плеса, характеризующий устойчивость русла;
 Q — расход воды при проектном уровне;

- по формуле К. В. Гришанина [3]:

$$M = \frac{T_{cp}(gB)}{Q^{0,5}}; T_{cp} = \frac{MQ^{0,5}}{(gB)^{0,5}}, \quad (2)$$

где B — ширина русла;

- по формуле Г. Лэсея [11]:

$$T = 0,47 \left(\frac{Q}{8\sqrt{d}} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где d — крупность руслообразующих наносов.

При оценке влияния вышеперечисленных факторов на изменение навигационной обстановки в качестве исходных данных брались наиболее обоснованные климатические и гидрологические прогнозы [12, 13, 14].

При этом предполагалось, что основное влияние на навигационную обстановку окажет увеличение (уменьшение) водности, при подчиненном влиянии морфодинамических факторов. Это положение обосновано и проверено с помощью многочисленных имитационных экспериментов с помощью автоматизированной системы регионального прогноза АСРЭП, разработанной в Институте системного анализа РАН [7, 8, 9, 10].

Оценки изменения водности получены с использованием специальной модели водного баланса территорий. Используя данные об изменениях температуры, осадков и влажности воздуха с привлечением информации о гидрофизических характеристиках почв, возможно рассчитать внутригодовую дискретную динамику испарения, влажности почв, мощности снежного покрова и его таяния, запасов подземных вод, поверхностного и подземного стоков. Расчеты проводились с использованием как модельных — GFDL, UKMO, ECHAM1-A (Институт Макса Планка, Германия), так и трех палеоаналоговых сценариев глобального потепления на 1, 2 и 3–4 °C (оптимумы голоцена, рисс-вюрмского межледниковья и плиоцена) [12, 13, 14]. В результате были получены следующие выводы:

На некоторых речных бассейнах России в результате прогнозируемых изменений глобального климата произойдет незначительное увеличение глубин. Это касается в первую очередь севера Европейской территории России.

На некоторых бассейнах произойдет общее уменьшение глубин, обусловленное превышением аккумуляции над эрозией. Например, в центре и на юге Европейской территории России.

Однако, для подавляющего большинства территории России эти изменения крайне незначительны.

Изменения глубин, обусловленные изменением водности рек, в 3–5 раз превышают соответствующие изменения глубин, обусловленные морфодинамическими факторами. Таким образом, гипотезу о подчиненном влиянии морфодинамических изменений на навигационную обстановку можно считать подтвержденной. И далее сосредоточиться только на исследовании фактора изменения водности рек в подавляющем большинстве регионов России.

Исключением являются регионы: а) севера Западной Сибири, б) низовий Лены, Яны, Колымы и Индигирки.

В перечисленных в п. 5 регионах в связи с деградацией мерзлоты ожидается заметное снижение глубин рек, обусловленное аккумуляцией в долинах рыхлого материала. Это снижение глубин, тем не менее, в полтора — два раза меньше соответствующего увеличения, вызванного ростом водности рек. Поэтому, практические выводы в отношении этих регионов, которые будут приведены ниже, на качественном уровне останутся без изменения.

Принимая все составляющие формул, кроме расхода воды, неизменными при повышении (уменьшении) среднегодового расхода воды и незначительность изменения внутригодового режима стока воды, можно получить в первом приближении долю увеличения (уменьшения) глубины русла на перекатах (табл. 1).

Во многих случаях реальные повышения глубин при проектных уровнях, особенно на средних и больших реках, находятся в пределах 5–10 см (по отношению к установленным гарантированным глубинам), что равнозначно состоянию глубин в условиях, когда уровни в межень не понижаются до проектных, и дифференцированные глубины оказываются больше гарантированных в маловодную фазу режима. Таким образом, увеличение стока и проектного расхода должно сказываться последовательно на условиях судоходства, особенно при современных минимальных объемах дноуглубления. Последнее определяются тем, что в данных экспертных расчетах не учитывается возможность изменения режима движения наносов и обмеления перекатов как его следствия при повышенной водности рек. Это возможно на песчаных реках со слабоустойчивым или неустойчивым руслом, отличающимся активными переформированиями руслового рельефа.

