

УДК 556.16 (282.2)

## ВЛИЯНИЕ СТОКА РЕКИ АМУР НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ АМУРСКОГО ЛИМАНА

**И. А. Жабин** (zhabin@poi.dvo.ru),

**В. А. Дубина**

Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук (Владивосток)

Жабин, И. А. Влияние стока реки Амур на гидрологические условия Амурского лимана / **И. А. Жабин, В. А. Дубина** // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. – Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2008. – Т. 10. – С. 190–200.

**Ил. – 6, библиогр. – 11.**

По данным спутниковых и гидрологических наблюдений рассмотрены особенности структуры вод Амурского лимана. В пределах лимана выделены две основные структурные зоны – северная, находящаяся под непосредственным влиянием речного стока, и южная, занятая модифицированными япономорскими водами, поступающими в лиман через пролив Невельского. Речной сток вблизи устья реки распространяется преимущественно по навигационным фарватерам, на границах которых формируются сдвиговые фронты. Две основные структурные зоны разделены термическим фронтом и связанным с ним фронтом мутности.

Zhabin, I. A. Influence of Amur River runoff on hydrological conditions of the Amur estuary / **I. A. Zhabin, V. A. Dubina** // Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas : Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography. – Yuzhno-Sakhalinsk : SakhNIRO, 2008. – Vol. 10. – P. 190–200.

**Fig. – 6, ref. – 11.**

Particular features of the Amur estuary water structure have been considered based on the data of satellite and hydrologic observations. The two main structural zones were distinguished within the estuarine area: northern, being under the direct influence of the river runoff, and southern, occupied by the modified Japan Sea waters coming to the estuary through Nevelskoy Strait. The river runoff near the mouth is distributed mainly over the navigating channels, on the bounds of which shear fronts are being formed. The two main structural zones are separated by a thermal front and the related-to-it turbidity front.

## ВВЕДЕНИЕ

Шельфовая зона морей, прилегающая к устьям крупных рек, отличается экстремально высокими значениями горизонтальных и вертикальных градиентов гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик. Как правило, эти воды содержат высокие концентрации биогенных элементов, что во многом определяет повышенную биологическую продуктивность таких районов. В зависимости от интенсивности речного стока, приливных течений и от конфигурации приустьевой области перемешивание речных и морских вод может происходить как в пределах эстуария, так и на прилегающих к эстуарию участках шельфа. Если речной сток не успевает существенно перемешаться с морскими водами в пределах эстуария, то на поверхности моря образуется сравнительно тонкий слой распресненных вод (шлейф или стоковая линза). По краям стоковой линзы формируются стоковые фронты и струйные течения, а под ней – резкие слои скачка солености, температуры и плотности. Зоны смешения играют особую роль в локальных шельфовых физических, химических, биологических и биогеохимических процессах и во многом определяют уникальность прибрежных экосистем, находящихся под сильным влиянием речного стока. В последнее десятилетие в связи с ростом населения и промышленного производства в северных провинциях Китая антропогенная нагрузка на Амур резко увеличилась. С этой точки зрения исследование закономерностей распространения стока Амура в Амурском лимане представляет несомненный практический интерес.

Комплексные работы по изучению экосистемы приустьевой области реки Амур проводились 12–21 июля 2005 г. и 6–14 июня 2007 г. (НИС «Профессор Гагаринский»). Гидрологические измерения проводились при помощи STD-зонда SBE 19 plus. Полученные в ходе этих рейсов данные позволяют исследовать изменчивость термохалинной структуры в зоне смешения речных и морских вод, расположенной в Амурском лимане. В работе также использована спутниковая информация о температуре поверхности моря (радиометр AVHRR, спутники серии NOAA), о цвете (мутности) морской воды (видимый диапазон, радиометр MODIS, спутники Terra и Aqua) и о шероховатости морской поверхности (радар с синтетической апертурой (SAR), спутник ERS-2).

**Гидрометеорологический режим Амурского лимана.** Амур входит в число наиболее многоводных рек мира. Площадь водосбора составляет около 1855 тыс. км<sup>2</sup>, среднегодовой расход в районе устья – 10900 м<sup>3</sup>/с, среднегодовой объем стока – около 394 км<sup>3</sup>. Устьевая область Амура включает в себя устьевой участок реки и устьевое взморье, состоящее из Амурского лимана и прилегающих частей Сахалинского залива и Татарского пролива (Козловский, 1978). Сток Амура поступает в относительно узкий и мелководный Амурский лиман (эстуарий реки Амур), соединяющий Японское и Охотское моря. Общая площадь Амурского лимана составляет 4205 км<sup>2</sup>, объем – 16,4 км<sup>3</sup>. В пределах Амурского лимана существуют несколько фарватеров, по которым осуществляется водообмен между устьем и прилегающими районами Японского и Охотского морей (рис. 1). Сахалинский фарватер соединяет Охотское и Японское моря, от устья Амура выходят фарватеры Северный (Невельского), Южный и Восточный (Люция Японского..., 1959). Пролив Невельского соединяет Амурский лиман с Татарским проливом Охотского моря.

