

Возможности спутникового дистанционного зондирования для характеристики условий обитания бурых водорослей

И.Л. Цыпышева, Т.Н. Крупнова

Тихоокеанский научно-исследовательский рыболово-промышленный центр (ТИНРО-Центр)
690950, г. Владивосток, переулок Шевченко, 4
E-mail: tsypysheva@tinro.ru

Приводятся результаты использования спутникового дистанционного зондирования для получения характеристики условий обитания промысловой бурой водоросли ламинарии японской (*Laminaria japonica*) в северо-западной части Японского моря. На основе регулярных спутниковых данных инфракрасного диапазона сенсора AVHRR спутника NOAA анализируются термические условия в осенний период за последние десять лет с целью определения благоприятных условий для размножения ламинарии. Дополнительно использовались спутниковые данные оптического диапазона, судовые измерения и карты погоды. Рассмотрены гидрологические условия 2000 года, аномальные океанографические события которого привели к значительному снижению запасов ламинарии в последующие годы. Проведено сравнение спутниковых карт температуры поверхности моря с данными контактных наблюдений. Исследована структура поля температуры в прибрежной зоне по спутниковым данным, которые позволили выделить мелкомасштабные нестационарные образования (циклонические и антициклонические вихри, струи, гибовидные течения), способствующие созданию микроклиматов для роста водорослей.

Ключевые слова: северо-западная часть Японского моря, спутниковое дистанционное зондирование, температура поверхности моря, мелкомасштабные вихри, бурые водоросли, ламинария японская, *Laminaria japonica*.

Введение

Бурые водоросли в прибрежных водах северного Приморья (северо-западная часть Японского моря) произрастают в районе распространения Приморского течения, которое характеризуется высокой гидродинамической нестабильностью. Детальных представлений о сезонной изменчивости этого течения, формировании микроструктуры водной массы непосредственно примыкающей к берегу, т.е. к зоне обитания водорослей, до сих пор не достаточно, что затрудняет прогнозирование динамики их запасов.

Такие факторы среды, как соленость, освещенность, наличие питательных элементов и динамика течений, являются важными характеристиками для роста водорослей. Для развития их ранних стадий, являющихся основой закладки будущего урожая, определяющим фактором является температура воды. Отклонение значений температуры воды от оптимума (для ламинарии японской диапазон температуры размножения – от 15 до 8°C) и резкие ее перепады оказывается на длительности ранних стадий развития, а также являются причиной повышенной смертности зооспор и гаметофитов (Крупнова, 2004). В последние годы контактные измерения условий среды с научно-исследовательских судов в районе северного Приморья были ограничены, в связи с чем изучение динамики изменчивости водных масс с помощью данных дистанционного зондирования является актуальным.

В данной работе на основе анализа спутниковых изображений проводится исследование термических условий в осенний период за последние десять лет. Также анализируются гидрологические условия 2000 года в северной части Приморья по спутниковым и другим данным, чтобы выяснить, какие факторы среды обусловили значительное снижение запасов ламинарии японской в последующие годы.

Материалы и методика

В работе был использован архив данных сканера AVHRR спутников серии NOAA в инфракрасном диапазоне спектра. Информация получена и обработана в Центре Спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН. В настоящее время пять действующих спутников перекрывают пространственно неоднократно за сутки исследуемый район, что позволяет получить достоверные первичные данные.

Дополнительно использовались спутниковые данные оптического диапазона, судовые измерения и карты погоды:

- распределение концентрации хлорофилла-а, коэффициент обратного рассеивания – данные сканера SeaWiFS с сайта: <http://reason.gsfc.nasa.gov/>;
- распределение концентрации хлорофилла-а – данные сканера MODIS/ Aqua (Центр Спутникового Мониторинга ИАПУ ДВО РАН);
- карты приземного давления с сайта японского метеорологического агентства (JMA): <http://www.jmocwx.com/>.

В программе Glance1.71 (разработанной в ИАПУ ДВО РАН) путем подбора гистограмм рассматривались инфракрасные изображения в различных диапазонах температуры, при этом визуализировались поверхностные проявления вихревых структур, по которым путем наложения снимков составлялась карта-схема структуры поверхности воды. Оценка атмосферных процессов производилась при помощи карт погоды, «чистая» морская вода определялась при анализе альбедо (телеизионный канал сканера AVHRR/NOAA).

