

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54.714

### ДИНАМИКА ВОД И НАНОСОВ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ р. СВ. ЛАВРЕНТИЯ<sup>1</sup>

© 2011 г. Е. Н. Долгополова, М. В. Исупова

*Институт водных проблем Российской академии наук  
119333 Москва, ул. Губкина, 3*

Поступила в редакцию 08.02.2010 г.

Рассмотрены основные особенности гидрологического режима и морфологического строения устьевой области р. Св. Лаврентия эстуарного типа. Приведены сведения о структуре водных масс, термическом и ледовом режиме зал. Св. Лаврентия, оказывающем существенное влияние на эстуарий. Основное внимание уделено процессам смешения вод, динамике вод и наносов в эстуарии под совместным влиянием стока реки и приливов, а также в зависимости от топографии дна. Оценен параметр, определяющий тип циркуляции и стратификации вод в эстуарии. Рассмотрено влияние силы Кориолиса на стратифицированный поток в эстуарии и особенности формирования геострофического течения.

*Ключевые слова:* эстуарий, залив, течения, взаимодействие морских и речных вод, перенос наносов.

Эстуарии — это полузамкнутые части устьевых областей (УО) рек. Основная особенность эстуариев — процессы смешения речных и морских вод в условиях больших градиентов плотности воды.

УО р. Св. Лаврентия представляет большой интерес для исследователей, так как эта крупная макроприливная эстуарная система обладает своеобразным продольным профилем дна, что обуславливает формирование эстуарной циркуляции вод разных типов на отдельных участках эстуария и внутренних гравитационных волн. Эстуарная циркуляция, в свою очередь, приводит к образованию в верхней части эстуария зоны с аномально высоким содержанием взвешенных наносов. Значительные размеры УО р. Св. Лаврентия также позволяют исследовать влияние силы Кориолиса на стратифицированный поток и закономерности формирования геострофического течения в эстуарии.

УО р. Св. Лаврентия подвержена значительному антропогенному воздействию. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется экологическим проблемам эстуария, в частности, переносу частицами взвешенных наносов загрязняющих и токсичных веществ и их накоплению в донных отложениях.

В статье рассмотрены процессы взаимодействия пресных речных и осолоненных морских вод и переноса наносов в эстуарии р. Св. Лаврентия, что может представлять научный интерес для отечественных специалистов. Так, например, в устье р. Енисей дельтово-эстуарного типа со ступенчатым профи-

лем дна [32] процессы смешения речных и морских вод и переноса наносов происходят похожим образом, что позволяет сравнить динамику вод в этих объектах.

Цель статьи — выявить основные закономерности динамики вод и наносов в макроприливном эстуарии со своеобразной топографией дна, имеющей большой уступ.

В качестве основного фактического материала использованы опубликованные результаты исследований в эстуарии и зал. Св. Лаврентия [11–17, 19–22, 24–26, 28, 29, 33–39, 42], а в качестве теоретической основы при описании циркуляции вод под воздействием приливов использовались работы [5, 7, 18, 31, 41].

#### ГЕОГРАФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНА РЕКИ И ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ОКЕАНА

##### *Гидрография реки и ее устьевой области*

Р. Св. Лаврентия, названная в честь святого Лоренса Римского, протекает на востоке Северной Америки в Канаде (в провинциях Квебек и Онтарио). В верхнем течении до г. Корнуолл река служит государственной границей между Канадой и США. Берет начало из оз. Онтарио, на протяжении всего течения следует в северо-восточном направлении и впадает в зал. Св. Лаврентия Атлантического океана, образуя эстуарий. Длина реки по разным данным 1140–1200 км (всей водной системы — от истоков р. Сент-Луис, впадающей в оз. Верхнее, — 3100–4000 км) [2, 6, 10, 14, 37]. Площадь бассейна реки, по различным источникам, составляет 1.03–

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-05-00061).

1.60 млн. км<sup>2</sup>, из которых 40% приходится на водосбор Великих озер [2, 6, 10, 14, 37]. Река является дренирующей артерией системы Великих озер Северной Америки, сбрасывающей избыток воды в океан. Вместе с этой системой река служит важнейшим естественным путем, соединяющим внутренние части Канады и США с Атлантическим океаном. Основные притоки р. Св. Лаврентия: Осуэгачи, Сент-Риджис, Ришелье (соединенная выше оз. Шамплен каналом с р. Гудзон в США), Сен-Франсуа, Бекалкур (правые), Оттава (самый крупный), Сен-Морис, Батискан, Сагений (левые).

Строение речной сети р. Св. Лаврентия асимметричное. При выходе из оз. Онтарио русло реки так широко, что его называют оз. Тысячи островов (всего 1620) [14, 25]. Далее на пути течения реки вновь находятся острова, которые образуют стремнины Лонг-Солт и Биг-Питч. Выше впадения притока Сент-Риджис русло реки расширяется до 15 км и образует озера Сен-Франсуа и Сен-Луи с водным режимом речного типа. Их основные характеристики приведены в табл. 1.

Ниже по течению в районе впадения притока Оттава (г. Монреаль) р. Св. Лаврентия также образует большое количество островов. Далее, в месте впадения притоков Ришелье и Сен-Морис, река вновь расширяется, образуя оз. Сен-Пьер. Это – самое большое из внутренних пресноводных озер в системе р. Св. Лаврентия, окруженное широкими заливаемыми прибрежными низменностями, которые увеличивают площадь озера в многоводный период года до 600 км<sup>2</sup> [14]. Озеро имеет небольшие глубины (табл. 1), за исключением навигационного канала, глубина в котором достигает 11 м. До впадения в оз. Сен-Пьер р. Св. Лаврентия распадается на несколько рукавов, образуя так называемую Сорельскую дельту [14], при этом динамика вод и наносов на этом участке приобретает характер, свойственный дельтам рек. Из озера река вытекает одним руслом.

УО р. Св. Лаврентия (рис. 1) относится к эстуарному приливному типу. Она включает три части: устьевой участок реки, эстуарий и устьевое взморье.

Верхняя граница устьевого участка р. Св. Лаврентия, выделяемого по предельной дальности распространения в реку приливных или нагонных колебаний уровня, расположена около г. Труа-Ривьер (ниже оз. Сен-Пьер, в месте впадения в р. Св. Лаврентия левого притока Сен-Морис), а нижняя – у г. Квебек, где начинается эстуарное расширение русла. Длина устьевого участка реки ~120 км. Ширина извилистого русла на устьевом участке реки достигает 870 м (мост в г. Квебек), средняя глубина навигационного канала (фарватера) изменяется от 13 до 40 м, за исключением впадин в районе городов Труа-Ривьер (21 м) и Квебек (60 м) [14]. Устьевой участок реки подвержен воздействию приливов и

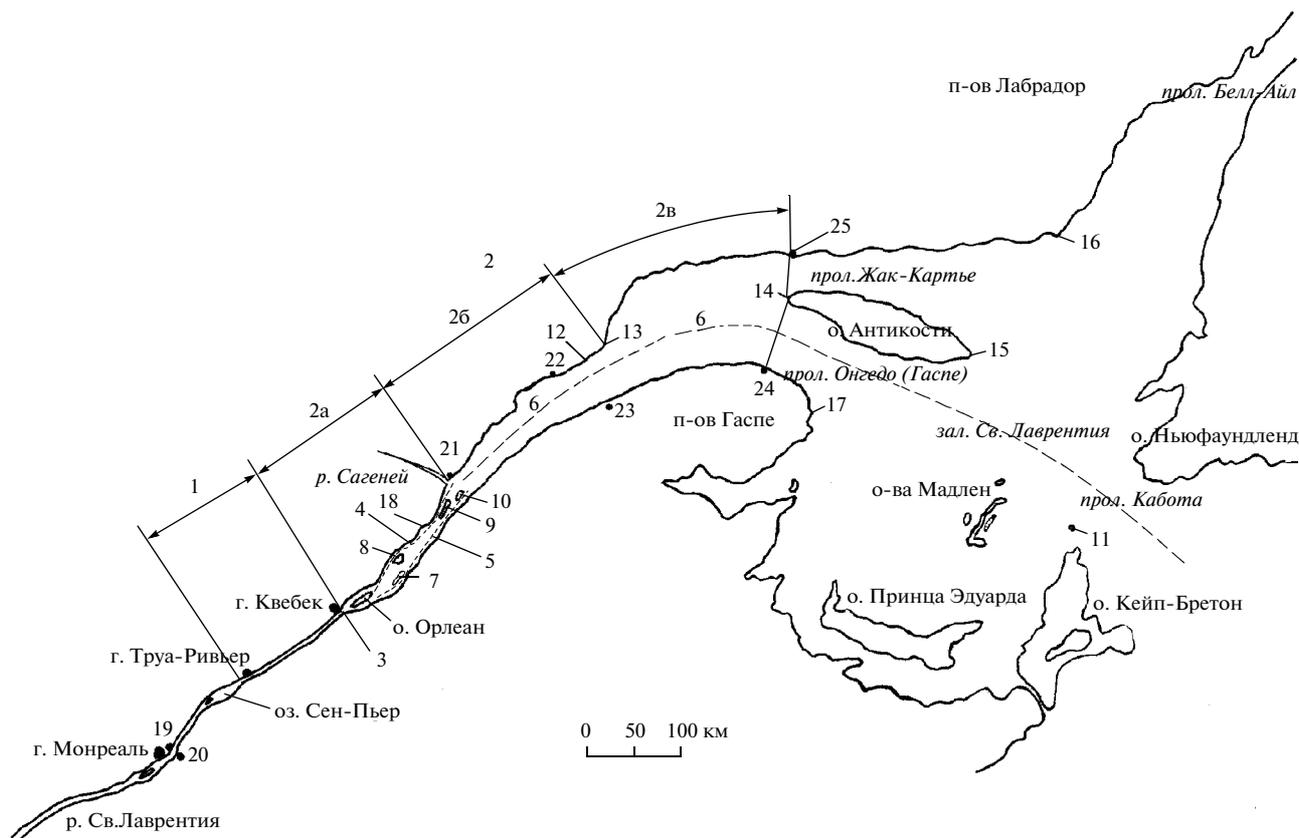
**Таблица 1.** Основные характеристики внутренних озер на р. Св. Лаврентия [14]

Характеристика	Озера		
	Сен-Франсуа	Сен-Луи	Сен-Пьер
Длина, км	50	23	35
Ширина, км	5.4	6.4	14.3
Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	272	148	500
Средняя глубина, м	6.0	3.0	3.0
Объем, км <sup>3</sup>	1.6	0.4	1.5
Средний расход воды на выходе, м <sup>3</sup> /с	7500	8400	10000

нагонов, но вода в реке остается пресной в течение всего года.