При повышении устойчивости русла при увеличении водности межени возможен саморазмыв гребней перекатов, и тогда будет устанавливаться глубина, большая расчетной.

С другой стороны, на реках с устойчивым, как правило, галечным руслом, рост глубин будет осуществляться только за счет повышения водности и, соответственно, уровней, т. к. крупность наносов на них всегда будет больше критической при заданном увеличении водности.

При снижении водности реки, особенно в маловодный период (если принимать неизменность внутригодового распределения стока) уровни воды будут только за счет этого фактора устанавливаться ниже проектных.

Таблица 1

Увеличение (+) или уменьшение (–) транзитных глубин по сравнению с современными (см) при росте среднегодовых температур воздуха и повышении водности рек (для юга ЕТР — понижении водности), %

Формула	Увеличение водности		Уменьшение водности
	15 %	3 %	7 %
Х. М. Полина (1)	+4	+3	–3
К. В. Гришанина (2)	+7	+4	–5
Г. Лэсея (3)	+3	+2	–2

И если на магистральных водных путях допускается срыв проектных (гарантированных) глубин в течении до 5 суток за навигацию, то теперь эта величина возрастает в 2–3 раза, что неизбежно повлечет за собой необходимость пересмотра отметок самого проектного уровня или перевода реки в другой, более низкий класс водных путей.

С величиной стока воды связан еще один показатель качества водных путей — радиус кривизны судового хода. Он определяется по формуле Н. И. Маккавеева [4]:

$$r = kQ_{\phi}^{1/2}I, \quad (4)$$

где Q — руслоформирующий расход воды, I — уклон, K — коэффициент, в среднем равный 0,0014.

Его величина определяет также ориентировку дноуглубительных прорезей на перекатах. При увеличении водности (при неизменности внутригодового стока) можно полагать, что $Q\phi$ возрастает также как и среднегодовой расход воды. Отсюда при росте Q_{cp} на 10 % радиусы кривизны по формуле (4) возрастут на 4 %, при росте Q_{cp} на 15 % — рост достигнет 7 %. Более пологая трасса фарватера создает более благоприятные условия для судоходства.

На малых реках в силу их общей естественной мелководности увеличение глубин при повышении водности будет незначительным (как правило, до 5 см), что вообще находится в пределах точности определения самих глубин. Однако увеличения среднегодового стока воды на них может сопровождаться общим углублением русел (их размывом), что приведет к значимости роста глубин по сравнению с расчетным. В результате возрастет возможность транспортного использования таких рек и удлинение периода, пригодного для экспедиционного завоза грунтов. При снижении водности и уменьшении глубин на малых реках следует ожидать полного прекращения судоходства на них.

Вопрос о продолжительности физической навигации на реках в условиях повышения (понижения) их водности более сложен для экспертной оценки в виду его неразработанности. Исходя из того, что на южных реках она существенно больше, чем на северных, можно полагать, что потепление (а не изменение водности) будет сопровождаться удлинением навигации. Так, на верхней Оби (слияние Бии и Катунь — устье Чарыша) при среднегодовой температуре воздуха $+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ продолжительность навигации составляет 193 дня, на средней Оби, соответственно, $-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 166 дней. Если принять прямую зависимость между среднегодовой температурой и длительностью навигации, то можно при повышении первого на $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в центре Западной Сибири ожидать увеличения навигационного периода на средней Оби на 20 дней.

С другой стороны, исходя из величины водности, логично предположить, что ее рост должен сопровождаться удлинением навигации. Однако эта связь более сложная. Действительно, на верхней и средней Оби в многоводные годы навигация на 10–20 дней продолжительнее, чем в маловодные. Например, в Барнауле в многоводном 1995 г. она составила 208 дней, а в маловодном 1991 г. — 193 дня; в Дубровино (участок Новосибирск — устье Томи) в те же годы, соответственно, 217 и 198 дней. Однако на Северной Двине (табл. 2) и Дону связь обратная.

В этих условиях экспертную оценку изменения длительности навигации, очевидно, правильнее оценивать по изменению среднегодовой температуры воздуха.

Судоходные условия шлюзованных и зарегулированных рек в целом более стабильны, чем свободных рек и соответствуют проектным параметрам — за исключением свободных нижних бьефов гидроузлов и зон выклинивания подпора водохранилищ, которым свойственны отличные от незарегулированных рек русловые деформации.