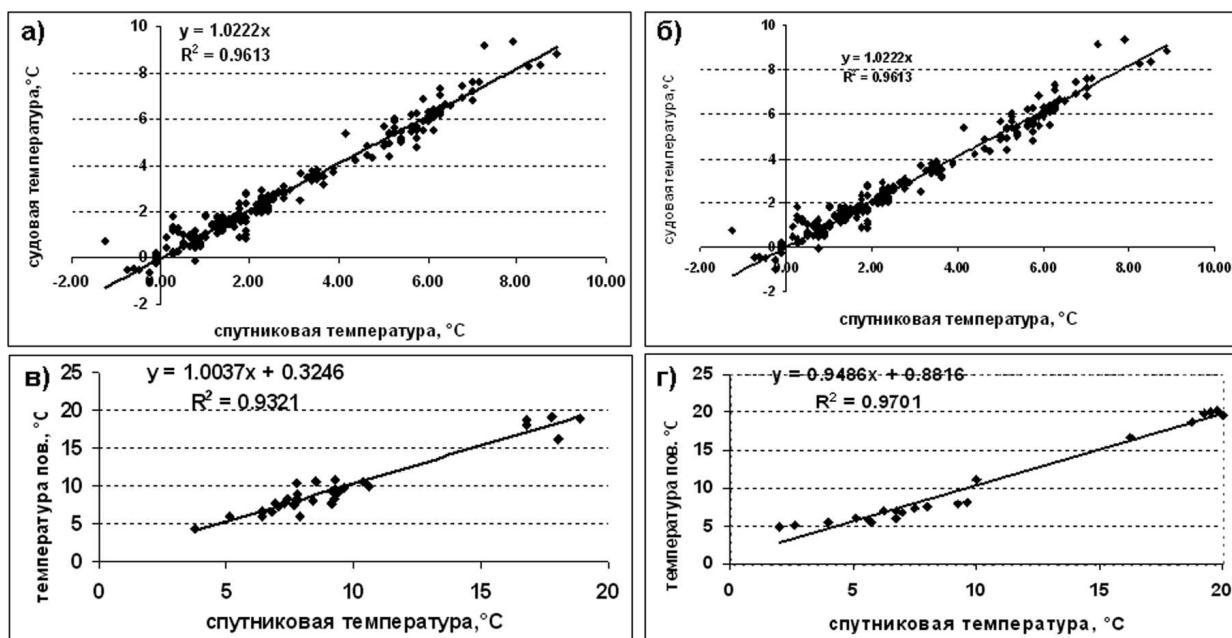


Рис. 1. Сравнительный анализ контактных судовых (а, б), стационарных прибрежных (в, г) и спутниковых измерений температуры поверхности морской воды
а) 17.09.1998 г.; б) 16.09.1999 г.; в) 7.09.2000 г.

Сравнение инструментальных и спутниковых данных по температуре воды

Инструментальные судовые измерения температуры поверхности моря (ТПМ) (материалы океанографических съемок НИС ТИНРО-Центра в 2008 и 2009 гг.) и стационарные

измерения ТПМ с береговых пунктов в местах произрастания ламинарии, показали хорошее согласование с ТПМ, восстановленной по данным AVHRR по алгоритму, разработанному в ИАПУ ДВО РАН. Построенные графики корреляции показали их высокую достоверность (рис. 1), что позволяет использовать спутниковые данные для получения характеристики температуры воды в районе обитания водорослей и определять длительность благоприятных периодов для размножения. Сравнение данных производилось по результатам экспедиции в мористой части (рис. 1а), вблизи берега (рис. 1б) и измерениями ТПМ в двух бухтах (рис. 1в, г).

Экстремальные гидрометеорологические явления в 2000 году

В настоящее время запасы ламинарии сократились в несколько раз. За последнее десятилетие относительно высокий запас этой водоросли наблюдался только в 2000 году. Ламинария японская – холодноводное растение, имеющее в естественных условиях двухгодичный цикл развития. Закладка урожая 2000 года проходила осенью 1998 года, когда наблюдались хорошие условия для размножения (рис. 2а). Ее первогодняя генерация в 1999 году, благодаря холодному лету и осени (рис. 2б), имела хорошие морфометрические характеристики, что способствовало формированию высокоурожайных товарных слоевищ 2000 года.

