

25 апреля 2016 г.
КИМР-2016
МГИ, г. Севастополь

Циркуляция Ленгмюра: история перемешивания

Чубаренко Ирина Петровна

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН,
Атлантическое отделение,
г. Калининград

Роберт Броун

англ. *Robert Brown*



Портрет Роберта Броуна
работы **Генри Уильяма Пикерсгилла**
(англ. *Henry William Pickersgill*)

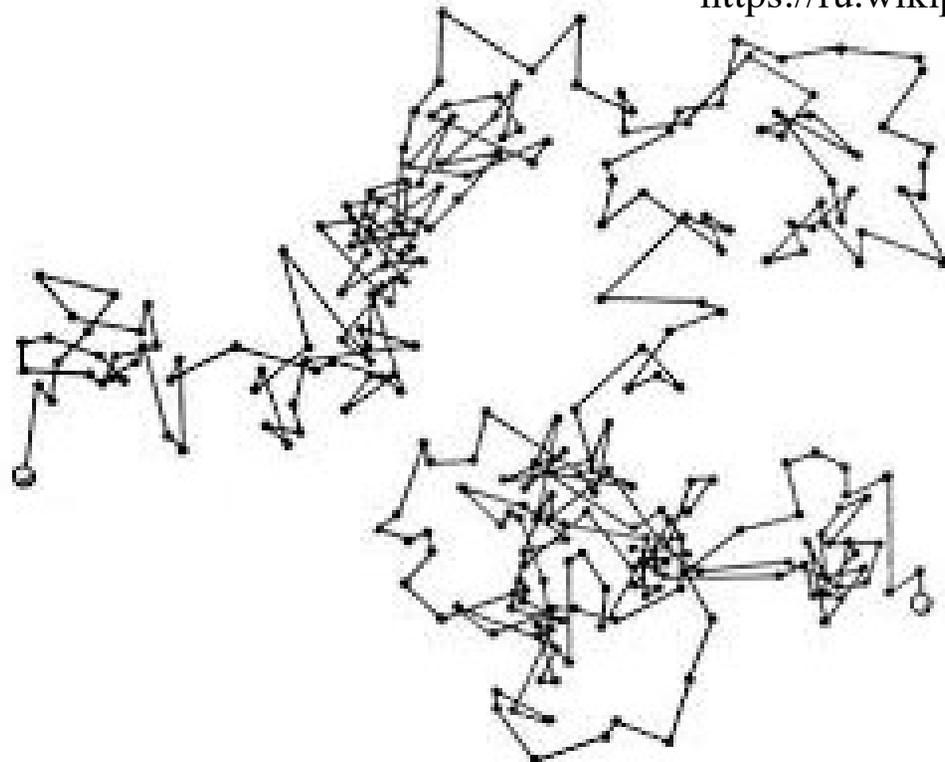
Дата рождения: 21 декабря 1773^[1]
Место рождения: Монтроз, Шотландия
Дата смерти: 10 июня 1857^[1] (83 года)
Место смерти: Лондон, Англия
Страна:  Великобритания
Научная сфера: ботаника, физиология растений
Учёное звание: член-корреспондент СПБАН
Альма-матер: Эдинбургский университет
Научный руководитель: Джозеф Банкс
Известен как: первооткрыватель «броуновского движения», исследователь ядра в

<https://ru.wikipedia.org>

Рóберт Брóун (англ. *Robert Brown*, 1773—1858) — британский (шотландский) ботаник конца XVIII — первой половины XIX века, морфолог и систематик растений