Таблица 2

Длительность навигации в характере по водности годы на Северной Двине

Участок	Годы	Водность года	Длительность навигации, дни
Великий Устюг — Котлас	1996	min	215
	1978	max	189
Котлас — Рочегда	1988	min	184
	1952	max	168
Рочегда — Березник	1988	min	177
	1952	max	177
Березник — Устье р. Пинеги	1975	min	176
	1993	max	169

В зависимости от степени зарегулированности стока водохранилищами, назначения гидроузлов и состава участников водохозяйственных комплексов (ВХК), а также от технического состояния гидросооружений, изменения годового стока влияют на уровенный режим и судоходные условия рек по-разному.

Если в составе гидроузлов на реках имеются гидроэлектростанции, то из участников ВХК именно они получают наибольший эффект от увеличения годового стока (благодаря его регулированию водохранилищами). Так, в РФ при установленной мощности гидроэлектростанций их расчетная среднесуточная выработка составляет 167 млрд кВтч/год (10 % технического потенциала); однако в 1995 г. из-за сложившейся высокой водности выработка ГЭС была значительно больше — 176 млрд кВтч.

Совместный анализ проблем энергетики и глобальных изменений климата позволил сформулировать следующую схему их взаимодействия: глобальное потепление климата ведет к увеличению стока рек и увеличению выработки электроэнергии ГЭС; это, в свою очередь, ведет к увеличению доли гидроэнергии в энергобалансе и уменьшению сжигания топлива электроэнергетикой. Однако очевидно, что наращивание мощностей ГЭС не должно быть самоцелью, а должно рассматриваться в комплексе с перераспределением стока во времени и по территории. Попуски из водохранилищ, обусловленные работой ГЭС, не совпадают с потребностями судоходства. Поэтому увеличение естественного притока в водохранилища, давая возможность увеличить выработку электроэнергии, не вызывает адекватного увеличения судоходных глубин.

Наиболее характерный пример — р. Вилюй: водохранилище в его верховьях осуществляет глубокое сезонное и многолетнее регулирование стока, и если до его создания максимальные расходы воды имели место в мае–июле при ничтожно малых расходах в зимнюю межень, то в настоящее время максимальные расходы проходят зимой (когда наиболее велика потребность в электроэнергии ГЭС), а на протяжении большей части навигационного периода минимальные глубины Вилюя не превышают 40–70 см. В результате Вилюй для судоходства является «малой рекой» с экспедиционным завозом грузов, и увеличение годового стока Вилюя, давая увеличение выработки электроэнергии Вилюйских ГЭС-1, II и III, не повышает коммуникативного качества реки.

Поэтому для повышения комплексной эффективности использования возрастающего стока на реках с водохранилищами глубокого регулирования в верховьях (Вилюй, Колыма, Зея, в перспективе — Бурея и др.) целесообразно сооружение каскадов низконапорных гидроузлов с гидроэлектростанциями и судопропускными сооружениями.

1. Изменения навигационных условий в разных регионах России

1.1. Север Европейской территории России

Все реки находятся в свободном состоянии. Современные гарантированные глубины близки к естественным; их изменения при увеличении годового стока на 15 % приводятся в табл. 3. Расчет проведен по формулам (1)–(2); там же приводятся возможные расчетные пределы изменения сезонной глубины на перекатах.

Среднегодовые температуры воздуха составляют по данным [2] в Вологде (р. Вологда) +2,4 °С, в Котласе (верхняя Северная Двина, устье р. Вычегды) +1,2 °С, в Архангельске — +0,2 °С, в Троицко-Печорске (верхняя Вычегда) — 1,6 °С, в Усть-Усе (р. Печора) — 3,6 °С, в Мезени (р. Мезень) — 1,6 °С.

Средняя продолжительность навигации (по данным атласа «Внутренние водные пути...», [1]) Вологда — 199 дней, Котлас — 185, Архангельск — 178, Троицко-Печорск — 173, Усть-Уса — 155, Мезень — 165 дней.