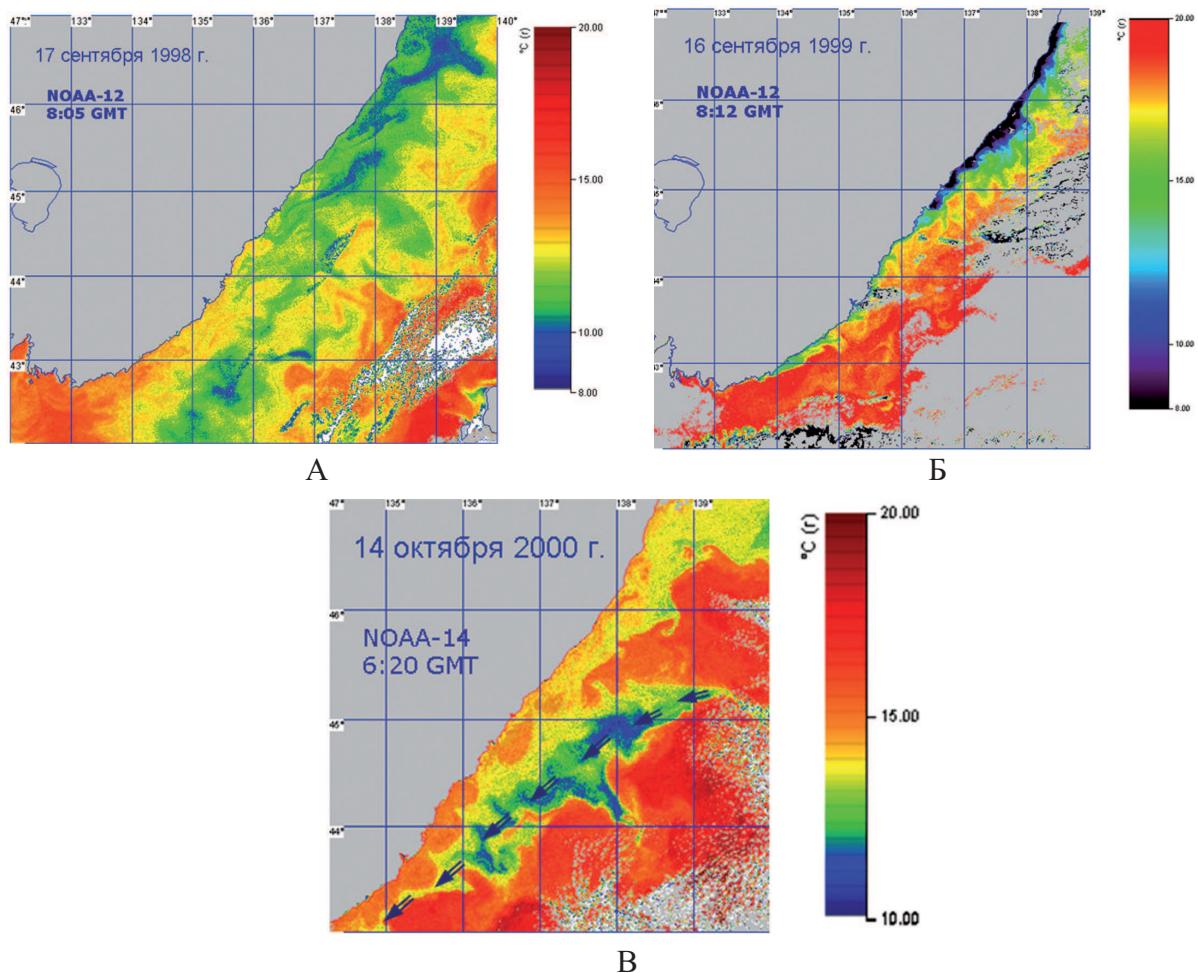


Рис. 2. Пространственное распределение температуры осенью 1998-2000 годов.
Фрагменты ИК-изображений, полученные сканером AVHRR спутников NOAA

Для выяснения причин последующего снижения запасов ламинарии рассмотрено формирование климатических условий 2000 года в северной части Приморья по спутниковым и судовым данным. Спутниковые данные подтвердили контактные измерения в части аномально высокой температуры воды в этот год, прогретой до значений в 18°C, наблюдающейся с августа до середины октября, в то время как в благоприятные годы в это время температура воды плавно снижается от 15 до 8°C. Анализ последовательных спутниковых изображений показал, что возможной причиной длительного периода повышенных температур явилось то, что Приморское течение, доставляющее холодную воду в прибрежные районы, в 2000 г. проходило вдали от берега, что проявилось на инфракрасных снимках (рис. 2в).

В северном районе сказывалось влияние теплых вихревых систем, идущих от северной ветви Цусимского течения (рис. 3а). Глубокий циклон 18 октября (рис. 3б) вызвал апвеллинг на всем побережье Приморья, только после чего температура в прибрежном слое резко понизилась до 8-5°C.

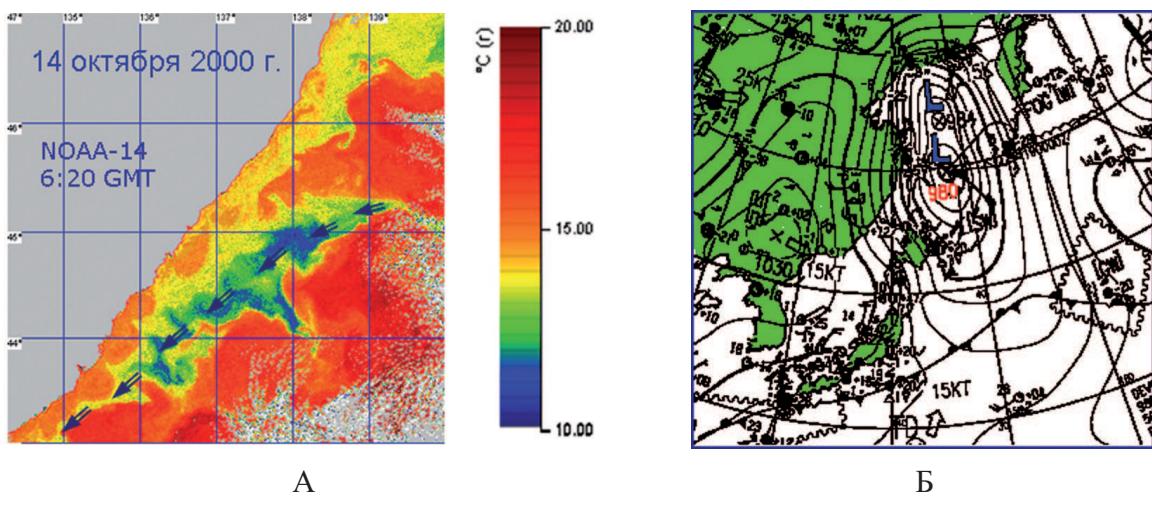


Рис. 3. Климатические условия в середине октября 2000 г.

а) Фрагмент ИК-изображения, полученное сканером AVHRR спутника NOAA 14.10.2000 г. (стрелками обозначено примерное положение Приморского течения); б) Карта приземного давления за 18 октября 2000 г. (JMA)

Карты фактической погоды показали, что одной из причин высокой аномальной температуры в конце лета и осенью могли быть также теплые воздушные массы, принесенные тайфунами (тропическими циклонами). Только за период с июля по сентябрь по исследуемому району прошло четыре тайфуна. Тайфуны и циклоны принесли на побережье ливневые дожди, что вызвало усиленный сток прибрежных рек и значительное распреснение в зоне обитания водорослей. Судовые данные показали пониженную соленость в данном районе. На отдельных участках побережья соленость достигала 18 е.п.с. Прозрачность воды не превышала 1-2 м (обычно – 18-20 м) за счет привносимых стоком рек почвенных компонентов, это привело к созданию пониженной освещенности, что негативно сказалось на процессах роста водорослей (Halpern, Cottenie, 2007).

Дополнительно к контактным измерениям, спутниковые карты распределения концентрации хлорофилла-а и мутности воды (по данным спутникового сканера цвета морской воды SeaWiFS) показали в 2000 году более высокие значения этих параметров по сравнению с 1998 и 1999 гг.

Неблагоприятные условия осенью 2000 г. в виде высокой температуры воды, пониженной солености и прозрачности привели к разрушению большей части маточных слоевиц ламинарии, которые не смогли дать полноценное потомство на следующий год и что, затем, явилось одной из главных причин многолетнего снижения запасов этой водоросли.