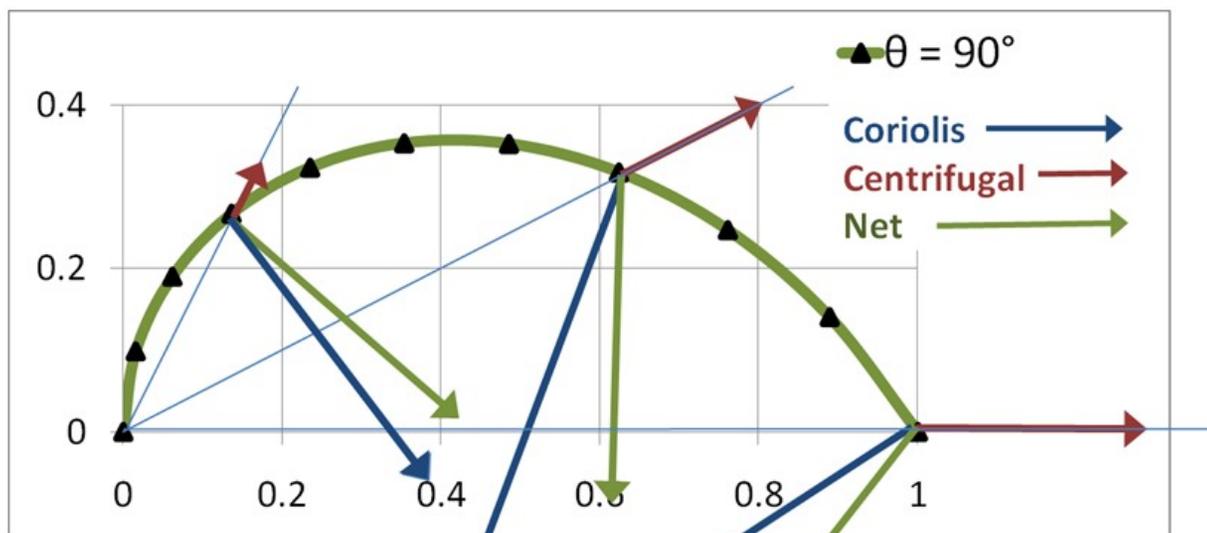
<https://ru.wikipedia.org>



<http://bigmeden.ru>

Гаспа́р-Гюста́в де Кориоли́с

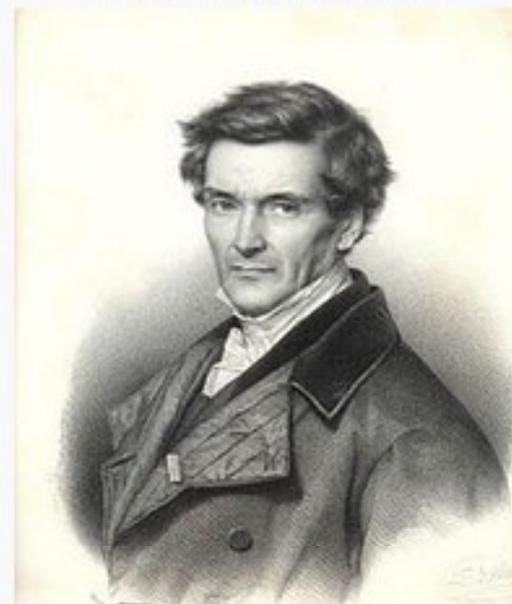
(фр. Gaspard-Gustave de Coriolis;
21 мая 1792 — 19 сентября 1843) —
французский математик, механик и инженер.



en.wikipedia.org

Гаспар-Гюстав Кориолис

Gaspard-Gustave de Coriolis



Дата рождения: 21 мая 1792
Место рождения: Париж, Франция
Дата смерти: 19 сентября 1843 (51 год)
Место смерти: Париж, Франция
Страна:  Франция
Научная сфера: математика, механика
Альма-матер: Политехническая школа
Известен как: автор теоремы Кориолиса, автор понятий «сила Кориолиса» и «ускорение Кориолиса»

<https://ru.wikipedia.org>

Ирвинг Ленгмюр

Irving Langmuir



Дата рождения: 31 января 1881
Место рождения: Бруклин, Нью-Йорк, США
Дата смерти: 16 августа 1957 (76 лет)
Место смерти: Вудс-Хол, Массачусетс, США
Страна: США
Научная сфера: Коллоидная химия
Альма-матер: Институт Пратта
Гёттингенский университет
Научный руководитель: Вальтер Герман Нернст
Известен как: Создатель **изотермы адсорбции Ленгмюра** и крупный исследователь в физико-химии поверхностным явлениям

<https://ru.wikipedia.org>

Ирвинг Ленгмюр (англ. Irving Langmuir)

31 января 1881, Нью-Йорк – 16 августа 1957, Вудс-Хол, Массачусетс) — американский химик, лауреат Нобелевской премии по химии в 1932 «за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений». С 1909 г. – 37 лет работал в General Electric.