В водном режиме Амура выделяются весенне-летнее половодье, летняя межень, летне-осенние паводки и зимняя межень. В отдельные годы летняя межень может отсутствовать. На теплую часть года (май–октябрь) приходится около 87%

годового стока, на зимние месяцы (ноябрь–апрель) – 13%. На долю Амура приходится 65% от суммарного речного стока в Охотское море (Пономарева, электронный ресурс).

Сток Амура распределяется по основным фарватерам следующим образом (Якунин, 1978). Летом преобладает сток по Восточному фарватеру (40%), на Южный фарватер приходится 34% стока, доля стока по фарватеру Невельского составляет 26%. В зимний период возрастает роль Южного фарватера (42%), на фарватер Невельского приходится 40% стока, сток через Восточный фарватер уменьшается до 18%.

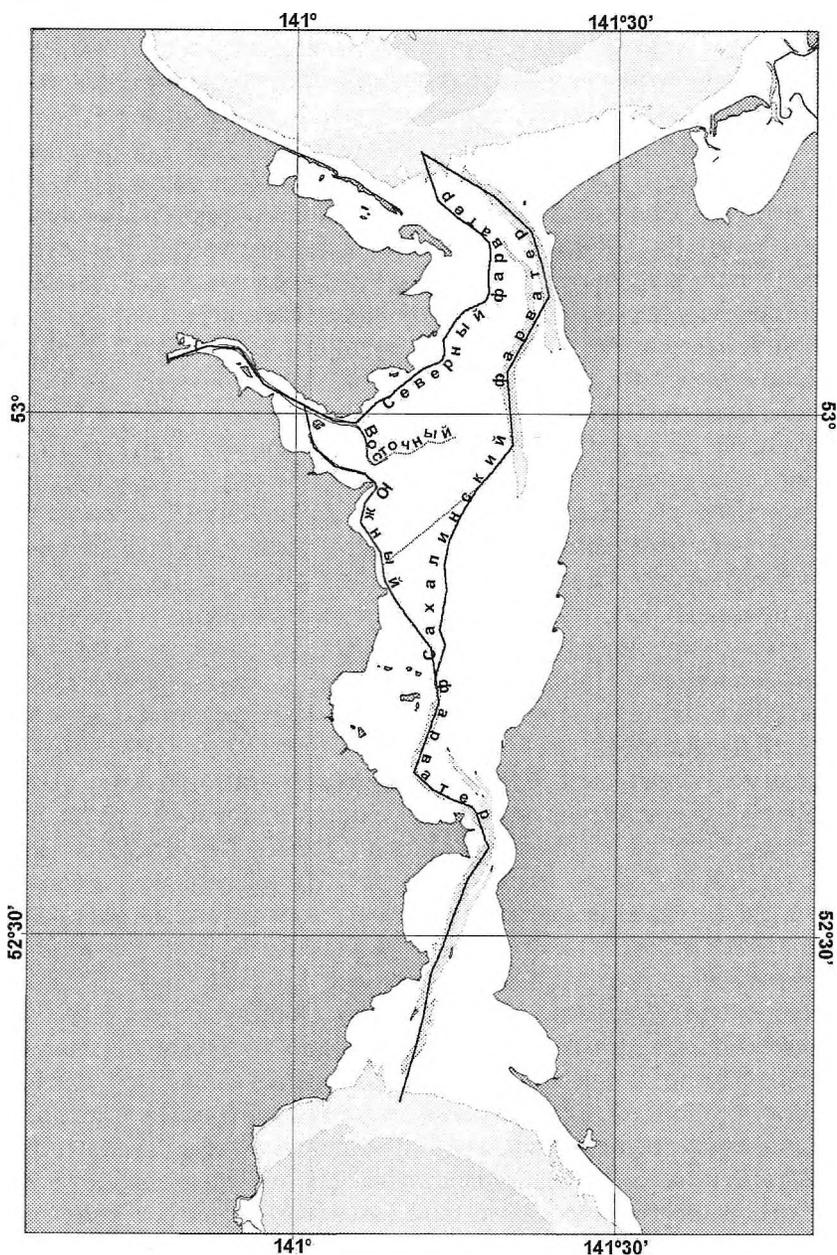


Рис. 1. Карта Амурского лимана, показывающая положение основных фарватеров

На северной границе Амурского лимана летом средний уровень воды понижается, а зимой – повышается, на южной границе лимана колебания уровня происходят в противофазе. Поэтому летом (май–октябрь) разность средних уровней между Японским и Охотским морями положительна (наклон на север). За счет этого перепада уровней на границах лимана формируется фоновая циркуляция вод в лимане – летом средние течения направлены на север. Сведения об изменениях уровней в зимний период противоречивы. По одним данным (Пономарева, электронный ресурс), разность уровней в зимний период становится отрицательной (наклон на юг) и среднее течение направлено на юг в Японское море. По другим (Соловьев, 1994), – разность фоновых уровней зимой близка к нулю. Это должно приводить к усилению стока в Японское море и, соответственно, к равномерному распределению стока Амура между Японским и Охотским морями. Водообмен между Японским и Охотским морями через пролив Лаперуза (течение Соя) также определяется разностью фоновых уровней (Talley, Nagata, 1995). Разность уровней в районе этого пролива положительна в теплый период года (май–октябрь) и значительно уменьшается в холодное время года (декабрь–март). Принимая во внимание доступные данные о сезонных изменениях разности фоновых уровней и внутригодовой изменчивости расходов Амура, можно сделать приблизительные оценки объемов пресной воды, поступающей в Охотское и Японское море в течение года при средних условиях. В период с мая по октябрь весь речной сток должен поступать в Охотское море. Средний объем стока за этот период равен  $331 \text{ км}^3$ . Если в холодный период года (ноябрь–апрель) сток равномерно распределен между морями, то в Японское море поступает приблизительно  $6,5\%$  среднегодового стока Амура ( $31,5 \text{ км}^3$ ). Соответственно, в среднем за год Охотское море получает  $362,5 \text{ км}^3$  пресной воды. Если предположить, что зимой (декабрь–март) весь сток Амура поступает в Японское море, а в переходные месяцы (ноябрь и апрель) сток распределен равномерно, то оценка величины неразбавленного речного стока в Японское море увеличится до  $36 \text{ км}^3$ , а сток в Охотское море составит около  $358 \text{ км}^3$ .