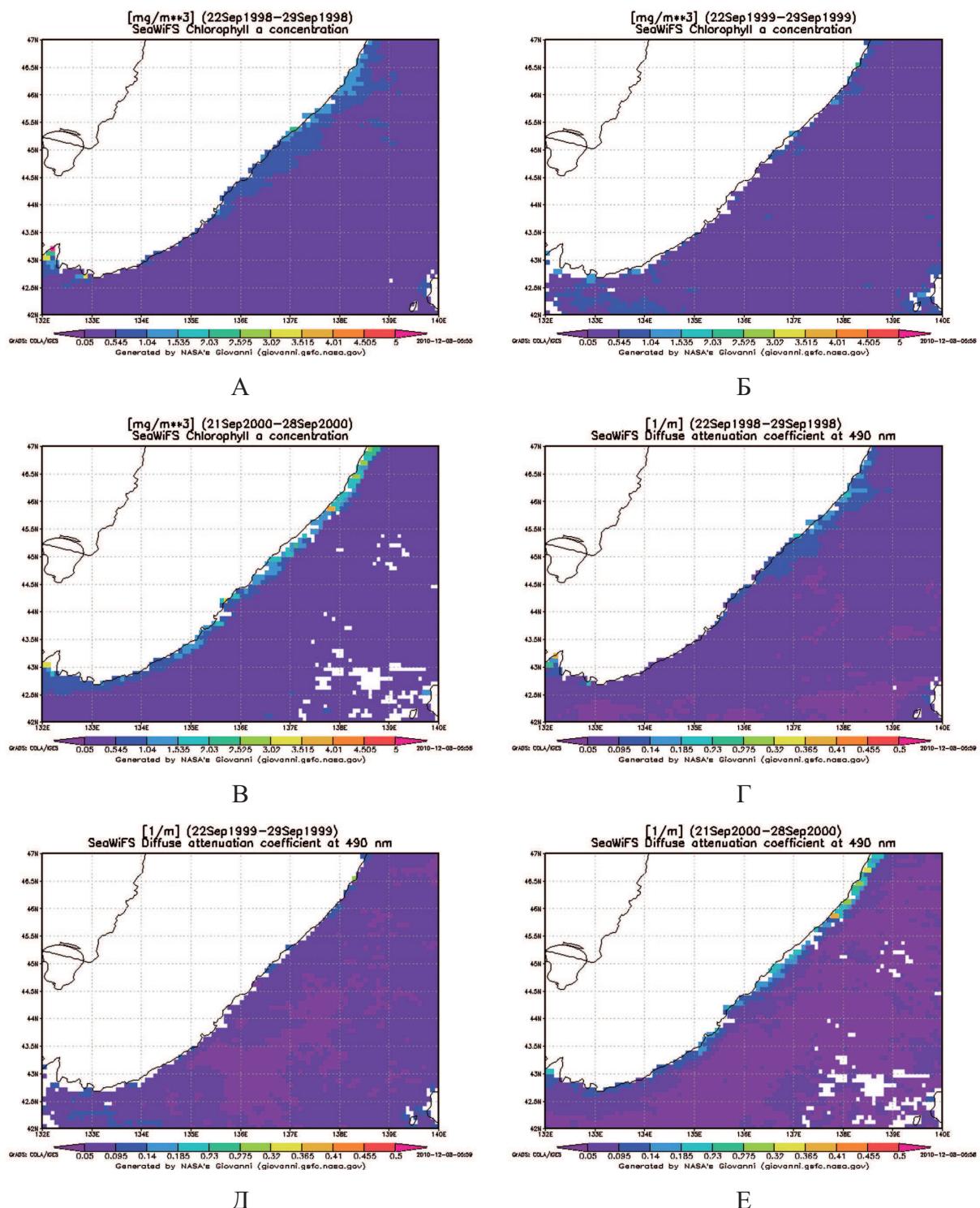
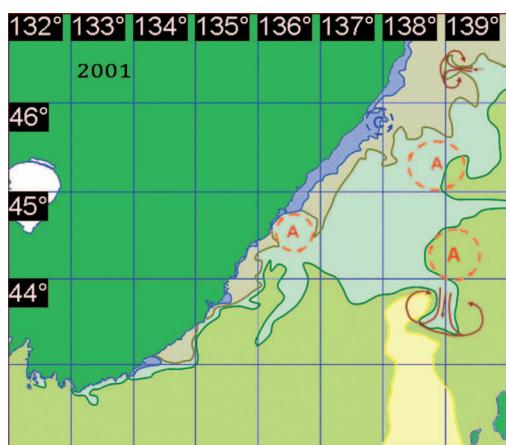


Рис. 4. Пространственное распределение концентрации хлорофилла-а (а, б, в) и коэффициента обратного рассеяния (г, д, е) по данным сканера SeaWiFS в 1999-2000 гг.
(<http://reason.gsfc.nasa.gov>)

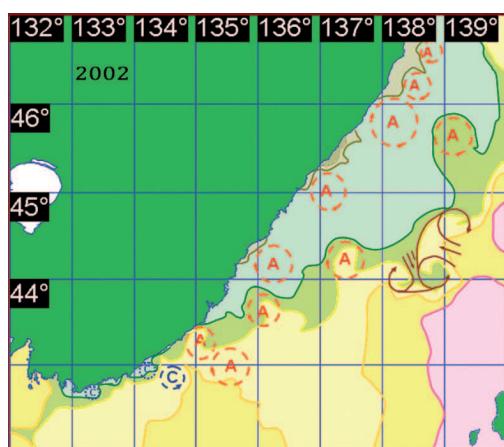
Гидрологические условия в осенний период 2001-2009 гг.