Количественно процесс физической мономолекулярной адсорбции в случае, когда межмолекулярным взаимодействием адсорбата можно пренебречь, описывается уравнением Ленгмюра:

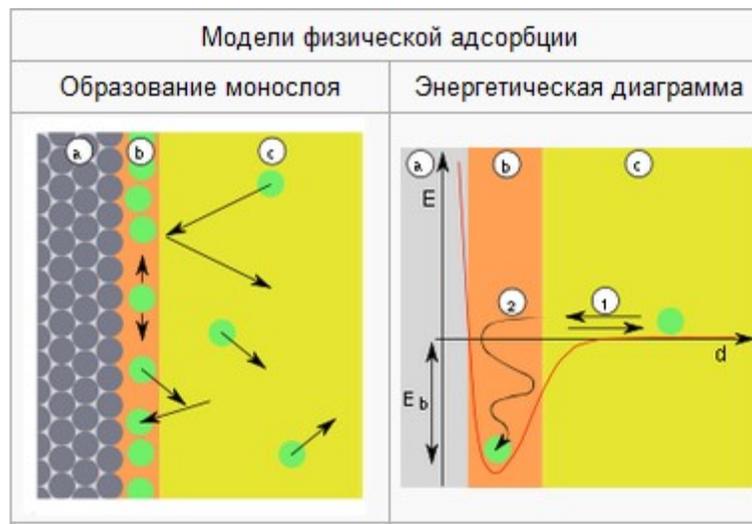
$$\theta = \frac{\alpha \cdot P}{1 + \alpha \cdot P}$$

где θ — доля площади поверхности адсорбента, занятая адсорбатом, α — адсорбционный коэффициент Ленгмюра, а P — концентрация адсорбтива.

Поскольку $[S - P] = \theta$ и, соответственно, $[S^*] = 1 - \theta$, уравнение адсорбционного равновесия может быть записано следующим образом:

$$K = \frac{\theta}{(1 - \theta)P}$$

Уравнение Ленгмюра является одной из форм уравнения изотермы адсорбции.



План:

- 1. «История перемешивания»**
- 2. Теория Крайка и Либовича**
- 3. Данные натуральных наблюдений**
- 4. Роликовые структуры в океане и атмосфере**

Ирвинг Ленгмюр

Irving Langmuir



1. «История перемешивания»

Явление названо в честь Ирвинга Ленгмюра (**Irving Langmuir**), заметившего в **1927** году при пересечении Атлантического океана, что:

-когда скорость ветра превышает 5-10 м/с, саргассовы водоросли выстраиваются в регулярные полосы,

-и если ветер резко меняет направление на 90° , они минут через 20 перестраиваются вслед за ним...

Darss-Zingst Bodden Chain, 2002





Куршский залив

9/8/02 10:25



Lake Constance, 2004

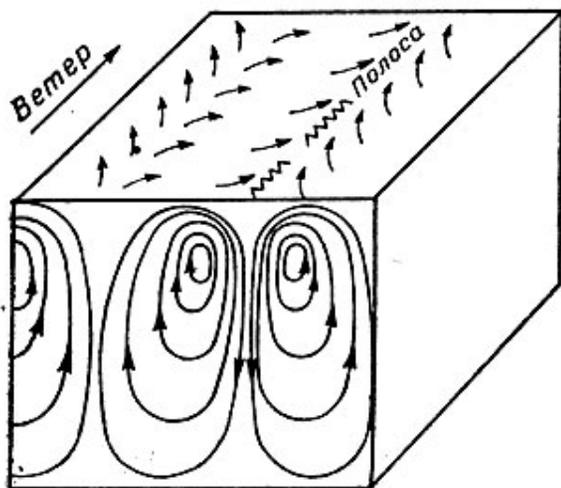
Вислинский залив

27/7/02 11:47

Неудовлетворённый

неполнотой своих первых качественных наблюдений, Ленгмюр провёл более систематические наблюдения в озере Джордж (штат Нью-Йорк, США).