Муссонный характер атмосферной циркуляции над Охотским и Японским морями и орографические особенности района определяют сезонную изменчивость ветрового режима. Зимой над лиманом преобладает ветер северных, а летом – южных направлений (сгонный ветер). Осенью (преимущественно в октябре–ноябре) при прохождении глубоких циклонов и связанных с ними сильных и продолжительных северных/северо-западных ветрах в Сахалинском заливе и Амурском лимане возникают значительные штормовые нагоны (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998). Зона наибольших нагонов расположена в юго-восточной части Сахалинского залива и включает северный выход из Амурского лимана. Абсолютная максимальная величина штормовых нагонов в пределах лимана превышает  $1,25 \text{ м}$ .

Приливы играют существенную роль в динамике вод лимана (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998). Приливные волны в лиман поступают как из Охотского, так и из Японского моря. В Амурском лимане наблюдаются все типы приливов – полусуточный (район пролива Невельского), неправильный полусуточный (юго-восточная часть лимана), суточный (устьевой участок) и неправильный суточный (северная и центральная часть лимана). Наибольшие возможные величины приливных колебаний уровня изменяются в диапазоне от  $0,3 \text{ м}$  (устьевой участок) до  $2,0 \text{ м}$  (северный и южный выходы из лимана). Максимальные скорости приливных течений наблюдаются на выходе из Сахалинского фарватера в Сахалинский залив ( $2,34 \text{ м/с}$ ). В центральной части лимана наибольшие скорости приливных течений составляют  $1,95 \text{ м/с}$ , на Южном фарватере –  $0,51 \text{ м/с}$ , в проливе Невельского –  $1,56 \text{ м/с}$ .

Устойчивое льдообразование в Амурском лимане начинается в конце октября – начале ноября. Припай в Амурском лимане появляется обычно в середине ноября. В марте припай занимает почти весь Сахалинский залив. Толщина припая достигает 1,3–1,6 м. В среднем припай держится в Амурском лимане 203 дня, разрушение припая в среднем приходится на третью декаду мая (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998).

Положение и площадь зоны смещения речных и морских вод в Амурском лимане зависит от сезона и водности реки. Расчет стратификационно-циркуляционных параметров (Лобанова, 1987) позволил выделить две основные ситуации в гидрологическом режиме Амурского лимана. Летний тип характеризуется двухслойной стратификацией вод вдоль Сахалинского фарватера (северная часть лимана) и однородным вертикальным распределением солености в южной части лимана (пролив Невельского). При этом наименьшие значения солености наблюдаются вблизи устья Амура, а наибольшие – в проливе Невельского. Второй тип соответствует осенне-зимнему периоду. В это время года изменение фоновых уровней и преобладание ветров северных направлений приводит к усилению стока распресненных вод из Амурского лимана в Японское море. Соответственно, изменяется характер распределения солености вдоль оси лимана – наблюдается увеличение солености на северном выходе из лимана при уменьшении солености в южной части лимана. При этом сохраняются основные особенности стратификации вод – воды северной части лимана остаются устойчиво стратифицированными, в южной части лимана стратификация разрушена интенсивным вертикальным перемешиванием. На внутригодовую изменчивость накладываются изменения в приливном цикле. Во время сизигийных приливов увеличение скорости приливных течений и, соответственно, интенсивности приливного перемешивания в северной части лимана приводит к полному (летняя межень) или частичному (паводок) разрушению стратификации на выходе из лимана в Сахалинский залив.