Для оценки благоприятного периода для размножения ламинарии и восстановления ее запасов проанализированы гидрологические условия осенних периодов за последние десять лет. При сравнительном анализе пространственного распределения температуры воды на ИК изображениях отмечается, что самым холодным был 2001 год (рис. 5а). После апвеллинга, вызванного осенним муссоном, температура в прибрежных водах в конце сентября резко понизилась до 5°C. Период оптимальных температур для размножения ламинарии составил всего 5 дней, в то время как в благоприятные годы он доходит до 40 дней, в связи с чем в этот год смогло реализоваться (выйти из маточных слоевищ и развиться в молодые спорофиты) минимальное количество зооспор (Крупнова, Турабжанова, 2006). К тому же на значительной части прибрежья наблюдалось ограниченное количество маточных слоевищ, оставшихся после их массового разрушения в 2000 году. Все это обусловило малочисленное неурожайное поколение в 2003 году. Таким образом, в дополнение к 2000 году, 2001 год (рис. 5а) также был неблагоприятным для воспроизведения ламинарии как аномально холодный.

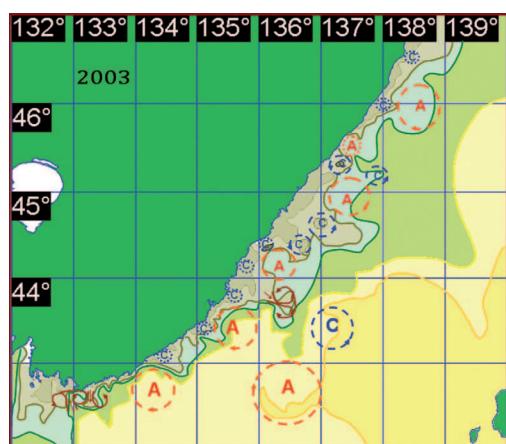
Примерно такая ситуация наблюдалась и в 2008 году (рис. 5з). Однако если на снимке 2001 года показана температура, установившаяся после апвеллинга на стабильно низком уровне, на снимке 2008 г. показан процесс релаксации апвеллинга. В октябре наблюдались кратковременные повышения значений температуры морской воды до 8°C и выше, что также замедляет развитие зооспор. Таким образом, не очень благоприятные климатические условия 2008 года привели к незначительному урожаю 2010 г.