Используя всевозможные трассеры (листья, упавшие на поверхность, пробки, подводные зонтики с лёгкими поплавками, он установил основные черты течения: это горизонтальные вихри — роллы, попеременной закрутки, с осями, направленными вдоль линии действия ветра:



<http://www.underwater.su>

SCIENCE

VOL. 87

FRIDAY, FEBRUARY 11, 1938

No. 2250

Surface Motion of Water Induced by Wind: DR. IRVING LANGMUIR	119	<i>Special Articles:</i> <i>The Treatment of Canine Distemper with a Chemotherapeutic Agent, Sodium Sulfasyl Sulfanilate:</i> DR. A. B. DOCHES and DR. C. A. SLANETA. <i>The Effect of Ligation of the Lumbodrenal Veins on the Course of Experimental Diabetes in Dogs and Cats:</i> J. F. FAZEKAS, PROFESSOR H. E. HIMWICH and DR. S. J. MARTIN. <i>The Liquefaction of Spontaneous Tumors of the Mammary Gland in Mice by Heptyl Aldehyde:</i> DR. LEONELL C. STRONG	142
<i>The American Association for the Advancement of Science:</i> <i>Some Unsolved Problems in Human Adjustment:</i> PROFESSOR A. T. POFFENBERGER	124	<i>Scientific Apparatus and Laboratory Methods:</i> <i>Cleaving Nematode Eggs as Research and Classroom Material:</i> PROFESSOR ALLAN C. SCOTT. <i>A Useful Method for Mounting Insects:</i> D. E. HOWELL	145
<i>Obituary:</i> <i>John Kunkel Small:</i> DR. J. H. BARNHART. <i>Leo D. Whitney:</i> PROFESSOR B. A. MADSON. <i>Recent Deaths</i>	129	<i>Science News</i>	7
<i>Scientific Events:</i> <i>Research on Chronic Diseases at Welfare Island;</i> <i>The Sigma Xi Lecture Series at Yale University;</i> <i>Officers of the Washington Academy of Sciences;</i> <i>Awards of the American Society of Civil Engineers;</i> <i>Awards of the American Institute, New York City;</i> <i>The Southwestern Division of the American Association for the Advancement of Science</i> ...	131	SCIENCE: A Weekly Journal devoted to the Advancement of Science, edited by J. McKEEN CATTELL and published every Friday by	
<i>Scientific Notes and News</i>	134	THE SCIENCE PRESS New York City: Grand Central Terminal Lancaster, Pa. Garrison, N. Y.	
<i>Discussion:</i> <i>"Lodi Max":</i> DR. A. L. KROEBER. <i>A New Disturbance of Red Pine:</i> JOHN AUSTIN JUMP. <i>Selenium Dehydrogenation of Napelene:</i> DR. E. F. ROGERS and PROFESSOR WERNER FREUDENBERG. <i>Luther Burbank:</i> PROFESSOR W. L. HOWARD	137	Annual Subscription, \$6.00 Single Copies, 15 Cts.	
<i>Scientific Books:</i> <i>The World around us:</i> DR. KARL LARK-HOROVITZ 139		SCIENCE is the official organ of the American Association for the Advancement of Science. Information regarding membership in the Association may be secured from the office of the permanent secretary, in the Smithsonian Institution Building, Washington, D. C.	
<i>Reports:</i> <i>The Reinstatement of Professor Schaper</i>	141		

SURFACE MOTION OF WATER INDUCED BY WIND

By Dr. IRVING LANGMUIR

RESEARCH LABORATORY, GENERAL ELECTRIC COMPANY, SCHENECTADY, N. Y.