В теплую часть года (май–октябрь) распресненные воды из Амурского лимана поступают в Сахалинский залив Охотского моря, где формируется стоковая линза реки Амур (Ростов, Жабин, 1991; Жабин и др., 2005, 2007).

**Вертикальная термохалинная структура вод Амурского лимана.** Гидрологические данные, полученные в ходе двух комплексных морских экспедиций в район Амурского лимана (июль 2005 г. и июнь 2007 г.), позволяют рассмотреть особенности термохалинной структуры вод в период весенне-летнего паводка и летней межени. Разрезы выполнялись по Южному и Сахалинскому фарватерам (рис. 2, 3).

В Амурском лимане можно выделить две основные структурные зоны – перемешанную и стратифицированную. Для южной зоны характерно однородное вертикальное распределение гидрологических характеристик при относительно высокой солености, для северной – двухслойная структура с сильно распресненным поверхностным слоем. Эти две структурные зоны были разделены фронтом. Фронт был связан с переходной зоной от Южного к Сахалинскому фарватеру. Стратификация в северной части лимана поддерживалась за счет поступления в придонном слое охотоморских шельфовых вод (солевой клин). Слабостратифицированный режим в центральной части лимана был связан с поступлением модифицированных япономорских вод под распресненный речным стоком поверхностный слой. Стратификация вод была существенно ослаблена в зоне прямого влияния речного стока. Южная часть лимана эстуария была заполнена водами, поступающими из Японского моря. Соленость в этой зоне увеличивалась по направлению от устья к

проливу Невельского. Интенсивное приливное и ветровое перемешивание в этой зоне приводит к однородному вертикальному распределению гидрологических характеристик. При этом влияние речного стока на характеристики этой части эстуария невелико. Разрезы были выполнены в разные годы и в различные гидрологические сезоны. Сравнение распределения гидрологических характеристик на разрезах (см. рис. 2, 3) позволяет сделать вывод об относительной устойчивости основных структурных зон Амурского лимана.

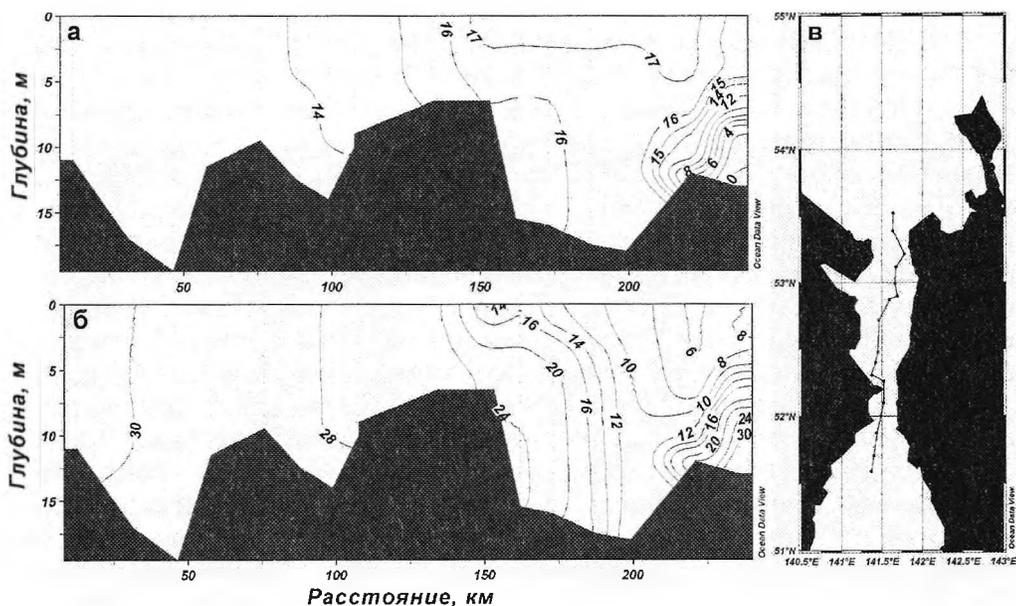


Рис. 2. Распределение температуры (а), солености (б) на разрезе через Амурский лиман (в) в июле 2005 г.