Эстуарий – главная часть УО р. Св. Лаврентия. Он начинается от г. Квебек (вершина эстуария) и протягивается на 600 км до своего устья (устьевого створа эстуария) по линии г. Минган (северный берег)–м. Уэст (западная оконечность о. Антикости)–г. Гранд-Валле (южный берег) (рис. 1). Эстуарий ограничен побережьями полуостровов Лабрадор с севера и Гаспе с юга и имеет типичную для многих эстуариев постепенно расширяющуюся воронкообразную форму. По данным, приведенным в [10, 14], площадь эстуария составляет 10800 км<sup>2</sup>. Однако авторы настоящей статьи считают более достоверной величину площади в 13290 км<sup>2</sup>, определенную В.И. Кравцовой (МГУ). Берега эстуария высокие и крутые. Южный берег эстуария – внешний край Аппалачской складчатой зоны, сложенной сланцами и окаймленной террасами, которые покрыты глинами и песками морского происхождения. Северный берег очерчен круто поднимающимися от моря на высоту 500 м архейскими породами (лаврентидами). На своем протяжении эстуарий принимает воды многочисленных боковых притоков, наиболее крупный из которых – р. Сагений, средне-многолетний расход воды которой в районе г. Таду-сак составляет 1470 м<sup>3</sup>/с [12].

Верхняя граница эстуария р. Св. Лаврентия выделена авторами настоящей статьи по морфологическим признакам и находится в районе г. Квебек (рис. 1). О. Орлеан, расположенный в районе верхней границы эстуария, разделяет реку на два рукава (главный из которых – правый судоходный), представляет собой останец, сложенный достаточно твердыми породами (сланец, известняк), и относится, как указано в [42], к системе Аппалачей. Ниже острова в эстуарии, ширина русла которого увеличивается до 15 км, аккумулятивной дельты выполнения не образуется вследствие малого стока наносов.



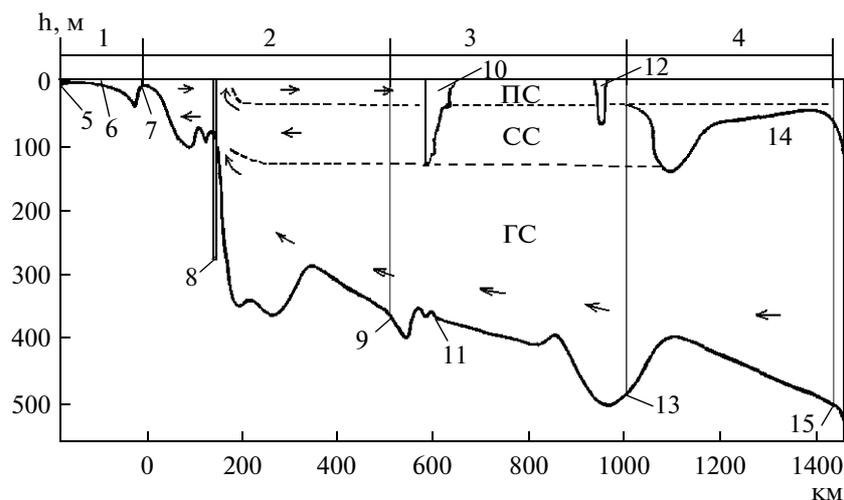
**Рис. 1.** Карта-схема УО р. Св. Лаврентия. Основные элементы УО: устьевой участок реки (1), эстуарий (2 а–в – верхний, средний, нижний), верхняя граница (вершина) эстуария (3). Штриховыми линиями обозначены основные направления потока: Северный и Южный проход (4, 5), Лаврентийский желоб (6). Острова: Монмани (7), Кудр (8), Льевр (9), Верт (10), Сен-Поль (11); мысы: Круа (12), Мон (13), Уэст (14), Хит (15), Уитл (16), Гаспе (17), Пик (18). Населенные пункты: Лаваль (19), Лонгёй (20), Тадусак (21), Бе-Комо (22), Матан (23), Гранд-Валле (24), Минган (25).

Эстуарий Св. Лаврентия можно разделить на верхний (от г. Квебек до места впадения р. Сагней), средний (до условной линии м. Мон–г. Матан) и нижний эстуарий, внешняя граница которого совпадает с устьевым створом всего эстуария (рис. 1). Длина верхнего эстуария составляет ~190 км, средняя ширина – 17 км, а глубина достигает 100 м. Далее по течению ширина эстуария существенно увеличивается – до 42 км, а максимальная глубина доходит до 350 м. Резкое увеличение глубины объясняется геологическим строением среднего и нижнего эстуариев, длины которых соответственно ~210 и ~200 км. Ниже впадения р. Сагней (верхней границы среднего эстуария) вдоль северного берега эстуария проходит глубоководный Лаврентийский желоб (рис. 2), который простирается по дуге на 1000 км через прол. Онгедо, зал. Св. Лаврентия по прол. Кабота к внешнему краю шельфа (рис. 1). Этот желоб является древней долиной реки, имею-

щей тектоническое происхождение и углубленной ледником [22].

В иностранной литературе приводится несколько другое районирование эстуария р. Св. Лаврентия. Так, канадские ученые делят его на речной, средний и морской эстуарии [14, 15, 21, 22, 25, 28]. При этом так называемый речной эстуарий соответствует выделенному авторами данной статьи устьевому участку реки, средний – верхнему эстуарию, а морской – среднему. Нижний эстуарий канадскими исследователями, как правило, не включается в устьевую область, что на взгляд авторов статьи неверно.

Устьевым взморьем р. Св. Лаврентия следует считать весь зал. Св. Лаврентия (до прол. Кабота), в том числе его узкую западную часть – проливы Жак-Картье и Онгедо (Гаспе), омывающие о. Антикости, и восточную часть – проливы Белл-Айл (на севере) и Кабота (на юге) (рис. 1).



**Рис. 2.** Батиметрический профиль УО р. Св. Лаврентия, включая зал. Св. Лаврентия [15]. Участки УО: устьевой участок реки (1), эстуарий (2), залив (устьевое взморье) (3), океан (4). Другие объекты: г. Труа-Ривьер (5), г. Квебек (6), о. Орлеан (7), фьорд р. Сагней (8), м. Уэст (9), бух. Шалер (10), м. Гаспе (11), проливы Белл-Айл (12) и Кабота (13), Большая Ньюфаундленская банка (14), внешняя граница континентального шельфа (15). Штриховые линии – границы между термогалинными слоями: поверхностным (ПС), промежуточным или срединным (СС) и глубинным (ГС). Стрелки – направление остаточного течения.

#### *Особенности геологического строения и рельефа бассейна реки и ее УО*

Долина р. Св. Лаврентия расположена на одной из равнин, в обширной тектонической впадине на стыке Аппалачских гор (горы Адиронак и Нотр-Дам) и Канадского щита, имеющего здесь архейское основание, сложенное кристаллическими и метаморфическими породами (гнейсом, кристаллическим известняком, кварцитом) и выровненное докембрийской эрозией. Осадочные породы сформировались во время палеозойских морских трансгрессий, образуя фундамент равнины Св. Лаврентия. В начале кайнозойской эры после регрессии уровня моря в этом районе происходило активное и глубокое врезание рек по краям щита. Оледенение в четвертичный период видоизменило рельеф равнины Св. Лаврентия и гидрографическую сеть. В этот период обширное внутреннее море Шамплен, образовавшееся ~12 тыс. лет назад и занимавшее древнюю долину реки, полностью находилось подо льдом. Сток воды из оз. Онтарио по древней ложбине в сторону Атлантического океана возобновился в постледниковое время, а формирование современной гидрографической сети реки началось ~8.5 тыс. лет назад. Подъем уровня моря (у.м.) в эпоху голоцена привел к затоплению части равнины и образованию современного облика эстуария Св. Лаврентия [10, 42].

Северное побережье эстуария реки занимает Лаврентийская возвышенность высотой от 150 до 700 м над у. м., представляющая собой комплекс холмов, разделенных узкими долинами. Здесь формируются многочисленные притоки реки. Южная часть бассейна реки приурочена к сильно эро-

дированным северным склонам Аппалачей (250–400 м над у.м.), сложенным главным образом осадочными породами девонского и каменноугольного периодов (кварцит, известняк и др.). Долины между горами покрыты морскими постледниковыми отложениями. Относительно узкую полосу вдоль берегов реки занимают низменные (до 100 м над у.м.) слабонаклонные слои, сложенные осадочными породами и ориентированные в северо-восточном направлении [15].

Исток р. Св. Лаврентия находится на отметке всего 78 м над у.м. [10]. В верхнем течении (до г. Монреаль) река пересекает узкий отрог Канадского щита, преодолевая порожистый участок с падением до 70 м на протяжении 175 км, в обход которого проложены каналы.

#### *Климат бассейна реки и ее устья*

Бассейн р. Св. Лаврентия расположен в умеренном климатическом поясе в зоне достаточного увлажнения, равномерного распределения осадков в течение года и больших сезонных колебаний температуры воздуха. Для бассейна характерны холодная зима с температурой воздуха в январе от  $-8$  до  $-16^{\circ}\text{C}$  и достаточно теплое лето с температурой воздуха в июле от  $+8$  (в северной части бассейна) до  $+24^{\circ}\text{C}$  (в южной). Преобладающее направление ветра – западное. Летом ежемесячно выпадает до 90 мм атмосферных осадков, зимой – до 60 мм. Количество осадков увеличивается по направлению к океану. Река бывает покрыта льдом с середины декабря до середины апреля. В то же время в эстуарии лед нередко присутствует в форме припая и отдель-

ных дрейфующих льдин. В период весеннего ледохода значительный вынос льдов из эстуария в океан может закрывать для навигации прол. Кабота до мая, а прол. Белл-Айл — до июля.

*Хозяйственная освоенность и гидрологическая изученность р. Св. Лаврентия и ее устья*

С начала XX в. естественный облик реки был изменен деятельностью человека: строительством каскада ГЭС (Св. Лаврентия мощностью 1.9 млн. кВт (США, Канада), Боарнуа (1.6 млн. кВт), Мозес-Сандерс (1.7 млн. кВт) в Канаде и др.), созданием навигационного пути и каналов для движения судов, преобразованием береговой линии. Р. Св. Лаврентия — жизненно важная водная артерия для экономики Канады и США. По Лаврентийскому морскому пути длиной 3700 км морские суда из Атлантического океана следуют в порты Квебек и Монреаль. В результате строительства обводных судоходных каналов в верхнем и среднем течении реки стал возможен проход судов в систему Великих озер (вплоть до оз. Верхнее). В настоящее время гарантированная глубина в навигационном канале ниже г. Квебек составляет 12.5 м, далее вверх по течению — 10.7, в районе г. Монреаль — 11.3 и выше г. Монреаль — 8.2 м [14].