Эти данные дают тренд, позволяющий предполагать, что прогнозируемое увеличение среднегодовой температуры на 4 °С повлечет за собой удлинение навигации на всех реках региона в пределах 1 месяца. Это даст возможность увеличить продолжительность навигационного периода за счет более раннего начала и более позднего окончания сроков судоходства. Действительно, окажется более сжатым по срокам период выпадения и накопления твердых осадков. Это будет компенсировать общее увеличение осадков в зимний период. При этом увеличится продолжительность и частота зимних оттепелей, в период которых часть снеговых запасов будет расходоваться, увеличивая зимний меженный сток. Таким образом, толщина снежного покрова, которая в настоящее время в бассейне Северной Двины составляет 60–70 см, вряд ли будет существенно отличаться от этой величины. В результате снеговая составляющая объема весеннего половодья останется без изменения. Дождевые осадки в весенний период на Северной Двине играют незначительную роль в формировании стока воды, поэтому общий объем половодья не будет существенно отличаться от современного. Соответственно, весеннее обмеление большинства перекатов, не будет экстремально большим. Наиболее полно позитивная роль увеличения стока воды для нужд транспортного флота проявится в период летне-осенней межени. Годы с многоводным меженным периодом всегда были благоприятными для водного пути, т. к. позволяли максимально долго использовать дифференцированные глубины для поддержания судоходной трассы без применения землечерпательной техники. Особенно актуально это становится в современных экономических условиях при минимальных объемах финансирования водных путей. В случае если многоводные межен-

ные периоды станут нормой, это позволит снизить объемы землечерпания, или, сохранив их, увеличить габариты судового хода. Для среднего течения Северной Двины увеличение межженного стока на 15 % приведет к повышению уровня воды на 20 см. Это даст возможность увеличить современные гарантированные глубины на перекатных участках до отметки 130 см, при которых число лимитирующих перекатов составит 20–25 %. При сохранении современной гарантированной глубины (110 см) число лимитирующих в настоящее время перекатов снизится с 2 до 6–8 %, и таковыми останутся только традиционно сложные для судоходства Ш Шеловский, Ш Паячный, Верх. Рубежский, Верх. Коптельский, Шилинские перекаты.

Таблица 3

Увеличение минимальных глубин (ΔT) на перекатах рек севера ЕТС
(при увеличении годового стока на 15 %)

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см	T, см
Вологда	180	7–12
Сухона, выше устья Вологды	180	7–12
Вологда — Камчуга	150	6–10
Михайловка — Нюксеница	100	4–7
Нюксеница — Великий Устюг	90	4–6
Уфтюга	110	4–7
Лежа	110	4–7
Юг, выше Кичменьгского Городка	130	5–9
Кич. городок — устье	150	6–10
Вологда, Усть-Кулом — Ленью — устье	120	4–8
Сысолы — Угольные причалы	130	5–9
Угольные причалы — устье	170	6–11
Северная Двина, Великий Устюг — Котлас	110	4–7
Котлас — Орлецы**	170	6–11
Орлецы — Архангельск	215	8–15
Вага	80	3–6
Омега	120	4–8
Мезень, выше устья Вашки	70	3–5
устье Вашки — устье	90	4–6
Печора, Троице-Печорск — Вуктыл	95	4–7
Вуктыл — Бизовая	125	5–8
Бизовая — Печора	145	6–10
Колва	90	4–6

* Официальные данные Росречфлота.

** Реальные гарантированные глубины на этом участке 110 см.

Таким образом, увеличение среднегодовой температуры в бассейне Северной Двины (по рассмотренному сценарию) приведет к перестройке водного баланса территории. По своим характеристикам он приблизится к бассейнам рек средней полосы Европейской части России. Несколько возрастет зимний меженный сток за счет увеличения продолжительности периодов оттепелей и повышения грунтового питания. Снизится доля весеннего половодья в общем объеме стока воды (примерно с 60 до 50 %), уменьшится продолжительность периода с твердыми осадками. Соответственно возрастет сток в летне-осеннюю межень за счет увеличения доли жидких осадков (с 65 до 70–75 % по отношению к годовой сумме). Все это положительно скажется на условиях судоходства.