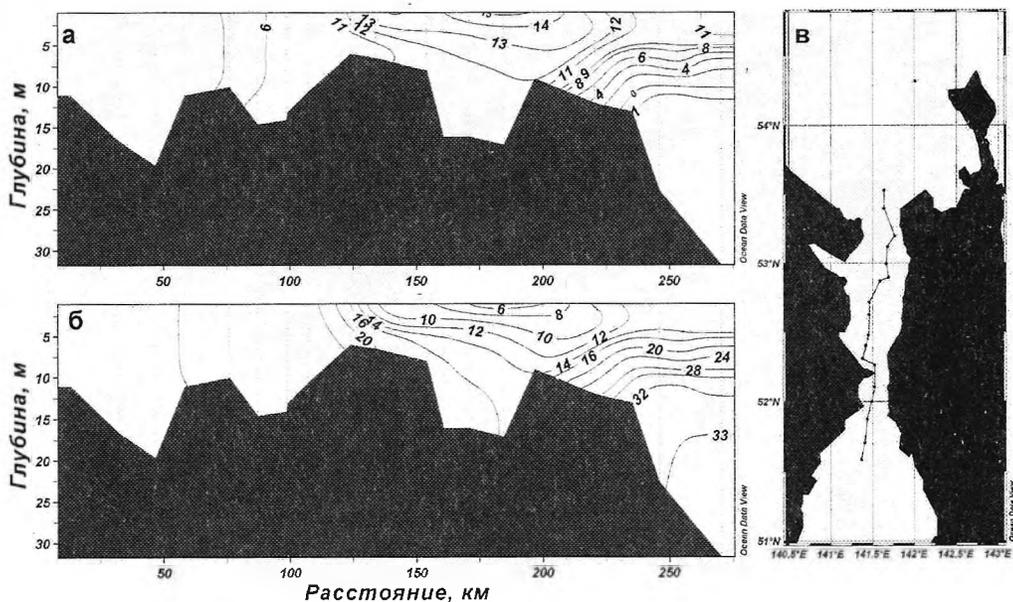
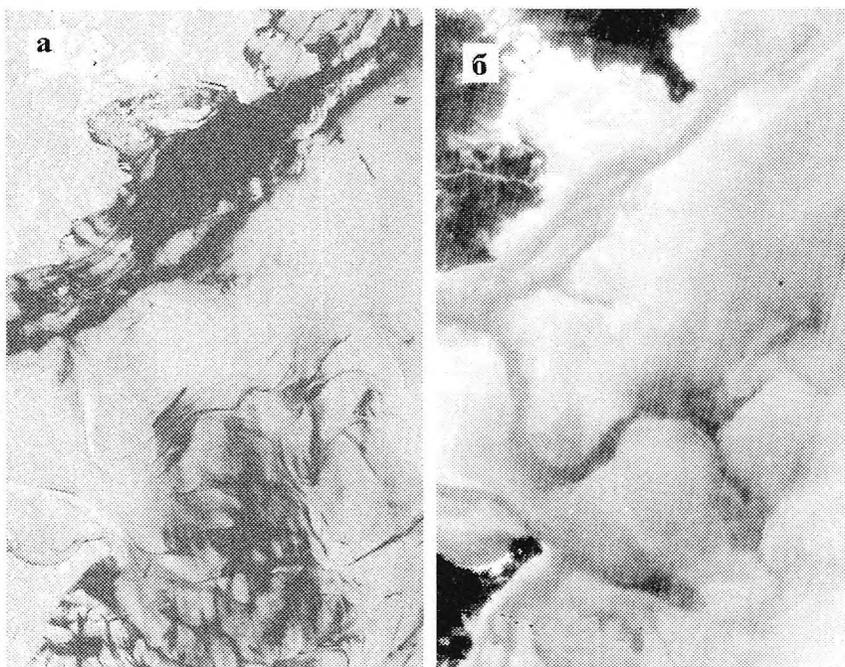


Рис. 3. Распределение температуры (а), солености (б) на разрезе через Амурский лиман (в) в июне 2007 г.