В верхнем эстуарии для поддержания судоходных глубин в навигационном канале, идущем сначала вдоль южного берега о. Орлеан, а далее — вдоль северного побережья эстуария (Северный проход) (рис. 1), проводятся дноуглубительные работы, при которых объем изъятых песка >90 тыс. м<sup>3</sup>/год [20]. При этом ежегодно ~20 тыс. м<sup>3</sup> драгированного песка отсыпается в Южном проходе, что, возможно, оказывает негативное влияние на обитающую в этом районе молодь атлантического и озерного осетра [20].

Богатейшие природные ресурсы (земельные, лесные, рыбные и др.), огромные запасы пресных вод и хорошая связь с океаном способствуют концентрации населения и интенсивному экономическому развитию бассейна р. Св. Лаврентия. В настоящее время здесь сосредоточено >11% населения Северной Америки и расположены крупные промышленные центры: Чикаго, Детройт, Кливленд (США), Монреаль (Канада). В канадской части бассейна реки большое развитие получило сельское хозяйство (зерновое, животноводческое). Крупные города на берегах р. Св. Лаврентия, как правило, имеют порты: Огденсберг (США), Кингстон, Монреаль, Лаваль, Сорель, Труа-Ривьер, Квебек (Канада).

Исследования УО р. Св. Лаврентия были начаты в 1931–1939 гг. специалистами Лавальского университета (Канада, провинция Квебек). В последующие годы активное участие в изучении этого объекта принимали Бедфордский институт океанографии (Дартмаутс, Новая Шотландия), Океанографиче-

ское отделение Университета Квебека (Римоуски), Гидрографическая служба Канады, Центр морских наук Университета Мак-Гилла (Монреаль), Национальный исследовательский совет Канады. На реке и ее главном притоке Оттаве расположено несколько гидрологических постов (г/п), в том числе Корнуолл, плотина Карийон, Ласаль, Сен-Франсуа, Квебек и др. В зал. Св. Лаврентия имеется сеть постов, включая г/п о. Сен-Поль, на котором проводятся измерения приливных колебаний уровня воды в заливе. По данным измерений, полученным на этих постах, каждый год публикуется отчет об океанографической обстановке в заливе [17].

*Особенности гидрологического режима р. Св. Лаврентия*

**Водный баланс бассейна реки.** Составляющие водного баланса бассейна р. Св. Лаврентия (при принятой площади 1.29 млн. км<sup>2</sup>) следующие: осадки 1036 мм (1336 км<sup>3</sup>/год), сток 340 мм (439 км<sup>3</sup>/год), на долю испарения приходится 696 мм (898 км<sup>3</sup>/год), коэффициент стока 0.33 [6]. По данным, приведенным в [2], величина коэффициента стока составляет 0.26, что, по мнению авторов настоящей статьи, сильно занижено.

**Сток воды.** Питание р. Св. Лаврентия смешанное (снеговое и дождевое). Средний расход воды р. Св. Лаврентия на выходе из о. Онтарио составляет 6750 м<sup>3</sup>/с (212 км<sup>3</sup>/год), он увеличивается до 7350 м<sup>3</sup>/с (232 км<sup>3</sup>/год) в районе г/п Корнуолл (верхнее течение реки). Максимальный расход воды реки на этом посту в среднем равен 10000, минимальный — 4500 м<sup>3</sup>/с [27]. На верхней границе эстуария (г/п Квебек) средний расход воды составляет 11300–12000 м<sup>3</sup>/с (357–379 км<sup>3</sup>/год) [12, 15, 33] и увеличивается к устью эстуария (с учетом боковой приточности) до 14400 (454) [21], а в многоводные годы до 16800 м<sup>3</sup>/с (530 км<sup>3</sup>/год) [14]. От выше указанных сведений о стоке воды р. Св. Лаврентия отличаются данные, приведенные другими авторами: 320 [2], 349 [6], 450 км<sup>3</sup>/год [37]. На взгляд авторов настоящей статьи, значения, указанные в [2], занижены (как и коэффициент стока), а величина стока, приведенная в [37], напротив, завышена. Авторами настоящей статьи по данным [12] определен среднемноголетний расход воды в вершине эстуария за 1955–1999 гг., составляющий 12000 м<sup>3</sup>/с (379 км<sup>3</sup>/год) (табл. 2).

Расход воды наиболее крупного притока р. Св. Лаврентия — р. Оттава изменяется в зависимости от фазы водного режима от 306 (межень) до 8190 м<sup>3</sup>/с (половодье) [14, 27].

В многолетнем изменении водности р. Св. Лаврентия начиная с 1930-х гг. можно выделить примерно тридцатилетние многоводные и маловодные периоды [14]. В наиболее многоводные годы сред-

**Таблица 2.** Внутригодовое распределение расходов воды р. Св. Лаврентия на верхней границе эстуария у г. Квебек за 1955–1999 гг. по [12]

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
$Q$ , м <sup>3</sup> /с	10700	10700	12000	16800	15800	12400	11300	10600	10400	10900	11400	11100	12000
$Q$ , %	7.4	7.4	8.3	11.7	11.0	8.6	7.8	7.4	7.2	7.6	7.9	7.7	100

ний максимальный расход воды реки на г/п Сорель, расположенном выше оз. Сен-Пьер, составлял 19700 (1943 г.), 20300 м<sup>3</sup>/с (1976 г.), а маловодные годы – 6600 (1934 г.), 6100 (1965 г.) и 7000 м<sup>3</sup>/с (2001 г.).

Сток воды реки зарегулирован Великими озерами, а также каскадом ГЭС, включающим шесть плотин на р. Св. Лаврентия и плотину Карийон на притоке Оттава выше его впадения в главную реку.

Внутригодовое распределение стока воды реки в вершине эстуария (г. Квебек) относительно равномерное (табл. 2). Повышение расходов воды (до ~17000 м<sup>3</sup>/с, максимальное значение – 23700 м<sup>3</sup>/с (1976 г.)) в апреле–мае связано с таянием снега на водосборе, при этом отношение величин апрельских и майских расходов воды к среднегодовому значению составляет 1.3–1.4. На эти месяцы в сумме приходится ~22.7% годового стока, в остальной период года – от 7.2 до 8.6% на каждый месяц. В течение месяца возможны более резкие колебания расхода воды реки, связанные с синоптическими условиями, а также с изменчивостью уровня воды в Великих озерах [40].

Зарегулирование стока воды реки привело также к уменьшению величины колебаний уровня воды в течение года во внутренних озерах. Так, например, внутригодовые изменения уровня воды в оз. Сен-Франсуа в условиях естественного водного режима достигали 0.50 м, а в настоящее время – 0.15 м [17].

**Сток наносов и растворенных веществ.** Концентрация взвешенных наносов в р. Св. Лаврентия выше оз. Сен-Пьер изменяется в пределах 4–10 мг/л [15]. На устьевом участке реки мутность воды постепенно увеличивается, достигая 30–50 мг/л в районе Квебека. В целом сток взвешенных наносов р. Св. Лаврентия в вершине эстуария составляет по разным данным от 1.1 [16] до 4.0–6.9 млн. т/год [14, 15, 37], из которых 68% приходится на саму реку, 19% – на поступление наносов со стоком южных притоков (Шатогай, Ришелье, Ямаска, Сен-Франсуа, Николе, Шодьер и др.) и 13% – со стоком северных притоков (Оттава, Ассомпсьон, Сен-Морис, Батискан, Сент-Анн, Жак-Картье и др.) [14]. Довольно низкая величина стока наносов (отличительная особенность р. Св. Лаврентия) объясняется регулирующей ролью Великих американских озер и системой внутренних речных озер, а также особенностями геологического строения бассейна реки.

Дно реки сложено преимущественно песками, тонким песком (или “лимонсом”) и глинами, кото-

рые перекрыты гравием на участках с сильным течением. Вниз по течению размер частиц песчаных наносов уменьшается [15].

Для р. Св. Лаврентия характерно наличие трех основных зон аккумуляции наносов – это внутренние озера. В самой реке отложение наносов происходит за пределами навигационного канала, где скорости течения и глубина не превышают соответственно 0.3 м/с и 4.5 м. Основные зоны эрозии сосредоточены в среднем течении реки и приурочены главным образом к каналам (Богарнуа (выше по течению г. Монреаль) и др.) [15].

Воды р. Св. Лаврентия по химическому составу относятся к гидрокарбонатному классу; средняя минерализация составляет 160 мг/л, а величина суммарного стока растворенных веществ в океан – 62 млн. т/год [6, 37]. Химическая денудация в бассейне р. Св. Лаврентия равна 92.5 тыс. т/км<sup>2</sup> в год или в целом по бассейну (включая систему Великих озер) 70.56 млн. т/год.

#### *Гидрологический режим прибрежной зоны океана*

Зал. Святого Лаврентия (обширное устьевое взморье реки) окаймлен берегами п-ова Лабрадор, островами Ньюфаундленд и Кейп-Бретон, полуостровами Новая Шотландия и Нью-Брансуик и соединяется на западе с эстуарием р. Св. Лаврентия проливами Жак-Картье и Онгедо (являющимися частью залива), на востоке – с Северной Атлантикой проливами Белл-Айл (между п-овом Лабрадор и о. Ньюфаундленд) и Кабота (между островами Ньюфаундленд и Кейп-Бретон).

Площадь зал. Св. Лаврентия по разным данным составляет 150 [10], 226 [14], 247 тыс. км<sup>2</sup> [15]; средняя глубина >500 м, максимальная 800 м [10, 14]. При этом первая оценка явно занижена, а последняя включает также площадь нижнего эстуария р. Св. Лаврентия. Залив имеет очень изрезанную береговую линию, несколько крупных островов (Антикости, Принца Эдуарда, Кейп-Бретон, архипелаг Мадлен и др.). Дно залива представляет собой подводную материковую платформу (шельфовая равнина) в области распространения докайнозойских структур, покрыто терригенными осадками (илы, алевриты). Вдоль берегов дно сложено главным образом песками с преобладанием фракций 1.0–0.1 мм. Северное побережье залива, мало измененное морем, сформировано субэаральными и тектоническими процессами. Южный абразион-

но-аккумулятивный бухтовый берег, наоборот, образован волновыми процессами [1]. Исследования перемещения песка у южного побережья залива в районе о. Принца Эдуарда показали, что в результате штормов происходит эрозия морского склона существующего в этой области берегового бара [30]. Увеличение уровня воды под действием волнения, вызванного северным и северо-восточным ветром, в течение 1.5–2 сут составляет ~35 см [30].