Увеличение годового стока рек окажет определенное позитивное воздействие на судоходные условия соединительной Северо-Двинской системы. Однако из-за плохого технического состояния старых гидротехнических сооружений этим не удастся воспользоваться: возросли фильтрационные потери из подпертых бьефов, или же плотины не могут держать проектный напор.

Учитывая труднодоступность многих районов региона, особенно в бассейнах Печоры и Мезени, в целом можно говорить о вероятности улучшения условий судоходства на реках при повышении среднегодовой температуры и водности рек.

1.2. Центр Европейской территории России

Судоходные условия на водных путях Волжско-Камского каскада в наименьшей степени зависят от складывающейся водности. Однако ввиду того, что Чебоксарское и Нижнекамское водохранилища не заполнены до проектных отметок, подпор от них не достигает, соответственно, Городецкое и Воткинское шлюзов. Особенно неблагоприятно первое, т. к. угрожает разрывом Единой глубоководной системы на изолированные участки Волги от устья Оки до Городца на северную и южную части. Увеличение притока в Горьковское и Рыбинское водохранилища, возможно, позволит увеличить судоходные попуски в нижний бьеф Горьковской ГЭС, что в сочетании с комплексом выправительных сооружений даст возможность несколько смягчить ситуацию. Однако радикальное решение проблемы состоит в создании подпора на данном участке — заполнении Чебоксарского водохранилища, или же сооружении промежуточной подпорной ступени.

Большинство судоходных рек — притоков Волги находятся в подпоре от волжских водохранилищ. Поэтому изменение их водности не приведет к росту глубин и изменению условий судоходства. В табл. 4 приводятся данные только для рек Ветлуги и Суры выше зоны выклинивания подпора и рек бассейна Оки.

Таблица 4

Увеличение минимальных глубин на перекатах рек центра ЕТР
при увеличении годового стока на 10 %

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см	ΔT , см
Ветлуга, Ветлужская — Юркино	85	3–4
Сура, выше Курмыша	80	2–3
Ока, Калуга — Алексин	65	2–3
Алексин — Щурово	120–130	4–5
Щурово — Сейма	200	6–8
Проня	120	4–5
Мокша	100	3–4
Клязьма, Владимир — устье Тезы	70	2–3
устье Тезы — устье	100	3–4
Цна, выше 40 км	80	2–3
нижние 40 км	100	3–4

Анализ данных таблицы показывает, что прирост глубины будет в основном находиться в пределах точности ее определения. Таким образом, по этому показателю улучшения условий судоходства при прогнозных изменениях климата практически не произойдет.

Разница в среднегодовых температурах воздуха в пределах региона невелика — в пределах 1,5–2 °С. Навигация на реках сокращается в направлении с запада на восток, составляя на Оке 232 дня в Калуге, 227 в Сейме (близ устья), на Цне — 218 и на Ветлуге — 205 дней. Очевидно, это связано с усилением континентальности климата и суровости зим. Изменение среднегодовой температуры на 2 °С не вызывает заметных изменений в ее длительности.

1.3. Юг Европейской территории России

Здесь при повышении среднегодовой температуры воздуха на 1 °С ожидается снижение водности рек на 7 %. Это повлечет за собой снижение многолетних меженных глубин на разных реках (Дон, Кубань, Маныч, Воронеж) только за счет этого фактора от 2 до 6 см и лишь на Северном Донце — до 7–11 см. При этом следует учесть, что все реки испытывают огромное влияние эрозии почв и овражной эрозии на сельскохозяйственных землях. Снижение водности рек усилит аккумулятивные процессы в реках и вызывает их дополнительное обмеление. В результате можно ожидать уменьшения глубин, в 1,5–2 раза больше расчетного. В этой ситуации возникает необходимость пересмотра отметок проектного уровня. Длительность навигации при незначительности повышения температуры воздуха может быть в пределах нескольких дней.

1.4. Бассейны нижней и средней Оби

Здесь при повышении среднегодовой температуры на 4,5 °С и увеличении годового стока на 15 % следует ожидать роста глубин практически на всех реках бассейна, причем на основных — в значимых пределах (табл. 5).