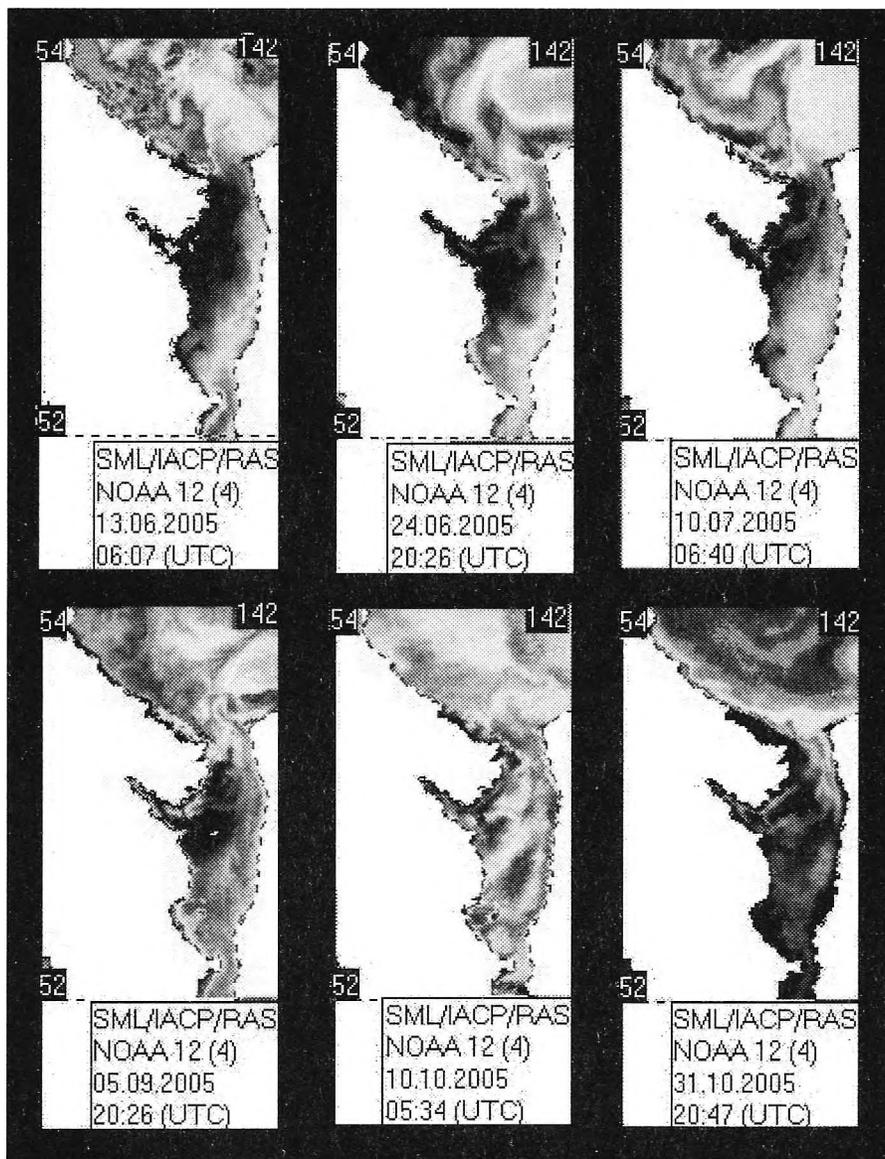
**Особенности структуры вод Амурского лимана по данным спутниковых наблюдений.** Пространственные масштабы структурных зон Амурского лимана и наблюдаемые контрасты температуры, мутности и шероховатости на поверхности позволяют использовать для исследования структуры зоны смешения речных и морских вод данные дистанционных спутниковых измерений. Для характеристики структуры поверхностного слоя и закономерностей распространения и перемешивания речных вод были использованы данные спутников «Terra» (видимый диапазон, радиометр MODIS, разрешение 250 м), NOAA (ИК-диапазон, радиометр AVHRR, пространственное разрешение 1 км), ERS-2 (радар с синтетической апертурой, разрешение около 20 м) и МСУ-Э.

На **рисунке 4** показан радиолокационный снимок устья Амура и видимый снимок высокого разрешения, полученный для этого района. Устье Амура расположено в правой части каждого из рисунков. При распространении речных вод из устьевой зоны в сторону моря формируются так называемые сдвиговые фронты. Это наиболее распространенный тип эстуарийных фронтов. Фронты связаны со сдвигом скорости на границе между речными и распресненными водами и часто сопровождаются контрастами мутности (цвета) и slickами. Поэтому снимки высокого разрешения позволяют проследить распространение речных вод непосредственно вблизи устья Амура. Несмотря на то, что изображения получены при помощи различных методов дистанционного зондирования и в разное время (т. е. при различных значениях стока и ветровых условиях), оба снимка показывают, что основные фронты были связаны с навигационными фарватерами. Речной сток (более мутные воды, ограниченные стоковыми фронтами) распределяется по трем основным фарватерам: Южному, Восточному и Северному (Невельского). На некотором расстоянии от устья речные воды «растекаются» над более солеными водами лимана. Перемешивание речных и осолоненных вод определяется волнами, ветром и приливными течениями.