Зал. Св. Лаврентия расположен в муссонной области умеренного климатического пояса. Климат характеризуется холодной зимой с пониженным влажосодержанием воздуха и прохладным сырым летом. Температура воздуха у поверхности залива в январе составляет  $-12...-6^{\circ}\text{C}$  (минимальная  $-20^{\circ}\text{C}$ ), в июле  $+12...+16^{\circ}\text{C}$  (максимальная  $+28^{\circ}\text{C}$ ). Колебания температуры в течение года достигают  $26-28^{\circ}\text{C}$ . В период 1880–2000 гг. отмечено повышение средней годовой температуры воздуха над заливом с  $-0.3$  до  $+0.5^{\circ}\text{C}$  [17]. Среднемесячная температура воды на поверхности залива изменяется от 0 (январь–апрель) до  $+13^{\circ}\text{C}$  (август), при этом в теплое время года (май–октябрь) температура воздуха превышает температуру воды поверхностного слоя залива в среднем на  $2^{\circ}\text{C}$ , а в холодное время года (ноябрь–март), наоборот, поверхностный слой воды залива теплее воздуха на  $2-4^{\circ}\text{C}$ , а в период ледостава – на  $10^{\circ}\text{C}$ . Внутригодовое распределение осадков относительно равномерное с незначительным максимумом в зимние месяцы (ноябрь–февраль). Годовая сумма осадков составляет ~1000 мм [1].

В холодное время года преобладают ветры северо-западного направления со средней скоростью 3–5 м/с. Повторяемость ветров со скоростью 16 м/с и более в это время не более 10%. Летом направление ветров изменяется на юго-юго-западное (3–5 м/с). В редких случаях до залива могут доходить тропические циклоны из Мексиканского зал.

Прилегающий к прол. Кабота участок Атлантического океана – одно из самых южных мест северного полушария, в которых образуется лед. Зал. Св. Лаврентия часто покрывается сплошным льдом (например, в 2000 г. [17]), который занимает наибольшую площадь к началу марта. Аномальное понижение средней температуры воздуха на  $1^{\circ}\text{C}$  в марте 2003 г. привело к заметному по сравнению со средней величиной за 1971–2000 гг. росту площади ледяного покрова до 190 тыс. км<sup>2</sup> [17], т.е. залив был практически полностью покрыт льдом. Объем льда, принесенного на шельф через прол. Кабота весной 2003 г., достиг максимальной величины, равной зафиксированной ранее в 1941 г. Средняя за период 1962–1987 гг. граница распространения ледяного покрова в океан проходит юго-восточнее линии, соединяющей острова Кейп-Бретон и Ньюфаундленд, а в сторону р. Св. Лаврентия – в районе нижней границы среднего эстуария у м. Мон.

Образование льда начинается в декабре в северной части залива. Отдельные льдины под действием северных и северо-западных ветров переносятся на юг к прол. Кабота и выносятся в океан, скапливаясь на шельфе Новой Шотландии [19, 23]. Прижатые к берегу скопления льдин образуют уступ и предохраняют берег от абразии во время зимних штормов, когда преобладающие ветры дуют в сторону побережья.

Отличительная черта зал. Св. Лаврентия – наличие в толще воды холодного промежуточного слоя, существующего в течение всего лета (рис. 2). Толщу воды залива можно разделить на четыре слоя: теплый поверхностный (0–30 м), температура воды в котором в июле изменяется от 8 до  $12^{\circ}\text{C}$ , холодный промежуточный (30–100 м), переходный (100–200 м) и относительно теплый соленый глубинный (200–300 м). Минимальная среднедекадная температура воды в промежуточном слое колеблется в пределах  $-1...+1^{\circ}\text{C}$  [26]. В [26] отмечается повышение минимальной температуры промежуточного слоя на  $0.6^{\circ}\text{C}$  в 1999 г. относительно 1998 г. При этом ее величина осталась ниже среднего многолетнего значения ( $0.02^{\circ}\text{C}$  за 1961–1990 гг.) Тенденция к повышению температуры продолжилась и в 2000 г., когда температура промежуточного слоя повысилась еще на  $0.15^{\circ}\text{C}$  и впервые после 1983 г. превысила среднемноголетнюю величину за 1961–1990 гг. [17].

Приливная баротропная волна проникает в зал. Св. Лаврентия из Северной Атлантики через проливы Кабота и Белл-Айл. Тип прилива – неправильный полусуточный. Величина прилива растет по направлению к берегам с 1.0 до 2.1 м у северного и 3 м у южного побережья. У о. Антикости величина прилива составляет 1 м в квадратуру и 2 м в сизигию. Соленость воды на поверхности залива не превышает 30‰.

Большая часть объема воды, поступающего в залив из эстуария Св. Лаврентия через прол. Онгедо, перемещается вдоль южного побережья. Далее течение разбивается на две ветви, следующие в направлении проливов Кабота и Белл-Айл. В то же время через прол. Кабота и в меньшей степени через прол. Белл-Айл в зал. Св. Лаврентия проникают отроги холодного вдольберегового Лабрадорского течения, также включающиеся в общую циркуляцию вод в заливе.

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ р. СВ. ЛАВРЕНТИЯ

### *Распространение приливов в эстуарий и на устьевой участок реки*

Морские приливы проникают в УО р. Св. Лаврентия до г. Труа-Ривьер (максимальная дальность при сизигийном приливе в межень).

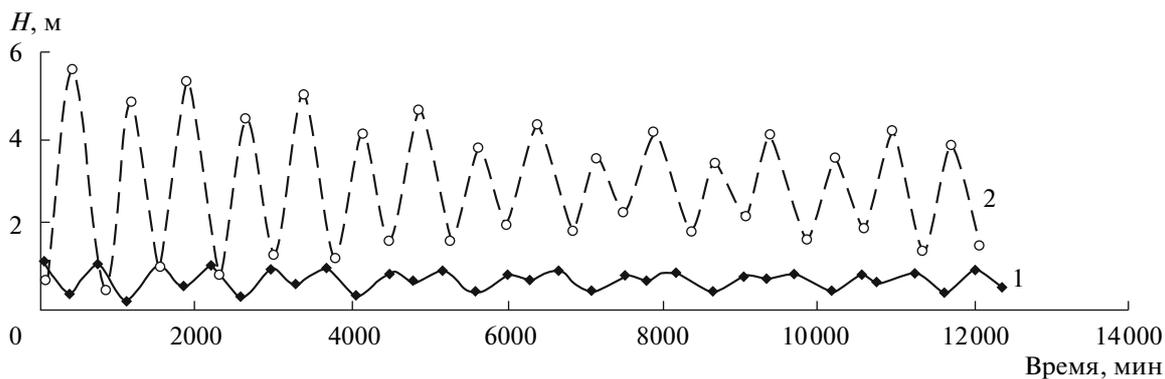


Рис. 3. Приливные колебания уровня воды в зал. Св. Лаврентия (о. Сен-Поль) (1) и на г/п Квебек (2) 15–23 марта 2009 г.

Приливная волна, проникая в зал. Св. Лаврентия, распространяется далее в сторону вершины эстуария, при этом величина прилива растет в том же направлении (рис. 3). Если в заливе у восточной оконечности о. Антикости величина прилива составляет 1–2 м, то на границе среднего и нижнего эстуария она увеличивается до 4.2 м, достигая в вершине эстуария (г. Квебек) высоты 4.9 м в сизигию и 2.8 м в квадратуру [11]. Максимальная величина прилива до 5.0–7.5 м наблюдается на г/п Сен-Франсуа [1, 28], расположенном на юго-восточной оконечности о. Орлеан. Скорости приливного течения в эстуарии могут достигать 2–3 м/с. Выше г. Квебек на устьевом участке реки при уменьшении глубины приливные колебания уровня воды и скорость течения быстро падают из-за влияния трения потока о дно. В районе г. Труа-Ривьер максимальные приливные колебания уровня воды не превышают 0.2 м.

Результаты измерений скорости течения в верхнем эстуарии в разные фазы прилива, приведенные в [13], получены севернее о. Льевр в ~20 км выше устья р. Сагней и в ~125 км ниже о. Орлеан (рис. 1). Примеры вертикальных профилей скоростей течения, представленные на рис. 4, свидетельствуют о формировании двухслойного течения во все фазы прилива, за исключением периодов за 1 ч до полной воды (ПВ) и за 2 ч до малой воды (МВ) [13].

В зависимости от фазы сизигийно-квадратурного цикла эстуарий р. Св. Лаврентия проходит четыре основные стадии циркуляции вод [33]: полное заполнение (в течение 3 сут после полнолуния или новолуния); спад уровня воды, сопровождающийся наиболее высокими скоростями течения в нижнем эстуарии вдоль п-ова Гаспе (3–4 сут перед первой или последней четвертью Луны); низкая вода (3 сут, следующие за первой или последней четвертью Луны); заполнение эстуария (3–4 сут перед полнолунием или новолунием). Остаточное (осредненное за приливный цикл) течение в первую и четвертую стадии направлено в сторону реки, а во вторую и

третью стадии — в сторону залива. В нижнем эстуарии этот поток отклоняется в сторону южного берега. В то же время вдоль южного берега эстуария остаточное течение (так называемое течение Гаспе) направлено в сторону залива на всех стадиях циркуляции.

Порог, образованный Лаврентийским желобом и устьем (фьордом) р. Сагней, влияет на стратифицированный приливный поток и способствует формированию циркуляции вод, сопровождающейся внутренними волнами (или внутренними приливами) [20]. В приливную фазу холодная вода из глубинных слоев перетекает через порог и, будучи гравитационно-нестабильной относительно окружающей воды, опускается ко дну и поступает в средний эстуарий и в устье р. Сагней.

#### Интрузия осолоненных вод в эстуарий

По характеру смешения речных и морских вод и степени осолонения эстуарий р. Св. Лаврентия можно отнести к группе “нормальных”, или “клас-

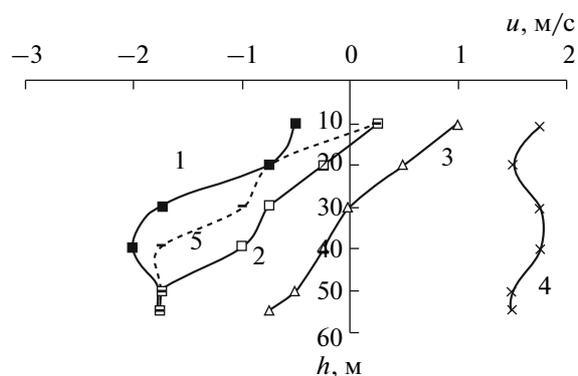


Рис. 4. Вертикальные профили скоростей течения, измеренных в Северном проходе у о. Льевр во время приливного цикла: 1 — за 1 ч до ПВ, 2 — 2 ч после ПВ, 3 — 3 ч после ПВ, 4 — за 2 ч до МВ, 5 — 3 ч после МВ [13].



Рис. 5. Соленость воды, ‰, в поверхностном слое верхнего и среднего эстуария р. Св. Лаврентия по [15].