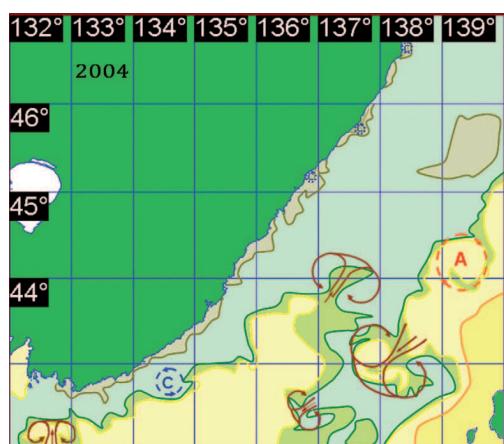
А



Б



В



Г

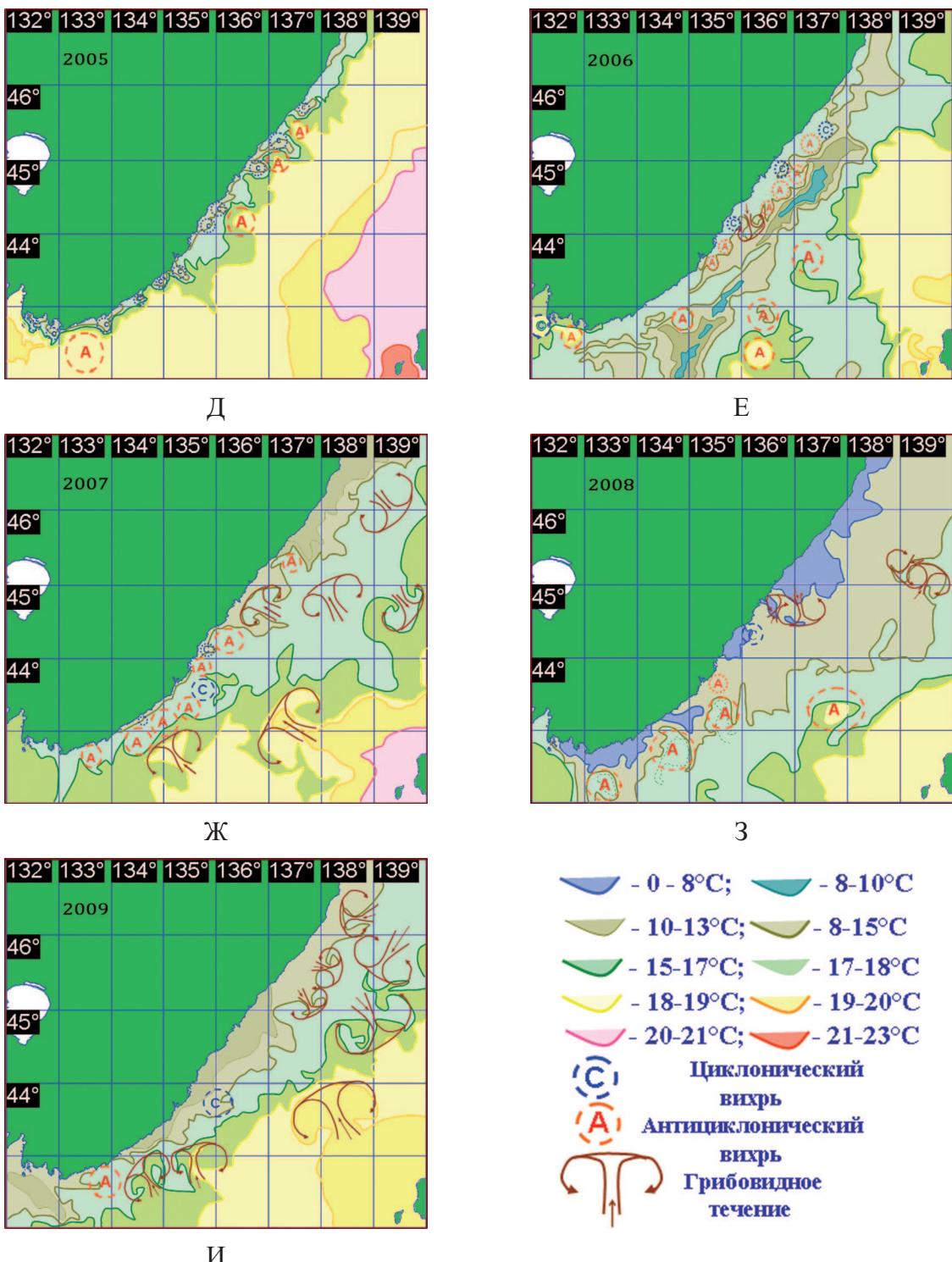


Рис. 5. Карты-схемы поверхности структуры в поле температуры в водах северного Приморья в конце сентября 2001-2009 гг.

а) 2001 г.; б) 2002 г.; в) 2003 г.; г) 2004 г.; д) 2005 г.; е) 2006 г.; ж) 2007 г.; з) 2008 г.; и) 2009 г.

Из региональных особенностей горизонтального распределения температуры в осенний период следует отметить зоны апвеллинга, вихревые образования в прибрежной зоне, обусловленные муссонной сменой ветров, которая приурочена именно к этому промежутку времени. По результатам исследований поверхностных проявлений динамики моря в прибрежной зоне в поле температуры удалось идентифицировать прибрежные мелкомасштабные циклонические (15-50 км в диаметре) и антициклонические (20-52 км

в диаметре) вихри, а также струи и гибовидные течения, которые влияют на процесс перемешивания и циркуляцию прибрежных вод. Структуры гибовидных течений были «видимы» благодаря наличию на поверхности моря температурного контраста. Составлены предварительные карты-схемы структуры вод для последних декад сентября за девятилетний период (рис. 5).

Летом с усилением южного муссона мощность Приморского течения ослабевает (Юрасов, Яричин, 1991), поэтому и осенью в верхнем слое моря оно выражено слабо. Лишь в 2006 году (рис. 5е) наблюдались на поверхности моря границы холодного Приморского течения. В стрежне течения температура воды была 10-13°C, в то время как в окружающих более теплых водах – 15-16°C.

Формирование прибрежных мелкомасштабных вихрей способствует созданию «микроклиматов» в зоне обитания водорослей и отражается на их морфометрических и репродуктивных показателях, что объясняется созданием разнородных условий, как по температуре, так и по биогенному составу. В связи с этим становится понятным наличие значительных отличий по длине и массе слоевищ ламинарии, произрастающей практически в рядом расположенных поселениях.

Гидрологические условия в сентябре-октябре 2010 года

Как показал анализ спутниковых карт, поверхностный слой водных масс ярче всего выражен в штилевую погоду при слабых и умеренных ветрах (1-4 балла). Однако осенью 2010 года таких дней не наблюдалось. Воздушные потоки характеризовались неустойчивостью, вызывая сгонно-нагонные явления в прибрежной полосе. На приведенных ниже картах-схемах отражена структура поверхностных вод во время релаксации апвеллинга или после нагона (рис. 6-7). Так, после действия сгонных ветров, 5 сентября на участке среднего прибрежья Приморья наблюдалось резкое понижение температуры воды (рис. 6а), вызванное подъемом вод из глубины. Для второй декады сентября характерны нагоны теплых вод в южной части района. На карте-схеме (рис. 6б) северная часть района находилась под воздействием северо-восточного ветра, поверхность моря имела довольно однородную структуру. На участке ниже 44° с. ш. наблюдалась цепочка антициклонических вихрей, а южнее виден выход вод Приморского течения на поверхность. 25 сентября (рис. 6в) в южной части исследуемого района близ побережья находились квазистационарные антициклонические вихри. В мористой части визуализировались струйные течения субарктических вод с антициклоническими вихрями на конце. В северной части (45°30'-46° с. ш.) наблюдалась компактная «упаковка» гибовидных течений. Такие компактные «упаковки» вихревых диполей проявляются при сложных ситуациях с несколькими разнонаправленными воздействиями, в которых соседние гибовидные структуры имеют по одному общему вихрю (Федоров, Гинзбург, 1988). Диаметр «шляпки» вихря от берега составлял 81 км, диаметр меньшего «гриба» справа – 38 км.

В начале октября наблюдались участки холодных апвеллинговых вод длиной 50-60 км вблизи побережья (рис. 7а). Структуры гибовидных течений визуализировались на изображениях инфракрасного диапазона (по контрасту температур), а также на изображениях оптического диапазона (рис. 7б) в поле концентрации хлорофилла-а (параметра, характеризующего различие трансформированных апвеллинговых вод

и вод субтропического происхождения, бедных биогенами). В середине октября в южной части района наблюдалось чередование мелкомасштабных антициклонических и циклонических вихрей. На некоторых небольших участках побережья вода охладилась ниже 8°C (рис. 7в).

На карте-схеме (рис. 7г) отображена ситуация при развитии апвеллинга, вызванного воздействием сильных северо-западных ветров. После апвеллинга была разрушена стратификация морской воды, по всему побережью установилась температура 4-5 °С.

Для большинства районов побережья диапазон благоприятных температур для размножения ламинарии по спутниковой информации был длительным и составлял 41-43 дня, что является залогом хорошего урожая в 2012 в тех местах, где сохранились плотные заросли маточных слоевищ этой водоросли.