**Рис. 4.** Радиолокационное (а) и видимое (б) изображения устьевое участка реки Амур, полученные 9 июня 2000 г. (ERS-2 SAR) и 20 июня 1989 г. (МСУ-Э)

Серия снимков в ИК-диапазоне (радиометр AVHRR, спутники серии NOAA, **рис. 5**) показывает, что в пределах лимана наиболее теплыми были воды, непосредственно связанные со стоком реки Амур. Теплые речные воды от устья распространялись в северном направлении до выхода из лимана в Сахалинский залив по Северному фарватеру. Известно, что на узком и мелководном Северном фарватере наблюдаются наиболее пресные воды (Лобанова, 1987). Вторая теплая и распресненная зона была связана со стоком речных вод по Восточному и Южному фарватерам и располагалась вблизи южного участка устья. В летний период на последние два фарватера приходится  $\frac{3}{4}$  стока реки Амур (Якунин, 1978). Мы определили эти две области, непосредственно прилегающие к устью Амура, как зону прямого влияния речного стока.



*Рис. 5. Спутниковые ИК-изображения Амурского лимана, полученные при помощи радиометра AVHRR в 2005 г. Дата и время указаны на каждом из снимков*

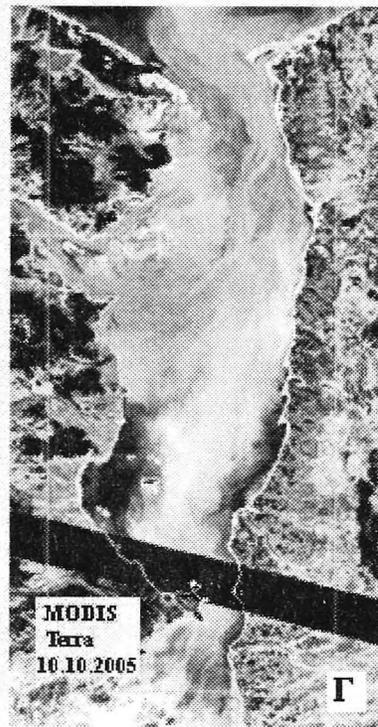
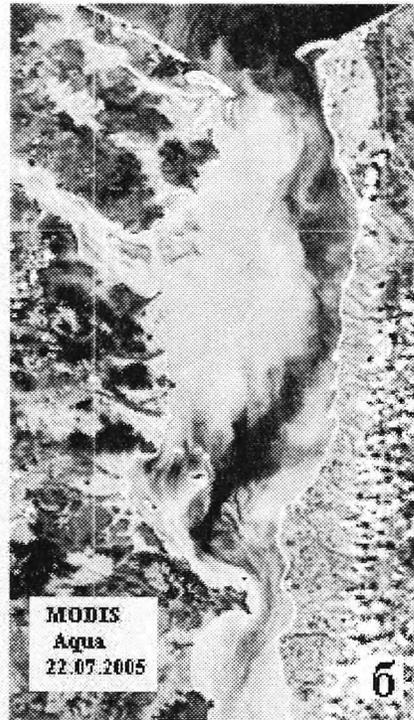
Более холодные воды поступали в Амурский лиман из Японского моря через пролив Невельского. Эти воды занимали юго-восточную часть лимана и проследовали до выхода из лимана в Охотское море. Таким образом, как и по гидрологическим данным, в пределах лимана можно выделить две основные структурные зоны, разделенные фронтом, – теплые воды северо-западной части лимана и модифицированные япономорские воды. В начале лета (июнь) фронт был связан с Южным и Сахалинским фарватерами, которые соединяют Японское и Охотское моря.

Можно ожидать, что размеры и положение зоны прямого влияния речного стока изменяются в сезонном цикле в зависимости от величины речного стока и средней циркуляции, связанной с сезонной изменчивостью фоновых уровней между Японским и Охотским морями. Максимальные значения стока Амура наблюдаются в летние месяцы (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998). Весенне-летний паводок (май – начало июня) связан в основном с таянием снега в области водосбора реки. Этот паводок меньше, по сравнению с летним паводком, вызванным муссонными дождями (август–сентябрь). Однако, по спутниковым данным, площадь зоны прямого влияния речного стока была наибольшей во время весенне-летнего паводка, т. е. в период, когда разность фоновых уровней только начинает увеличиваться. Увеличение притока вод в летнее время ведет к локализации зоны прямого влияния речного стока около устья реки. Осеннее охлаждение приводит к постепенному выравниванию термических контрастов в Амурском лимане и дальнейшему уменьшению площади зоны прямого влияния речного стока.

Контрасты мутности на спутниковых изображениях, полученных в видимом диапазоне (радиометр MODIS, спутники Terra и Aqua), дают дополнительную информацию о распространении речных вод в Амурском лимане.