сических” эстуариев, в которых водный сток и осадки превышают потери на испарение, пресная вода опресняет морскую и соленость воды вдоль эстуария монотонно уменьшается в сторону реки. Интрузии морских вод в эстуарий также способствуют большая глубина среднего и нижнего эстуария и относительно высокие приливы. Верхняя граница интрузии осолоненных вод в эстуарии р. Св. Лаврентия перемещается в зависимости от расхода воды реки и характера прилива (его величины, фазы, цикла сизигия—квадратура) [13].

В [11] показано изменение солености воды в эстуарии за приливный цикл, отраженное в положе-

нии изогалины 32.5‰ в районе впадения р. Сагней. На момент ПВ положение изогалины 32.5‰ минимально — на глубине 20–25 м. Далее за время отлива глубина расположения этой изогалины постепенно растет, достигая на момент МВ своего максимума — 75 м. В это время вертикальные скорости течения, направленные ко дну (положительные), постепенно увеличиваются и достигают максимального значения (2.2 мм/с) через 4 ч после ПВ. Во время прилива происходит обратный процесс: изогалина 32.5‰ сдвигается в сторону поверхности со средней вертикальной скоростью 2.3 мм/с (максимальной за 2–3 ч до ПВ). При изменении приливов с квадратуры на сизигию вертикальный градиент скорости увеличивается почти в 2 раза [11].

В теплое время года верхняя граница интрузии осолоненных вод в эстуарии проходит в районе восточной оконечности о. Орлеан и перемещается в зависимости от фазы прилива на 20 км [25]. На протяжении верхнего эстуария средняя соленость воды на поверхности увеличивается от 0.1 (верхняя граница эстуария) до 18–26 (устье р. Сагней) [25], при этом у дна соленость воды может достигать 20–30‰ [41]. В среднем и нижнем эстуарии соленость воды на поверхности изменяется в зависимости от сезона от 28 до 32, увеличиваясь с глубиной до 33–35‰ (соленость воды в заливе) [41].

Осолоненная вода, проникая в верхний эстуарий, формирует на участке между островами Орлеан и Кудр довольно значительный продольный градиент солености как в поверхностном, так и в придонном слоях воды (рис. 5, 6). На участке верхнего эстуария между островами Орлеан и Монмани в теплое время года соленость воды не превышает 2–3 на поверхности и 4–6‰ у дна (рис. 5, 6а). Зимой на этом участке при более низком расходе воды реки соленость в придонном слое увеличивается до 6–

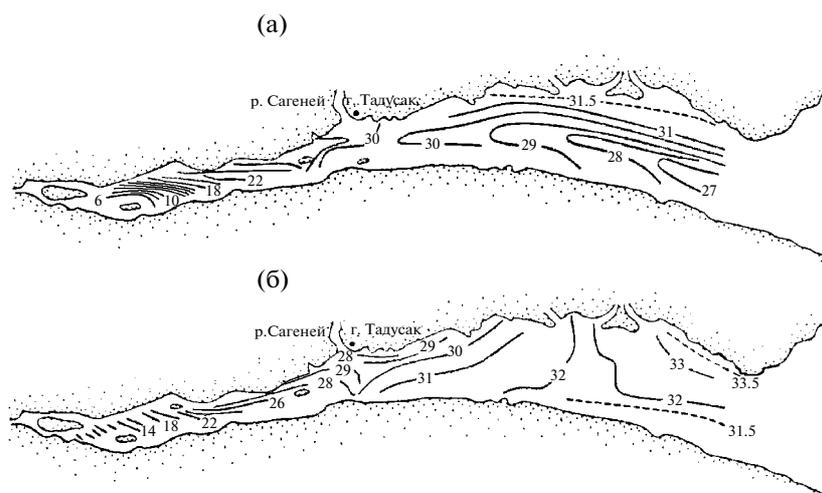


Рис. 6. Распределение солености воды в эстуарии р. Св. Лаврентия на глубине 10 м при расходах воды реки 18 600 (май 1963 г.) (а) и 10 200 м<sup>3</sup>/с (февраль 1963 г.) (б) по [41].

**Таблица 3.** Типы вертикального перемешивания и стратификации вод в эстуарии в зависимости от соотношения объемов воды, приносимой рекой и поступающей в эстуарий с приливом [3]

Тип	$W/P_t$	Степень вертикального перемешивания	Стратификация
1	$\geq 1$	Слабое	Соленый “клин”
2	0.1–1.0	Частично перемешанный эстуарий с вовлечением осолоненных вод из придонного слоя воды в поверхностный	Сильная
3	0.005–0.1	Частично перемешанный эстуарий	Слабая
4	$\leq 0.005$	Хорошо перемешанный по вертикали эстуарий	Отсутствует

10‰ (рис. 6б). Мористее о. Кудр вода в эстуарии всегда осолоненная, и влияние пресных вод сказывается только в местах впадения в эстуарий притоков [15].

#### *Вертикальное перемешивание и стратификация вод в эстуарии*

Типы перемешивания и стратификации вод в приливном устье реки зависят от соотношения объемов стока пресной  $W$  и морской воды  $P_t$ , поступающей в эстуарий во время прилива [3, 4, 7, 9, 43]. Определение параметра  $W/P_t$ , по которому классифицируют эстуарии, носит оценочный характер, но дает представление о том, как происходит смешение морских и речных вод в эстуарии (табл. 3).

Для определения типа перемешивания и стратификации вод в эстуарии р. Св. Лаврентия необходимо учитывать своеобразие продольного профиля дна и особенности районирования самого эстуария. Некоторые исследователи [39] условно делят верхний и средний эстуарий на три участка. Первый участок, длиной ~40 км, находится в верхнем эстуарии между островами Орлеан и Кудр, где относительно небольшие ширина (2–8 км) и средняя глубина (<10 м) эстуария способствуют полному перемешиванию вод.

На втором участке, нижняя граница которого совпадает с нижней границей верхнего эстуария, ширина и глубина эстуария возрастают соответственно до 15 км и 50–150 м. Здесь во время приливного цикла формируется двухслойное течение, и этот участок эстуария можно отнести к частично перемешанным эстуариям с вовлечением (табл. 3) [3].

Вовлечение – результирующий перенос в вертикальном направлении осолоненной водной массы, возникающий в результате разрушения гребней внутренних волн, отрывающихся от поверхности раздела верхнего (опресненного) и нижнего (осолоненного) слоев. Движение речной воды в верхнем слое эстуария над сильным приливным течением, создающее сдвиг касательного напряжения на границе раздела слоев и приводящее к образованию периодически возникающих и разрушающихся внутренних волн, исследовалось канадскими учеными с помощью эхозондирования в разные фазы

прилива в верхнем эстуарии у восточной оконечности о. Льевр [12].

На третьем участке мористее порога р. Сагней (средний эстуарий) перемешивание в уже сильно стратифицированном потоке происходит по типу «клина» осолоненных вод.

Поскольку, как уже было сказано выше, районирование УО р. Св. Лаврентия и обозначения морской границы эстуария, приведенные в данной статье, отличаются от представленных в литературных источниках, авторы настоящей статьи использовали различные расчетные параметры и критерии для определения типа вертикального перемешивания и стратификации вод в эстуарии.

**Критерий Симмонса  $\alpha$ .** Тип вертикального перемешивания речных и морских вод в эстуарии можно определить, используя формулы, включающие средние характеристики эстуария [7]:  $\alpha = W/P_t$ , где  $P_t = F\Delta H$  ( $F$  – площадь эстуария,  $\Delta H$  – средняя величина прилива). По данным, представленным в работе [12], авторы настоящей статьи рассчитали величину среднесуточного расхода воды в р. Св. Лаврентия за 1955–1999 гг., равную 12 тыс. м<sup>3</sup>/с (табл. 2). Таким образом, за приливный цикл (12 ч 25 мин) реки Св. Лаврентия и Сагней приносят в эстуарий объем воды, равный в среднем  $W = 0.54 \text{ км}^3$ .

Объем приливной призмы  $P_t$  можно оценить двумя способами: во-первых, используя осредненные для всего эстуария величины площади  $F$  и прилива  $\Delta H$  и, во-вторых, рассчитывая объем воды, проходящий через сечение эстуария во время “обратного” течения, при наличии результатов измерений его скорости  $u_r$ .

Если принять площадь эстуария р. Св. Лаврентия, равной 13290 км<sup>2</sup> (по уточненным данным В.Н. Кравцовой), а величину прилива  $\Delta H$  – 1–2 м, то диапазон изменения  $P_t$  составит 13.3–26.6 км<sup>3</sup>, а значение приливного критерия  $\alpha$  – 0.02–0.04. Таким образом, весь эстуарий р. Св. Лаврентия можно отнести к частично перемешанным эстуариям со слабой стратификацией (табл. 3).

Оценка объема приливной призмы весьма приближительна, так как сильно зависит от выбора положения границы между эстуарием и заливом. На-

**Таблица 4.** Значения параметра  $n = \Delta S/S_{\text{ср}}$ , рассчитанные по распределениям условной плотности воды в верхнем эстуарии между о. Орлеан и устьем р. Сагены (рис. 7)