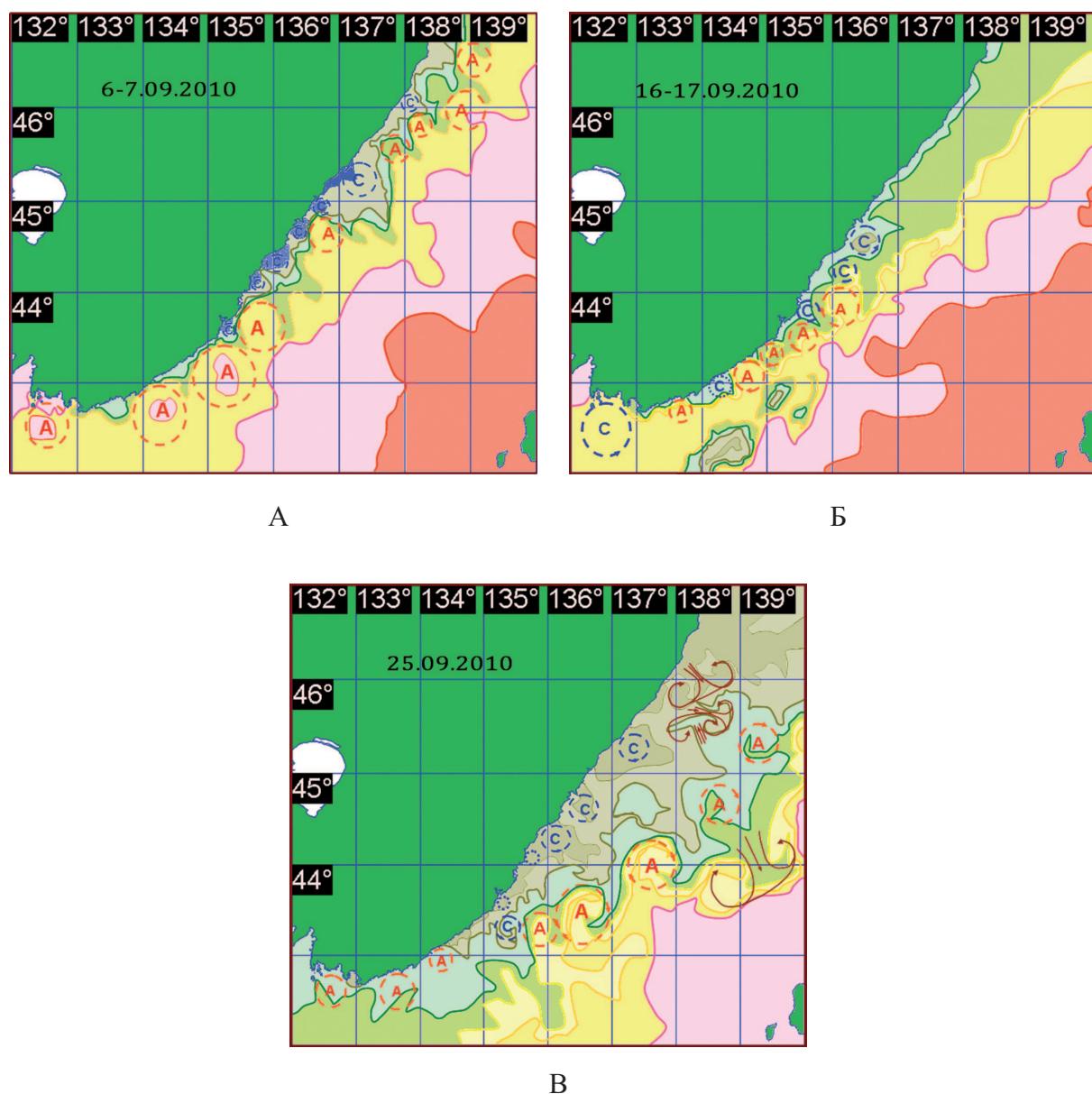


Рис. 6. Карты-схемы поверхностной структуры в поле температуры в водах северного Приморья в сентябре 2010 г.

а) 6-7.09.2010 г.; б) 16-17.09.2010 г.; в) 25.09.2010 г. (обозначения на рисунке 5)