Мутные воды наблюдались в зоне прямого влияния речного стока, связанной с устьем реки Амур. В южной части лимана у побережья острова Сахалин наблюдались менее мутные воды, поступающие по южному фарватеру из Татарского пролива через пролив Невельского. Зона максимальных контрастов мутности (фронт мутности) в первую половину лета (**рис. 6а, б**) была непосредственно связана с Южным и Сахалинским фарватерами. В августе (**рис. 6в**) фронт сместился в северном направлении и его положение было связано только с Сахалинским фарватером. Южная часть лимана была заполнена менее мутными водами. На отдельных видимых изображениях (например, 10 июля 2005 г., не показан) было отмечено незначительное поступление более мутных вод из лимана в Японское море вдоль побережья материка. По данным прямых измерений течений небольшой продолжительности в проливе Невельского (Якунин, 1978), перенос вод в южном направлении наблюдался в поверхностном слое западной части пролива (т. е. у побережья материка).

Осенью (август–октябрь) увеличивается повторяемость северных и северо-западных ветров, которые приводят к нагонам воды в Амурский лиман (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1998). Штормовые нагоны существенно влияют на циркуляцию вод в лимане. Течения в поверхностном слое во время нагонов направлены на юг, что приводит к смещению зоны мутности в южном направлении (**рис. 6г**). Повышение уровня моря в лимане во время штормовых нагонов приводит к тому, что распресненные воды из лимана через пролив Невельского поступают в Японское море. В целом, спутниковые изображения в видимом и в инфракрасном диапазоне хорошо согласуются между собой и с данными гидрологических наблюдений.



*Рис. 6. Спутниковые снимки Амурского лимана в видимом диапазоне спектра, полученные со спутников Terra и Aqua в 2005 г. Дата указана на каждом из снимков*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ гидрологических и спутниковых данных показал, что в пределах Амурского лимана выделяются две основные структурные зоны – перемешанная (южная часть лимана) и стратифицированная (северная часть лимана). Стратификация в северной части лимана формируется как за счет поступления охотоморских вод в придонном слое (солевой клин), так и за счет интрузии модифицированных япономорских вод из южной части лимана. В зоне прямого влияния стока реки Амур стратификация ослаблена и вся толща вод существенно распреснена. Основные структурные зоны разделены термическим фронтом и фронтом мутности, которые отчетливо прослеживаются на спутниковых изображениях. Гидрологические разрезы построены при помощи программы ODV (Schlitzer R., Ocean-Data-View, <http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV>). Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН 09 III C 07 316.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гидрометеорология** и гидрохимия морей / Под ред. Ф. С. Терзиева. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1998. – Т. IX Охотское море. Вып. 1 Гидромет. условия. – 343 с. – (Проект «Моря»).
2. Изменчивость гидрохимических и гидрологических параметров вблизи устья реки Амур / **И. А. Жабин, Л. Н. Пропп, Т. И. Волкова, П. Я. Тищенко** // *Океанология*. – 2005. – Т. 45, № 5. – С. 703–709.
3. Особенности структуры зоны смешения речных и морских вод вблизи устья реки Амур по данным спутниковых и гидрологических наблюдений / **И. А. Жабин, В. А. Дубина, Д. А. Некрасов, О. В. Дударев** // *Исслед. Земли из космоса*. – 2007. – № 5. – С. 61–70.
4. **Козловский, В. Б.** Некоторые особенности динамики вод устьевой области Амура / В. Б. Козловский // *Тр. ГОИН*. – 1978. – Вып. 142. – С. 93–99.
5. **Лобанова, Н. И.** Общая характеристика зоны смешения устьевой области Амура / Н. И. Лобанова // *Тр. ДВНИИ*. – 1987. – Вып. 130. – С. 33–44.
6. **Лоция** Японского моря. Татарский пролив с Амурским лиманом и проливом Лапеуза. – ГУНиО МО. – 1959. – Ч. 2. – 293 с.
7. **Пономарева, Т. Г.** Морские устья рек Северо-Восточного региона Дальнего Востока [Электронный ресурс] / Т. Г. Пономарева. – Режим доступа: <http://www.dvgu.ru/meteo/Intra/PonomLect.html>
8. Ростов, И. Д. Гидрологические особенности приустьевой области р. Амур / **И. Д. Ростов, И. А. Жабин** // *Метеорология и гидрология*. – 1991. – № 7. – С. 94–99.
9. **Соловьев, И. А.** Амуро-лиманский русловой процесс и водные пути / И. А. Соловьев. – Владивосток : ДВО РАН, 1994. – 272 с.
10. **Якунин, Л. П.** Распределение речного стока по фарватерам устья Амура / Л. П. Якунин // *Тр. ДВНИГМИ*. – 1978. – Вып. 71. – С. 162–168.
11. Talley L. D. The Okhotsk Sea and Oyashio region / **L. D. Talley, Y. Nagata** // *PICES Sci. Rep.* – 1995. – Vol. 2. – P. 1–227.