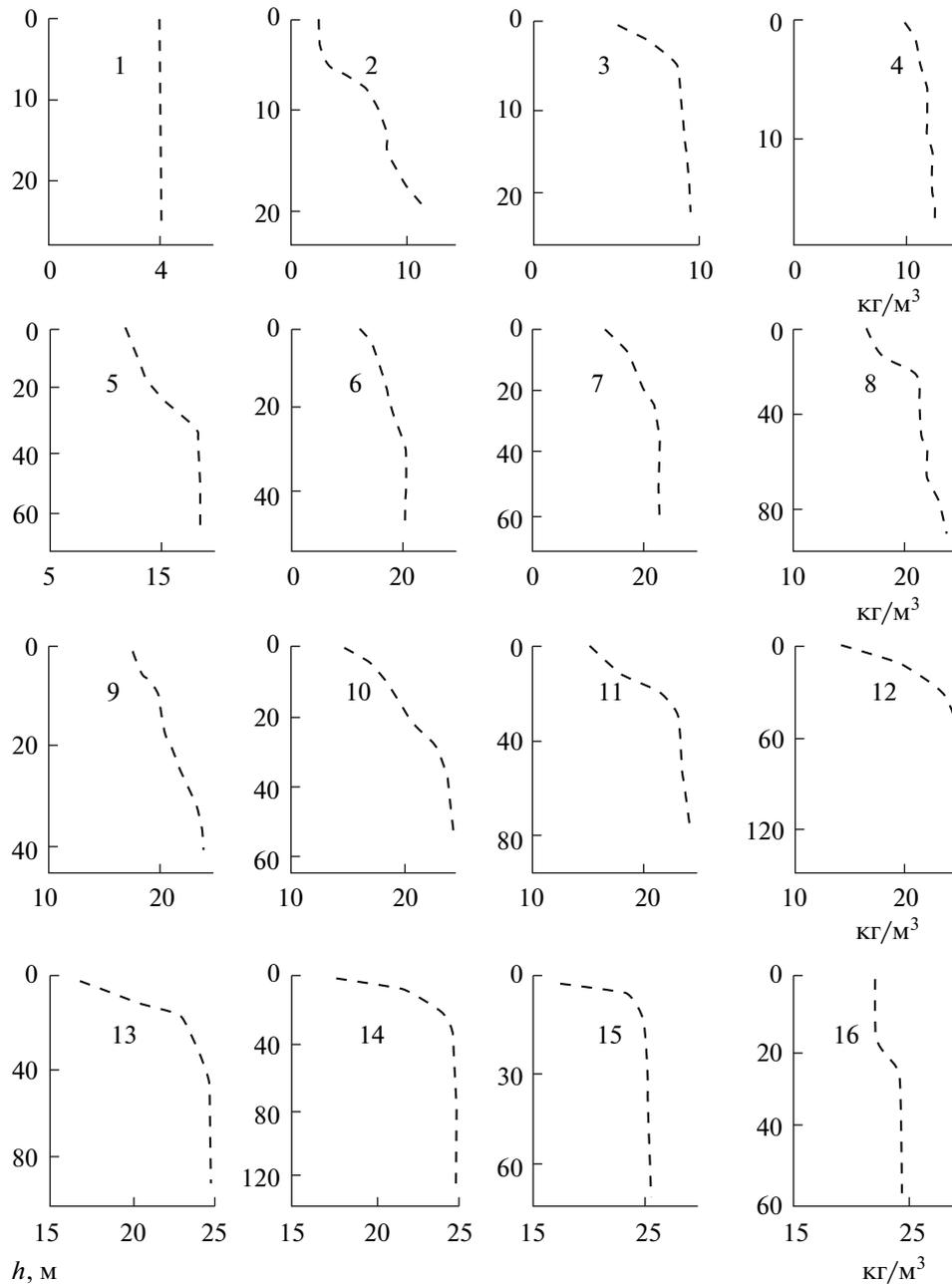
Пункт измерений	Расстояние, км		Соленость воды $S$ , ‰			$\Delta S$	$n$	Тип перемешивания
	от о. Орлеан	от верхней границы эстуария	на поверхности $S_{\text{пов}}$	у дна $S_{\text{дно}}$	средняя $S_{\text{ср}}$			
1	12.6	48.1	6.42	6.42	6.42	0	0	Полное перемешивание
2	22.8	58.2	3.81	16.9	10.3	13.1	1.26	“Клин” осолоненных вод
3	32.9	68.3	7.72	12.9	10.3	5.18	0.51	Частичное перемешивание
4	41.7	77.2	14.2	16.9	15.6	2.70	0.17	То же
5	50.6	86.0	17.5	24.7	21.1	7.20	0.34	»
6	54.4	89.8	22.1	27.3	24.7	5.20	0.21	»
7	60.7	96.1	23.4	29.9	26.6	6.50	0.24	»
8	72.1	107	22.1	32.5	27.3	10.4	0.38	»
9	78.4	114	23.4	32.5	27.9	9.10	0.33	»
10	91.1	127	20.8	33.8	27.3	13.0	0.48	»
11	97.4	133	20.8	33.8	27.3	13.0	0.48	»
12	109	144	19.5	33.8	26.6	14.3	0.54	»
13	120	156	22.7	33.8	28.3	11.1	0.39	»
14	127	162	25.3	33.8	29.6	8.50	0.29	»
15	137	172	25.3	33.8	29.6	8.50	0.29	»
16	147	182	30.5	33.8	32.2	3.30	0.10	Полное перемешивание

пример, в [17] деление эстуария проводится в зависимости от продольного профиля дна, и морская граница эстуария в этом случае совпадает с нижней границей среднего эстуария (рис. 1), а площадь эстуария в этом случае (10800 км<sup>2</sup>) составит только часть величины, использовавшейся в расчете, приведенном выше. В этой оценке не учитывается большая глубина нижнего эстуария и его влияние на перемешивание во всем эстуарии. Она также не дает полного представления о процессах, происходящих на разных участках эстуария.

Объем приливной призмы  $P_t$  можно также рассчитать по расходу “обратного” (приливного) потока  $Q_t = \bar{V}h\bar{u}_t$ , где  $V$ ,  $h$ ,  $u_t$ ,  $Q_t$  – соответственно ширина, средняя глубина и средняя по сечению скорость обратного течения. По значениям скоростей обратного течения [13], измеренным в верхнем эстуарии (у северо-восточной оконечности о. Льевр), рассчитано значение средней по сечению скорости  $\bar{u}_t$ , равное 0.6 м/с. Объем приливной призмы  $P_t = Q_t\tau$  за период приливного цикла  $\tau$  составит 19.7 км<sup>3</sup>, а приливный параметр  $\alpha = 0.027$  (~0.03). Рассчитанное таким образом значение критерия  $\alpha$  получается того же порядка, что и рассчитанное по площади всего эстуария. В целом, обе приведенные выше оценки

приливного параметра  $\alpha$  свидетельствуют о том, что эстуарий р. Св. Лаврентия относится к частично перемешанным эстуариям со слабой стратификацией

**Параметр стратификации  $n$ .** Тип перемешивания и стратификации вод в эстуарии р. Св. Лаврентия можно также определить, используя параметр стратификации  $n = \Delta S/S_{\text{ср}}$  ( $\Delta S = S_{\text{дно}} - S_{\text{пов}}$ ,  $S_{\text{ср}} = 0.5(S_{\text{дно}} + S_{\text{пов}})$ ) [31], рассчитанный по графикам распределения условной плотности воды в верхнем эстуарии, рассчитанной по измерениям температуры и солености воды в летний период через 2 сут после квадратурного прилива на участке эстуария между о. Орлеан и устьем р. Сагены (рис. 7). При этом для пересчета условных плотностей воды в соленость авторами данной статьи использовалась программа перевода условной плотности морской воды в соленость на основе “Международного стандарта морской воды ЮНЕСКО” [44]. Рассчитанный таким образом параметр  $n$  изменяется в диапазоне 0.1–1.26 (табл. 4), что указывает на сложную структуру вод на этом участке. В частности, параметр  $n$ , рассчитанный по профилям плотности между островами Орлеан и Кудр (рис. 7, профили 1–5), показывает, что в ~23 км ниже о. Орлеан поток сильно стратифицирован с наличием клина осолоненных вод.



**Рис. 7.** Вертикальные профили условной плотности воды, измеренные на участке верхнего эстуария р. Св. Лаврентия от о. Орлеан (1) до впадения р. Сагены (16) 19 августа 1998 г. (два дня после квадратурного прилива) [12]. Местоположение пунктов измерений соответствует данным табл. 4.

Результаты измерений турбулентных пульсаций скорости и солёности вблизи о. Кудр, приведенные в [12, 13], показали, что взаимодействие пресных и осолоненных вод с образованием внутренних волн происходит на данном участке эстуария регулярно примерно за 1 ч до наступления полной воды.

Таким образом, по параметру  $n$  верхний эстуарий р. Св. Лаврентия в целом можно отнести к частично перемешанным умеренно стратифициро-

ванным эстуариям с переходом в сильно стратифицированный эстуарий.

**Число Ричардсона  $Ri_L$ .** Тип перемешивания пресных и осолоненных вод в эстуарии р. Св. Лаврентия можно оценить также с помощью слоевого числа Ричардсона [7, 18]

$$Ri_L = \frac{gh \Delta \rho}{v^2 \rho_{cp}}$$

где  $h$  — глубина потока;  $v$  — скорость течения в верхнем слое воды;  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ ,  $\rho_{cp} = (\rho_1 + \rho_2)/2$ , т.е. соответственно разность плотностей и средняя плотность воды в придонном и поверхностном слоях.

Средняя величина числа Ричардсона, рассчитанная для участка верхнего эстуария р. Св. Лаврентия от о. Кудр до впадения р. Сагены с использованием профилей условной плотности (рис. 7), составляет  $Ri_L = 4.3$ . Полученное значение числа  $Ri_L$  попадает в диапазон  $2 < Ri_L < 20$ , соответствующий частично перемешанному эстуарию [7, 18].

Анализ всех приведенных выше оценок типа смешения вод в эстуарии р. Св. Лаврентия показывает, что критерий Симмонса  $\alpha$  позволяет судить об осредненном для всего эстуария вертикальном перемешивании вод, параметр стратификации  $n$  дает наиболее точное определение типа перемешивания вод в месте измерения солености, а число  $Ri_L$  отражает степень устойчивости потока. Сравнение результатов расчетов этих параметров для эстуария р. Св. Лаврентия показало, что верхний эстуарий относится к частично перемешанным, при этом для некоторых его участков характерны все типы перемешивания, приведенные в табл. 3. В среднем и нижнем эстуарии смешение речных и морских вод происходит по типу «клина» осолоненных вод, и эстуарий сильно стратифицирован.

В то же время на взаимодействие речных и морских вод и формирование эстуарной циркуляции в устье р. Св. Лаврентия существенно влияет уникальная топография дна эстуария, связанная с наличием глубоководного Лаврентийского желоба. В теплое время года средний и нижний эстуарий, как правило, подразделяется по глубине на три четких слоя (рис. 2): поверхностный (0–30 м) с соленостью от 26 до 32‰, образующийся под опресняющим влиянием стока рек Св. Лаврентия и Сагены; холодный промежуточный (30–125 м) с температурой  $-1...+4^\circ\text{C}$  и соленостью 32–33‰, формирующийся каждую зиму в результате охлаждения поверхности воды в зал. Св. Лаврентия; соленый (33–34‰), но более теплый ( $+2...+5^\circ\text{C}$ ) придонный, состоящий из вод Атлантического океана [12]. Холодное и соленое компенсационное течение в придонной области движется из зал. Св. Лаврентия и нижнего эстуария в сторону реки, обновляя воды глубоких ложбин верхнего и среднего эстуария. Остаточная, осредненная за приливный цикл, циркуляция вод типична для эстуариев с осолоненным поверхностным слоем, движущимся в сторону моря, и холодным промежуточным и придонным слоями, движущимися в сторону суши с меньшей скоростью.