Учитывая, что реки в основном имеют относительно устойчивые русла и в то же время возможен их саморазмыв при повышении водности, увеличение глубин будет способствовать улучшению условий судоходства, в том числе там, где водные пути являются главным средством сообщения и доставки грузов (Надым, Таз, Пур). На левобережье Иртыша (Тара, Тура, Тобол, Тавда) врезание рек, очевидно, будет компенсироваться повышением поступления наносов с эрозионных сельскохозяйственных земель этой части региона.

Таблица 5

Увеличение минимальной глубины на перекатах рек бассейна средней и нижней Оби при повышении годового стока на 15 %

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см	ΔT , см
Иртыш, Клин — Новая Станица	180	7–12
Новая Станица — устье Тобола	210–200	8–15
устье Тобола — устье	300	12–21
Тара	80–85	3–6
Тура	140	5–10
Тобол	140	5–10
Тавда, Исюк — Таборы	75	3–5
Таборы — В. Тавда	90	4–6
В. Тавда — устье	120	5–8
Конда, Дальние причалы — Междуреченка	120	5–8
Междуреченка — устье	140	6–10
Обь, Соснино — устье Иртыша — устье	300	12–20
Таз, Красноселькуп — Газсале	140	6–10
Газсале — устье	210	8–14
Пур, Пуrowsк — Уренгой	130	5–9
Уренгой — 125 км	230	10–16
125 км — устье	260	10–18
Надым, Надым — 38 км	200	8–14
38 км — устье	230	10–16
Вах, 432 км — Самотлор	120	4–8
Самотлор — устье	300	8–14
Аган	120	4–8

Увеличение среднегодовой температуры воздуха на $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в соответствии с трендом зависимости длительности навигации в бассейне от t_{cp} , повлечет за собой удлинение ее в разных частях бассейна от 10 до 15 суток.

1.5. Бассейн верхней Оби

Увеличение годового стока на 10 % может повлечь за собой некоторый рост глубин на Оби (в пределах 4–10 см) на разных ее участках, не находящихся под влиянием Новосибирской ГЭС. Однако малая устойчивость (неустойчивость) русла и интенсивность его переформирования не позволит этому процессу реализоваться, в том числе из-за незначительности самого увеличения (на Оби от слияния Бии и Катунь до Камня-на-Оби — на 4–7 см). Лишь ниже устья Томи оно может достичь 11 см.

На других реках возможное увеличение глубин за счет роста водности не существенно: 2–3 см на Бие выше Мал. Угренево и на верхней Томи, 4–5 см в низовьях Бии. Лишь на нижней Томи ожидается рост глубин за счет повышения уровней воды в 8–11 см.

За годы эксплуатации Новосибирского гидроузла в его нижнем бьефе произошли существенные русловые деформации, выразившиеся в «посадке» уровней и уменьшении судоходных глубин при малых расходах. При увеличении годового стока увеличение притока в Новосибирское водохранилище даст прирост выработки ГЭС, но влияния на судоходные условия не окажет.

Увеличение среднегодовой температуры воздуха на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведет к заметному удлинению навигации — до 20 дней.

1.6. Бассейны среднего и нижнего Енисея

Здесь прогнозируется увеличение годового стока на 15 % при увеличении среднегодовой температуры на $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это повлечет за собой общий рост глубин на реках за счет повышения уровней воды (табл. 6), которой будет поддерживаться высокий устойчивостью русел, имеющих галечный состав руслообразующих наносов.

Это обстоятельство весьма благоприятно из-за наличия порогов на многих реках, в том числе на Енисее (Осиновский порог); существенные повышения глубин над ними обеспечит снижение скоростей течения (пропадает эффект водослива) и облегчит проход судов.

Увеличения среднегодовой температуры воздуха на $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет способствовать удлинению навигации до 10 дней на нижнем Енисее, Подкаменной и Нижней Тунгусках и до 20–25 дней в среднем течении. В условиях первостепенного значения водного пути это имеет большое значение в обеспечении доставки грузов с труднодоступные районы Сибири.