ON August 7, 1927, when about 600 miles from New York on an Atlantic crossing to England I noticed that there were large quantities of floating seaweed, most of which was arranged in parallel lines with a somewhat irregular spacing ranging from 100 to 200 meters. These lines, parallel to the wind direction, which I shall call streaks, often had lengths as great as 500 m. Between these larger streaks, which contained vast quantities of seaweed forming continuous bands 2 to 6 m wide, there were smaller streaks which were made up of detached masses of seaweed along nearly straight lines. At this time the wind was from the north with a velocity of approximately 10 m/sec (22 miles/hr) and the waves roughly 4 m high.

A day later the waves were larger and the streaks of seaweed were still abundant. On the afternoon of this day a sudden change of wind direction occurred

(of about 90°); within 20 min all the seaweed was arranged in new streaks parallel to the new wind direction, although the waves continued to move in the old direction.

It was clearly not cohesion between masses of seaweed that held them together in the streaks. At that time it seemed to me that the only reasonable hypothesis was that the seaweed accumulated in streaks because of transverse surface currents converging toward the streaks. The water in these converging currents descends under these streaks. Between the streaks rising currents, upon reaching the surface, flow out laterally toward the streaks.

The action of the wind on the water sets up longitudinal surface currents in the direction of the wind. The effect of the wind is thus to produce a series of alternating right and left helical vortices in the water

Эти эксперименты дали первые количественные оценки:

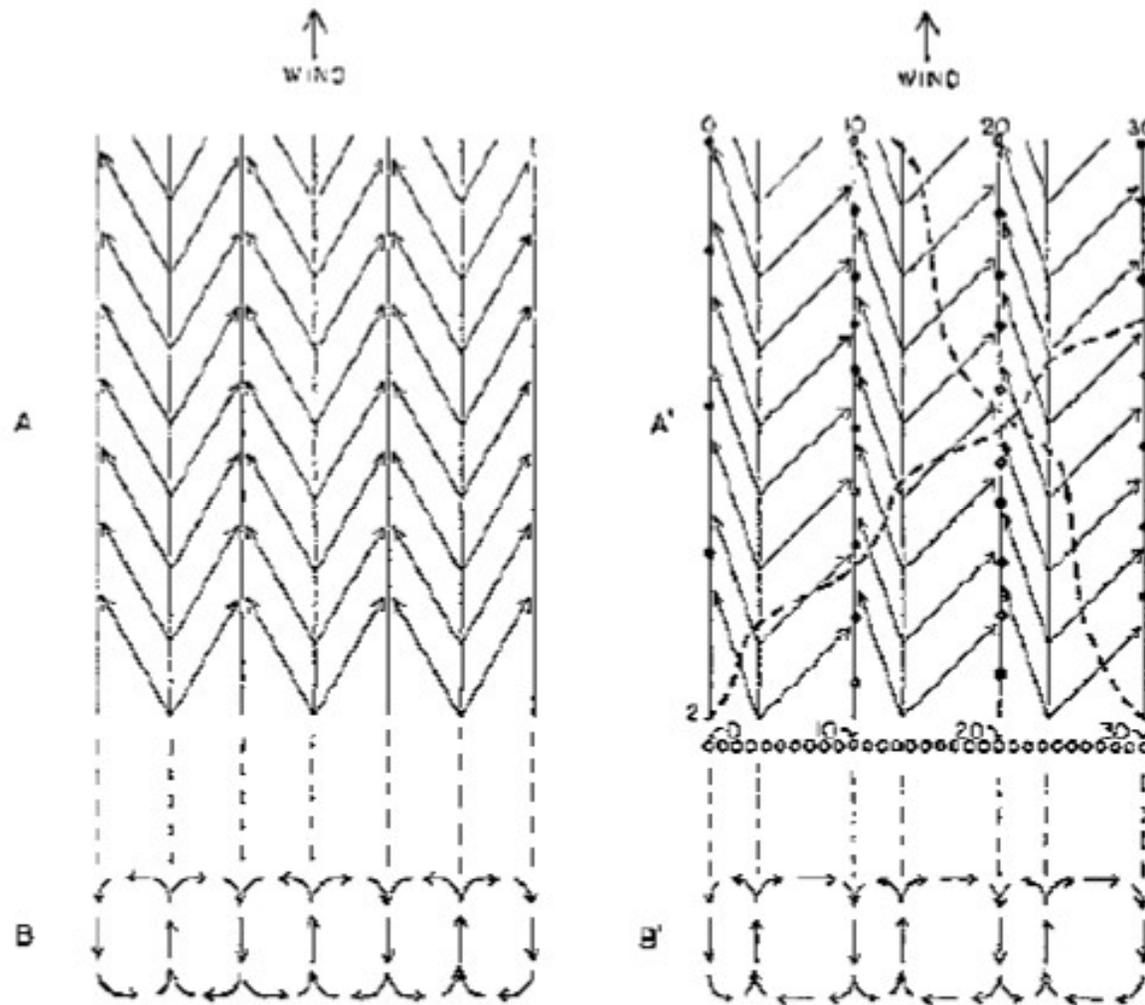
- скоростей ап/даунвеллинга,
- времени, необходимого трассерам (листьям и т.п.) чтобы собраться в полосы и погрузиться.