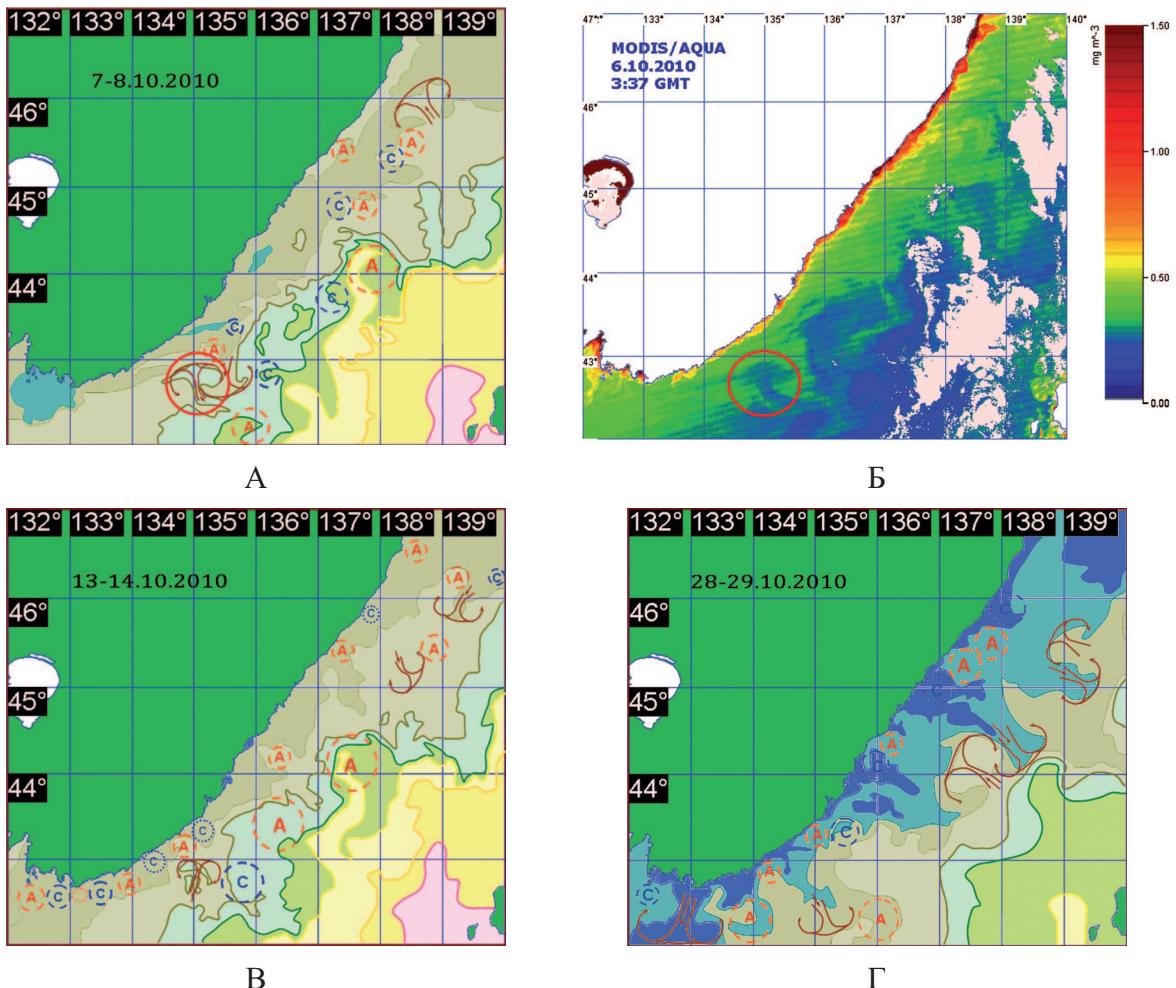


Рис. 7. Карты-схемы поверхности структуры в поле температуры в водах северного Приморья в октябре 2010 г.

а) 7-8.10.2010 г.; б) распределение хлорофилла-а 6.10.2010 г. (MODIS/AQUA); в) 13-14.10.2010 г.; г) 28-29.10.2010 г. (обозначения на рисунке 5)

Выводы

Сравнение спутниковых данных по температуре воды и измеренных инструментальным путем показали их высокую достоверность, что позволяет использовать для получений условий обитания водорослей спутниковые данные как более мобильные.

Спутниковые данные позволили определить создавшиеся в прибрежной зоне Приморья неблагоприятные условия среды в 2000 году (аномально высокая температура, пониженная соленость и прозрачность воды), что обусловило последующие неурожайные поколения ламинарии японской из-за практически полного разрушения ее маточных слоевищ.

Методика спутникового сканирования позволяет обнаружить существование прибрежных мелкомасштабных циклонических (15-50 км в диаметре) и антициклонических (20-52 км в диаметре) вихрей, струй и гибридных течений, которые влияют на процесс перемешивания и циркуляции прибрежных вод. Создается возможность проследить условия формирования микроклимата с различными гидрологическими характеристиками, влияющими на рост и воспроизведение ламинарии.

Таким образом, данные дистанционного зондирования могут быть использованы для прогнозирования динамики запасов ламинарии, а также и для получения оперативной информацию по оценке состояния ее полей.

Литература

1. Крупнова Т.Н. Влияние океанолого-климатических факторов на динамику полей ламинарии японской (*Laminaria japonica*) в северо-западной части Японского моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 2. СПб. Гидрометеоиздат, 2004. С. 162-166.
2. Крупнова Т.Н., Турабжанова И.С. Выращивание ламинарии японской (*Laminaria japonica*) донным способом в северном Приморье // Материалы международной научно-практической конференции «Экологические проблемы использования прибрежных морских акваторий», Владивосток, 2006. С. 120-122.
3. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.
4. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1991. 176 с.
5. Halpern B, Cottenie K. Little evidence for climate effects on local-scale structure and dynamics of California kelp forest communities // Global Change Biology. 2007. Vol. 13, Issue 1, P. 236–251.

Satellite remote sensing possibilities for the determination of the brown algae inhabiting conditions

I.L. Tsypysheva, T.N. Krupnova

Pacific Scientific Research Fisheries Centre (TINRO-centre)
4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690950, Russia
E-mail: tsypysheva@tinro.ru

Results of using the satellite remote sensing are given for obtaining the conditions determination of the commercial brown alga *Laminaria japonica* inhabiting in the northwestern portion of the Japan (East) Sea. On the basis of regular satellite data (the infrared region of the sensor AVHRR/NOAA) thermal conditions in the autumn period in the last ten years are analyzed to determine favorable conditions for multiplying laminaria. Additionally satellite data of optical range, ship measurements and weather maps were used. The hydrological 2000 conditions are examined; the anomalous oceanographic events led to significant reduction in the reserves of laminaria during the subsequent years. The comparison between satellite sea surface temperature maps and contact observations data is carried out. The field temperature structure in the coastal zone according to satellite data is investigated, which made possible to identify the small-scale nonstationary formations (cyclonic and anticyclonic eddies, jet, mushroom-shaped flows), which contribute to the creation of an algae growth microclimates.

Keywords: northwestern portion of the Japan (East) Sea, satellite remote sensing, sea surface temperature, small-scale eddies, brown alga, kelp, seaweed, *Laminaria japonica*.