Таблица 6

Увеличения минимальных глубин на перекатах рек бассейна среднего и нижнего Енисея при увеличении годового стока на 15 %

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см	ΔT , см
Енисей, устье Ангары — устье Подкаменной Тунгуски	320	13–22
Енисей, устье Подкаменной Тунгуски — Игарка	340	14–24
Подкаменная Тунгуска, Ванавара — Чуня	250	10–17
Чуня — Вельмо	260	10–18
Вельмо — устье	265	11–19
Нижняя Тунгуска, Кислюпан — устье	240	10–17
Тура — Ногинск	270	11–19
Ногинск — устье	210	11–20
Курейка	210	8–15

1.7. Бассейны верхнего Енисея

Здесь при увеличении водности на 10 % на реках в свободном состоянии можно ожидать незначительного, но устойчивого прироста глубин (реки имеют галечное русло) в пределах 2–6 см на верхнем Енисее, 4–5 см на Ангаре и Тасевой (при современных глубинах, соответственно, 80–150, 90–120 и 120 см). Более заметный прирост глубин возможен на Енисее между Красноярском и устьем Ангары — 9–12 см.

Однако здесь, особенно на участке Красноярск-Атаманово это будет загущиваться неблагоприятной для водного транспорта значительной амплитудой суточных колебаний уровня в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, достигающей 6 м, которая могла бы быть снята устройством контр-бьефа (аналогичного Майнской ступени в нижнем бьефе Саянской ГЭС). Однако ниже по течению увеличение глубин за счет повышения уровней приведет к некоторому улучшению условий судоходства в районе Казачинских порогов, хотя кардинально судоходные условия на них могут быть улучшены только при подпоре воды плотинами.

На Ангаре судоходство осуществляется в замкнутых бьефах — водохранилищах, т. к. в свое время строительство судопропускных сооружений в составе гидроузлов было отнесено на неопределенную перспективу («по завершении каскада»). Поэтому увеличение годового стока, увеличивая водные ресурсы каскада, не вызывает изменения судоходных условий. Вместе с тем непрерывность каскада будет нарушена: РАО «ЕЭС России», осуществляющей достройку Богучанской ГЭС, приняло решение значительно понизить НПУ водохранилища до 185 м против 208 по проекту. В результате подпор от

Таблица 7

Увеличение минимальных глубин на перекатах рек бассейнов нижней Лены, Яны, Индигирки, Колымы при увеличении годового стока на 15 %

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см	ΔT , см
Лена, Якутск — Быков мыс	290	12–20
Вилуй	130	5–9
Яна, Багагай — устье Адычи	95	4–7
устье Адычи — Куйга	110	4–8
Куйга — Нижнеянск	220	9–15
Оленек	150	6–10
Индигирка	200	8–14
Колыма, Усть-Среднекан — Ороек	110	4–8
Ороек — Зырянка	140	6–10
Зырянка — Черский	200	8–14

Богучанской ступени не будет доходить до Усть-Илимской ступени, и перспективы Ангары как пути сообщения становятся неопределенными.

Увеличение продолжительности навигации при повышении температуры на 4,5 °С может быть существенным, но будет сдерживаться усилением заторных явлений.

1.8. Бассейны нижней Лены, Яны, Индигирки и Колымы

Реки бассейнов находятся в свободном состоянии. Увеличение годового стока на 15 % приведет к увеличению глубин за счет повышения меженных уровней (табл. 7). При этом наличие мерзлых грунтов в руслах рек или галечный состав руслообразующих наносов будет способствовать стабилизации этого повышения на реках с малоустойчивым руслом.

В условиях сурового климата северо-востока России увеличение среднегодовой температуры даже на 5° не изменит продолжительности навигации, т. к. среднее ее значение сохраняется ниже –10°.

1.9. Бассейны верхней и средней Лены

Реки здесь находятся в свободном состоянии, имеют галечный состав наносов. Ожидаемый рост глубин здесь при увеличении водности рек на 10 % невелик (в пределах 5–10 см), но достаточно стабилен из-за высокой устойчивости русел.

Повышение среднегодовой температуры воздуха на 3 °С в условиях сурового климата Восточной Сибири не приведет к изменению длительности навигации, т. к. во всем бассейне они сохраняются на уровне ниже –1 °С.

1.10. Бассейн Амура

Увеличение годового стока на 10 % приведет в целом по бассейну к незначительному росту глубин (4–8 см) при современных глубинах от 85 см (Амгунь) до 200 см (средний Амур). На Амуре ниже устья Сунгари (глубина 250 см), от Хабаровска до Комсомольска (350 см) и от Комсомольска до Николаевска (425 см) относительный рост глубин будет также очень незначительный: 7–10 см выше Хабаровска и 10–14 см на нижнем Амуре. Увеличение среднегодовой температуры воздуха на 2 °С может привести к удлинению навигации на несколько дней.