Замечательны подробности, отмеченные Ленгмюром:

“... количественные измерения расстояний между полосами трудны, поскольку между ясно видимыми полосами существуют меньшие и менее явные... Как поверхность больших волн искривлена многими маленькими волнами, движущимися с ними вместе, так и поверхности больших роллов содержат, по-видимому, более маленькие и более мелкие вихри...”

Langmuir, I. Surface motion of water induced by wind, Science, 87, 119-123, 1938.

Несколькими годами позже Woodcock предположил, что океанская Lc может быть асимметрична (Woodcock 1944).



Не сила ли
Кориолиса
является этому
причиной?

Figure 2. “Idealized drawings of wind-induced helical motions in surface waters, with a illustration of the possible effect of asymmetrical vortices upon the drift of bottles and of Physalia.” (from Woodcock, 1944).

Stommel (1949)

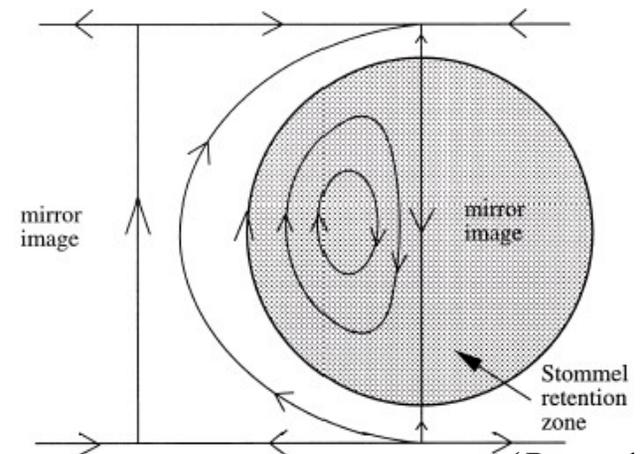
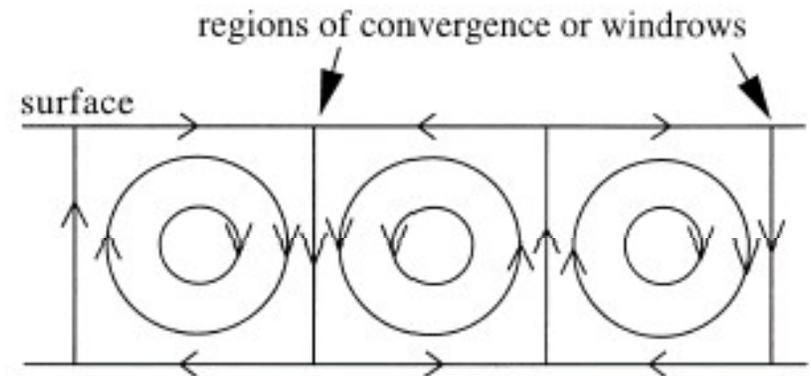
рассчитал траектории частиц, вращающихся в идеальных роллах, и показал, что частицы, которые тонут (как фитопланктон) или всплывают (как пузырьки воздуха), должны скапливаться в областях схождения горизонтальных течений (даун/апвеллинга).