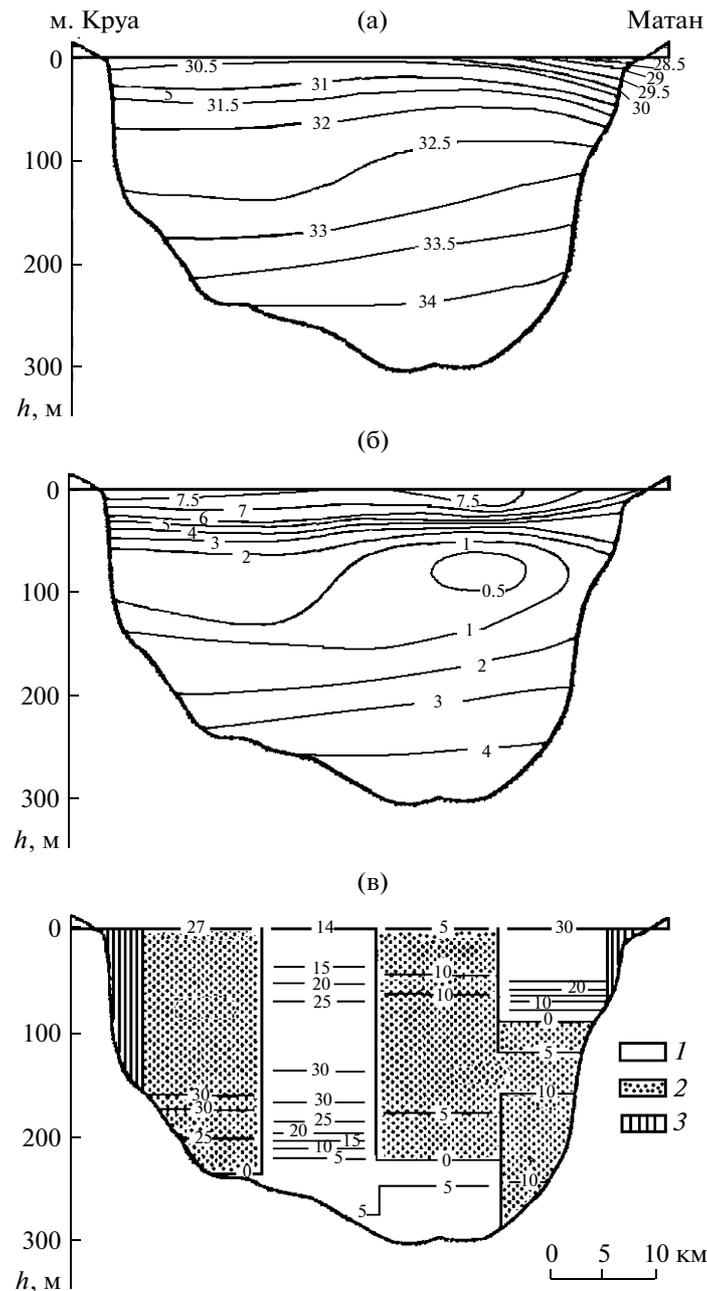
#### *Влияние силы Кориолиса на течения в эстуарии*

В эстуарии р. Св. Лаврентия, особенно в нижнем, наблюдается тенденция движения поверхностного более опресненного слоя в сторону моря

вдоль правого южного берега, в то время как компенсирующее течение соленой воды движется в основном вдоль северного побережья [39]. Подобные отклонения результирующего течения вправо наблюдаются и в других крупных эстуариях Северного полушария, например, в Чесапикском зал. [8]. Канадские ученые связывают этот процесс с воздействием на динамику вод довольно широкого эстуария р. Св. Лаврентия отклоняющей силы вращения Земли. Сила Кориолиса, действующая перпендикулярно направлению скорости потока, может составлять до 20% силы давления на широтах 50–60° [5]. Влияние силы Кориолиса можно определить с помощью радиуса Россби ( $L_R$ ), который для бароклинного потока выражается следующим образом:  $L_R = Nh/f_0$ , где  $N$  — частота Вейселя–Брента,  $h$  — глубина,  $f_0 = 2\Omega\sin\varphi$  — параметр Кориолиса,  $\Omega$  и  $\varphi$  — угловая скорость вращения Земли и географическая широта места. Величина  $L_R$  для течения в эстуарии Св. Лаврентия составляет ~10 км [36]. Она соответствует ширине потока в поверхностном слое, поэтому вращение Земли может заметно влиять на динамику вод в эстуарии.

Канадскими учеными выявлено [39], что направленный в сторону океана результирующий поток опресненных вод в поверхностном слое смещается к правому южному берегу, а направленный в сторону реки результирующий поток осолоненных вод — к северному берегу (также в правую сторону). При этом скорость течения в придонном слое у северного берега примерно равна скорости на поверхности у южного берега (30 см/с) [34]. Влияние силы Кориолиса становится более заметным в широком нижнем эстуарии, где благодаря его действию образуется течение Гаспе [35, 36].

Полевые исследования геострофического течения в эстуарии р. Св. Лаврентия, результаты которых приведены в [33], осуществлялись в период заполнения эстуария (3–4 сут перед полнолунием или новолунием). В створе длиной 50 км, ограниченном м. Круа и г. Матан (рис. 1) и расположенном в непосредственной близости от границы между средним и нижним эстуарием, в течение 6 сут (22–27 сентября 1977 г.) измерялись температура и соленость воды, а также скорость течения. Результаты измерений представлены на рис. 8. В поверхностном слое соленость воды в эстуарии уменьшается в направлении берегов (особенно в сторону южного берега) (рис. 8а). С глубиной соленость воды увеличивается, достигая у дна величин, характерных для зал. Св. Лаврентия. Распределение температуры воды в поверхностном слое схоже с распределением солености (рис. 8б). С ростом глубины четко проявляется промежуточный холодный слой на



**Рис. 8.** Распределение солёности, ‰, (а), температуры воды, °С, (б) и скоростей геострофического течения, см/с, (в) в эстуарии р. Св. Лаврентия в створе м. Круа (север) – г. Матан (юг) 22–27 сентября 1977 г. [33]. Направление геострофического течения в сторону океана (1) и реки (2). 3 – отсутствие данных.

глубинах 50–200 м, температура воды в котором понижалась на 0.5°С по сравнению с температурой глубинного слоя в 2–4°С (рис. 8б).

Значительные горизонтальные градиенты давления приводят к особенностям геострофического потока в исследуемом створе эстуария (рис. 8в). Скорость течения в придонном слое у северного берега примерно равна скорости на поверхности у

южного берега (30 см/с). По данным наблюдений, приведенным в [33], геострофическое течение в центральной части эстуария в период его заполнения направлено в сторону залива, а на соседних участках – в сторону реки (рис. 8в). В целом за рассматриваемый период можно подсчитать величину стока воды под действием результирующего течения из эстуария в залив через исследуемый створ,

которая составила  $\sim 0.817 \text{ км}^3$ , в обратном направлении —  $0.822 \text{ км}^3$ . В вертикальном разрезе поток через исследуемый створ разделен на три части: у поверхности (до глубины 60 м) и у дна (220–300 м) течение направлено в сторону залива, в срединном слое (60–220 м) — в сторону эстуария [33].

#### *Динамика наносов в эстуарии*

Динамика наносов в эстуарии р. Св. Лаврентия — результат совместного воздействия стока воды реки и приливов со стороны Атлантического океана, а также зависит от топографии дна и плотностной стратификации вод (наличия поверхностного и придонного слоев). Основным источником поступления твердого материала в верхний эстуарий — река, в нижний и средний эстуарий — море.

Седиментация в эстуарии происходит под действием, главным образом, двух процессов: во-первых, флокуляции и образования конгломератов изначально мелких частиц наносов, во-вторых, сортировки наносов в зависимости от размеров частиц [15]. Сильные остаточные течения у дна в сторону реки перемещают мелкие частицы вверх по эстуарии. Часть взвешенных наносов, поступающих в эстуарий, на участках со слабым течением осаждаются на дно в виде хлопьев, состоящих из частиц песка и ила. Эти зоны аккумуляции непостоянны и перемещаются в зависимости от времени года. В период дождей и повышенного водного стока реки часть наносов, отложившихся в эстуарии, вновь взмучивается и перемещается вдоль эстуария. Аккумуляция взвешенных наносов, главным образом мелкодисперсного ила, в течение всего года происходит в Лаврентийском желобе и в зал. Св. Лаврентия [14].

Донные отложения в эстуарии отличаются неоднородным гранулометрическим составом. Дно верхнего эстуария покрыто, главным образом, гравием (размер частиц 2–80 мм), песком (0.06–2 мм), мелким песком или “лимонсом” (2–60 мкм), и ледниково-морскими глинами ( $\leq 2$  мкм), которые размываются сильными приливными и отливными течениями. Для прибрежных участков эстуария и глубоких ложбин, покрытых мелкими отложениями, характерны два эрозионно-аккумулятивных цикла — приливный и сезонный [25]. В среднем и нижнем эстуарии приливы и волнение приводят к разрушению берегов и выносу твердого материала в океан.

На участке верхнего эстуария между островами Орлеан и Кудр в районе архипелага Монмани (рис. 1) в области смешения пресных и осолоненных вод расположена зона максимальной мутности, ограниченная изолинией концентрации наносов в  $10 \text{ г/м}^3$ . Средняя мутность воды на этом участке изменяется от 40 до  $80 \text{ г/м}^3$ , достигая в приливную фазу максимальной величины (200–400  $\text{г/м}^3$ ), а на-

носы представлены в основном илами и глинистыми частицами [15]. Дно здесь также сложено главным образом илами и глинами. Зона максимальной мутности подвержена миграциям под действием приливов и стока воды реки. Так, в зависимости от фазы водного режима реки она перемещается на расстояние 30–40 км. Ниже по течению о. Кудр мутность воды в верхнем эстуарии постепенно уменьшается до  $2 \text{ г/м}^3$  в районе впадения р. Сагней [15].

Важную роль в формировании зоны максимальной мутности в эстуарии играет возникновение обратных течений, связанных с асимметрией приливной волны [24, 25]. При этом максимум мутности наблюдается около момента смены приливных течений на отливные. У южного берега эстуария преобладают отливные течения, способствующие переносу в этой части эстуария речных вод. В результате происходит вынос мутных речных вод через Южный проход эстуария. Струя мутных вод достигает зоны эстуария с соленостью воды 15‰, соответствующей 50%-ому смешению морских и речных вод. Здесь создается так называемый гидрологический фронт, разделяющий воды эстуария в зависимости от их солености, температуры и мутности. Этот фронт также подвержен сезонной миграции, вызванной изменениями речного стока.

Отливное течение также способствует размыву прибрежных мелководных зон маршей и дополнительному поступлению взвешенных наносов в эстуарий.

Значительная часть обломочного материала из прибрежной зоны эстуария выносятся льдом в период ледохода.

В нижнем эстуарии и в зал. Св. Лаврентия в распределении мутности воды выделяются три слоя. В поверхностном слое (до глубины 50 м), для которого характерна поверхностная циркуляция вод, мутность воды —  $0.10\text{--}2.9 \text{ г/м}^3$ . В срединном слое мутность изменяется в пределах  $0.05\text{--}0.1 \text{ г/м}^3$ , увеличиваясь в придонном слое до  $0.1\text{--}0.4 \text{ г/м}^3$ . Сток взвешенных наносов уменьшается в сторону океана [15].