2. Заключение

В разных регионах России глобальные изменения климата по разному скажутся на навигационной обстановке судоходных рек: от увеличения ее длительности и повышения глубин в маловодную фазу режима (Север ЕТР, бассейны средней и нижней Оби) до отрицательных последствий из-за снижения водности рек (юг ЕТР). Остальные бассейны занимают промежуточное положение: в них положительный эффект незначителен (в пределах точности измерения глубин) или практически не проявляется.

Морфодинамические изменения существенно не ухудшат ситуацию на юге ЕТР.

В бассейне нижней Оби вывод о повышении глубин в маловодную фазу остается в силе со всеми вытекающими отсюда перспективами экономического характера. Однако это повышение глубин будет несколько более скромным, чем прогнозировалось ранее.

Тем не менее совокупный положительный эффект от улучшения навигационных условий на севере, где речной транспорт гораздо более значим при эксплуатации ресурсов территорий, превысит отрицательный эффект при ухудшении навигационной обстановки в южных регионах ЕТР.

В заключение остановимся на вопросе достоверности получаемых оценок изменений водных ресурсов и гидрологического режима территорий при ожидаемых изменениях климата. Такая достоверность, в первую очередь, определяется надежностью прогнозов изменений климатических характеристик и, прежде всего, температуры и осадков, но климатические модели по точности своих оценок далеко не всегда удовлетворяют запросам науки. Понятно, что это в полной мере относится и к проблеме оценки изменений водных ресурсов, так как в моделях и методиках гидрологических расчетов в качестве входных параметров фигурирует prognostическая информация об изменениях термического режима и режима осадков. Поэтому и здесь проблема продолжения исследований по совершенствованию как модельных, так и аналоговых сценариев региональных изменений климата при ожидаемом глобальном потеплении остается актуальной.

Литература

1. Внутренние водные пути РСФСР. М.: Главводпуть МРФ РСФСР, 1986.
2. Геологический словарь. Т. 2. М.: Недра, 1978. 456 с.
3. *Гришанин К. В.* Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972.
4. *Маккавеев Н. И.* Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949.
5. *Полин Х. М.* Принципы водно-путевой классификации плесов // Маккавеев Н. И. Русловой режим рек и фиксирования прорезей. М.: Речиздат, 1949.
6. *Седых А. И., Чернышов Ф. М., Кабанов А. В.* Путевые работы на свободных реках. М.: Транспорт, 1978.
7. *Хомяков П. М., Конищев В. Н., Пегов С. А., Смолина С. Г., Хомяков Д. М.* Моделирование динамики геоэкосистем регионального уровня. М.: Изд-во МГУ, 2000. 382 с.
8. *Хомяков П. М., Менжулин Г. В., Пегов С. А., Смолина С. Г.* и др. Влияние глобальных изменений природной среды и климата на функционирование экономики и здоровье населения России. М.: URSS, 2005. 424 с.
9. *Хомяков П. М., Смолина С. Г.* и др. Влияние глобального потепления на функционирование основных отраслей экономики и здоровье населения России / Под ред. Н. П. Лаверова. М.: URSS, 2001. 140 с.
10. *Хомяков П. М., Смолина С. Г., Терентьев Г. Ю.* и др. Геоэкологическое моделирование для целей управления природопользованием в условиях изменений природной среды и климата. М.: URSS, 2002. 400 с.
11. *Lacey G.* Stable channels in alluvium // Proceeding of the Institution of Civil Engineers. London, 1929–1930. Vol. 239.
12. Perspectives on global change: the TARGETS approach // Rotmans J. Cambridge University Press, 1997. 460 p.
13. *Rotmans J., Hulme M., Downing T.* Climate change implications for Europe. Global environmental change. 1994. Vol. 4. P. 97–124.
14. *Schwartz H.* Climatic change and watersupply: how sensitive is the Northeast? II U. S. NAS Climate. Washington, DC: Climate change and watersupply, 1977. P. 111–120.