Работы Стоммела по поверхностным плёнкам

Линии тока для частиц нейтральной плавучести: все замкнуты, т.е. (в отсутствие других процессов) частицы остаются на них всё время.

Линии тока для частиц слабо-положительной плавучести:

Ясно видно два разных варианта поведения частиц: какие-то из них захвачены движением по замкнутым траекториям на некотором расстоянии под поверхностью, а другие собираются в точках (линиях) конвергенции линий тока на поверхности жидкости.



(Bees, 1998)

Sutcliffe et al. (1963)

разработал специальную конструкцию - “поплавок Сатклиффа” (диск с поплавком). Они естественным образом дрейфуют к зоне конвергенции течений (даунвеллинга), где диск затягивает поплавок, снабжённый рейкой, на некоторую глубину, пропорциональную силе сопротивления диска. Поскольку эта сила сопротивления пропорциональна скорости даунвеллинга, то эту скорость таким путём удаётся измерить.

Эти эксперименты впервые позволили провести некоторый статистический анализ и найти корреляцию между скоростью ветра и скоростью даунвеллинга.

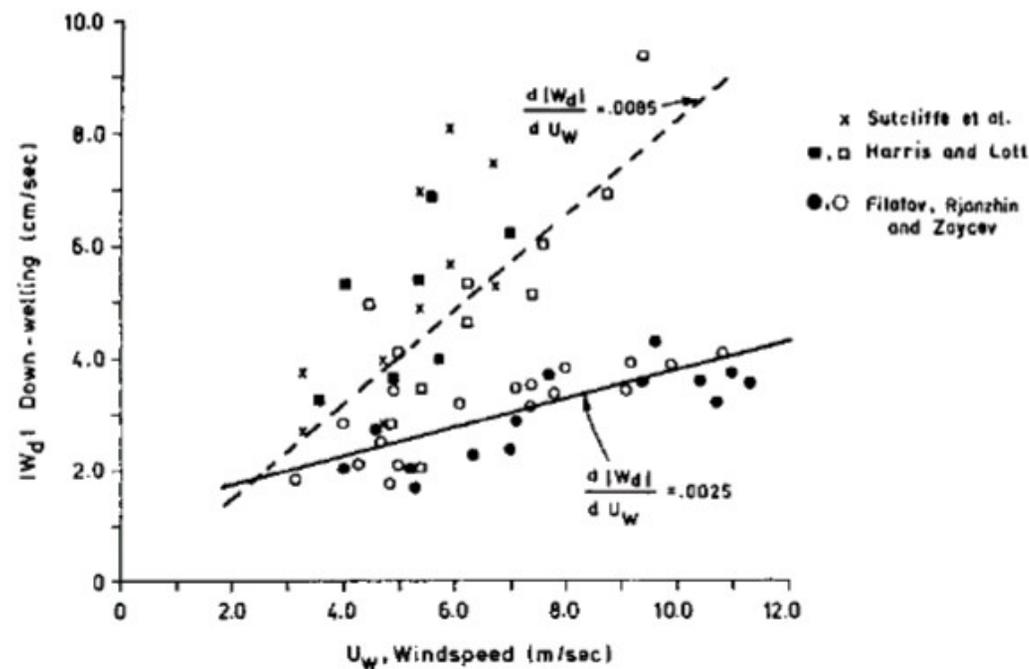


Figure 3. Measured downwelling speeds below streaks as a function of wind speed. The open squares and circles correspond to surface heating, closed symbols to surface cooling. (From Leibovich, 1983).

В 1969, Alan Faller провёл ряд лабораторных измерений и установил существенные условия, необходимые для получения продольных роллов, описанных Ленгмюром:

- (1) просто волны в лотке НЕ образуют роликовые структуры;
- (2) просто сдвиговое течение НЕ образует роликовые структуры; и
- (3) волны ВМЕСТЕ со сдвиговым течением МОГУТ образовать их.