Аккумуляция тонких наносов вдоль южного берега верхнего эстуария и севернее о. Орлеан приводит к накоплению загрязняющих и токсичных веществ в донных отложениях. Район о. Орлеан считается наиболее загрязненным в эстуарии, здесь отмечается высокое содержание фосфора, органических веществ, а также тяжелых металлов (железа, магния, цинка, ртути, кобальта, никеля, меди, кадмия).

В [15] отмечена связь содержания ртути с размером наносов в устье р. Сагней, самом эстуарии и зал. Св. Лаврентия. Концентрация ртути возрастает с уменьшением размера частиц наносов. В зависимости от текстуры наносов и места отбора проб общая концентрация ртути изменялась от 10 до  $12300 \text{ нг/л}$  со средним значением  $386 \text{ нг/л}$ . Наи-

большее значение было зафиксировано в устье р. Сагены (2980 нг/л), а наименьшее — в зал. Св. Лаврентия (150 нг/л). В эстуарии р. Св. Лаврентия содержание ртути изменяется от 30 до 950 нг/л. Наиболее высокие концентрации отмечаются в местах накопления мелких наносов, приуроченных к ложбинам и подводным долинам. Наоборот, наименьшие концентрации ртути приурочены к относительно плоским песчаным донным отложениям.

### ВЫВОДЫ

УО р. Святого Лаврентия относится к эстуарно-мудовому типу и включает в себя устьевую часть реки, эстуарий и устьевое взморье — зал. Св. Лаврентия с проливами Жак-Картье и Онгедо (Гаспе) между о. Антикости и берегами.

Исследование динамики воды и наносов в эстуарии р. Св. Лаврентия выявило влияние топографии дна (в данном случае наличие глубоководного Лаврентийского желоба) на формирование эстуарной циркуляции вод. В теплое время года средний и нижний эстуарий, как правило, подразделяются по глубине на три четких термогалинных слоя: поверхностный осолоненный (0–30 м), холодный промежуточный (30–125 м) с температурой 0–4°C и соленый, но более теплый придонный из океанических вод.

По типу смешения речных и морских вод эстуарий р. Св. Лаврентия в целом относится к частично перемешанным эстуариям со слабой стратификацией, что подтверждается расчетами критерия Симмонса  $\alpha$ . Однако сравнение результатов расчетов параметра стратификации  $n$  и числа Ричардсона  $Ri_L$  для эстуария р. Св. Лаврентия показало, что при определении типа вертикального перемешивания и стратификации необходимо делить эстуарий на несколько участков. Первый — от верхней границы эстуария до о. Кудр — характеризуется полным перемешиванием. Второй — от о. Кудр до нижней границы верхнего эстуария — относится к частично перемешанным эстуариям с умеренной стратификацией вод и вовлечением осолоненных вод из нижнего слоя в верхний. Третий, охватывающий средний и нижний эстуарий, относится к сильно стратифицированным эстуариям с перемешиванием по типу «клина» осолоненных вод.

В результате взаимодействия речных и морских вод вблизи границы интрузии осолоненной воды в эстуарий формируется зона максимальной мутности, мигрирующая в зависимости от фазы прилива и сезонных изменений стока реки и характерная для многих частично перемешанных эстуариев.

Благодаря большой ширине нижнего эстуария заметное влияние на течения в нем оказывает сила Кориолиса, приводящая к смещению результирующего потока вправо (в южном направлении) и фор-

мированию течения Гаспе вдоль южного берега эстуария.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны. Л.: ГУ навигации и океанографии МО СССР, 1977. 153 с.
2. Водные ресурсы России и их использование. СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
3. Долгополова Е.Н. Формирование эстуарной циркуляции в зависимости от величины прилива // Тр. междунар. конф. «Литодинамика донной контактной зоны океана». М.: Ин-т океанологии РАН, 2009. С. 14–16.
4. Долгополова Е.Н., Исупова М.В. Классификация эстуариев по гидродинамическим процессам // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 3. С. 274–291.
5. Мак-Доуэлл Д.М., О'Коннор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
6. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 638 с.
7. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
8. Михайлов В.Н., Солодовникова Т.Ю., Михайлова М.В. Закономерности гидрологических процессов в Чесапикском заливе (США) как классическом эстуарии // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 2. С. 139–159.
9. Михайлова М.В., Исупова М.В. Водный и ледотермический режим арктических устьев разного типа // Тр. всерос. конф. «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». М.: МГУП, 2007. С. 37–40.
10. Самойлов И.В. Устья рек. М.: Географгиз, 1952. 486 с.
11. Borne de Grandré C., El-Sabh M.I. Étude de la circulation verticale dans l'estuaire du Saint-Laurent au moyen de la modélisation mathématique // Atmosphere—Ocean. 1980. V. 18. № 4. P. 304–321.
12. Bourgault D., Koutitonsky V.G. Real-time monitoring of the freshwater discharge at the head of the St. Lawrence Estuary // Atmosphere—Ocean. 1999. V. 37. № 2. P. 203–220.
13. Bourgault D., Saucier F. J., Lin C.A. Shear instability in the St. Lawrence estuary, Canada: A comparison of fine-scale observations and estuarine circulation model results // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № C5. P. 9393–9409.
14. Centre Saint-Laurent. Eau et sédiments // <http://www.qc.ec.gc.ca>
15. Couillard D. Qualité des sédiments en suspension et de fond du système Saint-Laurent (Canada) // J. Hydrological Sciences. 1987. № 32. P. 445–467.
16. Cranck K. Dynamics and distribution of suspended particulate matter in the St. Lawrence estuary // Le Naturalist Canadien. 1979. V. 106. № 1. P. 163–173.
17. DFO. Oceanographic conditions in the Gulf of St. Lawrence during year 2000 // Science Stock Status. 2001. Report G4 – 01. P. 1–5.
18. Dyer K.R., New A.S. Intermittency in estuarine mixing // Estuarine variability. N.Y.: Acad. Press, 1986. P. 321–339.
19. Dickie L., Trites L.M. The Gulf of St. Lawrence // Estuaries and Enclosed Seas / Ed. Ketchum B.H. Quebec, 1983. P. 403–425.

20. *Drapeau G., Munro J., Nellis P.* Long term fate of dredged sediments at Ile Madame dumping site (St. Lawrence estuary): a basic assessment // Proc 2-nd Inter. Symp on Contaminated Sediments. Quebec, 2003. P. 36–40.
21. *El-Sabh M.* Physical oceanography of the St. Lawrence Estuary // Hydrodynamics of estuaries / Ed. Kjerfve B. Boca Raton: CRC Press, 1988. V. II. P. 61–78.
22. *El-Sabh M.I., Lévesque L., Murty T.S.* Mouvements des eaux induits par la marée et le vent dans l'estuaire du Saint-Laurent // Le Naturalist Canadien. 1979. V. 106. № 1. P. 89–104.
23. *Forbes D.L., Manson G. K., Chagnon R. et al.* Nearshore ice and climate change in the southern gulf of St. Lawrence // Proc. 16th IAHR Symposium on Ice. Dunedin, 2002 V. 1. P. 344–349.
24. *Forrester W.D.* Tidal transport and streams in the St. Lawrence estuary // Int. Hydrograph. Rev. 1972. V. 48. № 1. P. 95–108.
25. *Gagnon M.* Bilan regional. Rive sud de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Zones d'intervention prioritaire 15, 16 et 17 // Centre Saint-Laurent. Environnement Canada – région du Québec. 1998 // www.slv2000.qc.ca
26. *Gilbert D., Pettigrew B.* Interannual variability (1948–1994) of the CIL core temperature in the Gulf of St. Lawrence // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1997. V. 57. Suppl. 1. P. 57–67.
27. Global Runoff Data Centre (GRDC) // <http://grdc.bafg.de>
28. *Godin G.* La marée dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent // Le Naturalist Canadien. 1979. V. 106. № 1. P. 105–121.
29. Government of Canada. Atlas of tidal currents from Cap de Bon-Desir to Trois-Rivieres. Department of Fisheries and Oceans. Ottawa: Canadian Hydrographic Service, 1997. 128 p.
30. *Greenwood B., Hale P.B.* Depth activity, sediment flux, and morphological change in a barred nearshore environment // The Coastline of Canada / Ed. McCann S.B. Halifax: Geological Survey of Canada, 1980. P. 89–109.
31. *Hansen D.V., Rattray M.* New dimensions in estuary classification // Limnol. Oceanogr. 1966. V. 11. № 3. P. 319–326.
32. *Harms I.H., Hübner U., Backhaus J.O. et al.* Salt intrusions in Siberian river estuaries: observations and model experiments in Ob and Yenisei // Proc. EGS XXVII General Assembly. Nice, 2002. P. 27 – 46.
33. *Koutitonsky V.G.* Transport de masses d'eau a l'embouchure de l'estuaire du Saint-Laurent // Le Naturalist Canadien. 1979. V. 106. № 1. P. 89–104.
34. *Koutitonsky V.G., Bugden G.L.* The physical oceanography of the gulf of St. Lawrence: A review with emphasis on the synoptic variability of the motion // Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 1991. V. 113. P. 57–90.
35. *Koutitonsky V.G., Wilson R.E., El-Sabh M.L.* On the seasonal response of the Lower St. Lawrence Estuary to buoyancy forcing by regulated river runoff // Estuarine Coastal Shelf Science. 1990. V. 31. № 5. P. 359–379.
36. *Mertz G., El-Sabh M.I., Proulx D., Condal A.R.* Instability of a buoyancy-driven coastal jet: The Gaspere current and its precursor // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. № C6. P. 6885–6893.
37. *Milliman J.D., Rutkowski Ch., Meybeck M.* River discharges to the sea // A Global River Index (GLORI). LOICZ reports and studies. 1995. 125 p.
38. *Muir L.R.* Internal tides in a partially mixed estuary. Report Ocean Science and Surveys, Central Region. Burlington: Canada Centre for Inland Waters, 1982. Report 9. 56 p.
39. *Neu H.J.A.* A study of mixing and circulation in the St. Lawrence Estuary up to 1964 // Atl. Ocean. Lab. Bed. Inst. Rep. Ser. 1970. Report 9. 76 p.
40. *Neu H.J.A.* Man-made storage of water resources. A liability to the ocean environment // Mar. Pollut. Bul. 1982. V. 13. Pt I, II. P. 7–44.
41. *Neu H.J.A.* Runoff regulation for hydro-power and effect on the ocean environment // Hydr. Scien. Bull. XXI. 1976. V. 3. № 9. P. 433–444.
42. *Taillefer F.* La morphologie des environs de Québec et la basse-vallée du Saint-Laurent // Cahiers de géographie du Québec. 1958. V. 2. № 4. P. 177–191.
43. *Tomczak M., Godfrey J.S.* Regional Oceanography: an Introduction. Delhi: Daya Publ. House, 2003. 390 p.
44. [www.aquatis.ru/sea/test.php](http://www.aquatis.ru/sea/test.php)