Его окончательный вывод был: для образования роликовых структур необходимы И волны на поверхности, И сдвиговое течение.

Через пару лет, Faller (1971), он написал большой обзор по этой теме, указав, что *«...состояние дел в объяснении природы Ленгмюровской циркуляции совсем не обнадеживающее...»*

Например, самая высокая степень корреляции в океанских наблюдениях была обнаружена между расстоянием между пенными полосами и ...высотой наблюдателя над поверхностью воды...

Лабораторные эксперименты и обзор Алана Фоллера послужили поворотной точкой в изучении физики Lc.

Возникли новые **аналитические методы**

Craik (1970)

Leibovich and Ulrich (1972)

Craik and Leibovich (1976)

Garrett (1976)

Craik (1977)

Leibovich (1977)

В 1970-х же, появились и новые методы **наблюдений**.

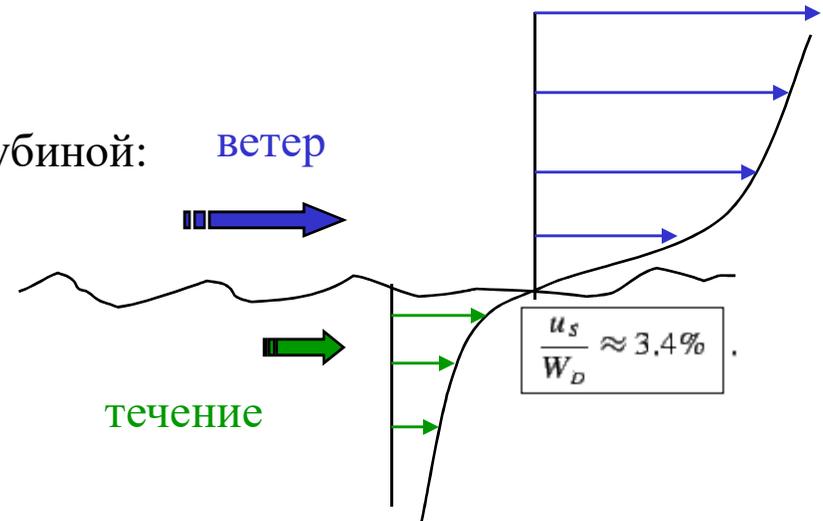
Assaf et al. (1971) с помощью аэрофотосъёмки полос Ленгмюра окончательно подтвердил, что в расстояниях между ветровыми полосами одновременно **существует много масштабов**: на нескольких сериях фотографий были видны три масштаба - **от нескольких метров до нескольких сотен метров между полосами**.

...об этом, собственно, изначально и писал сам Ленгмюр (*Langmuir 1938*).

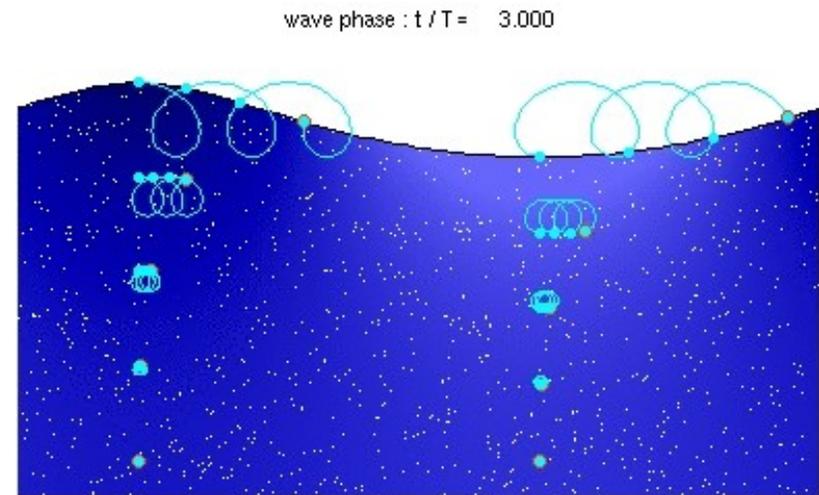
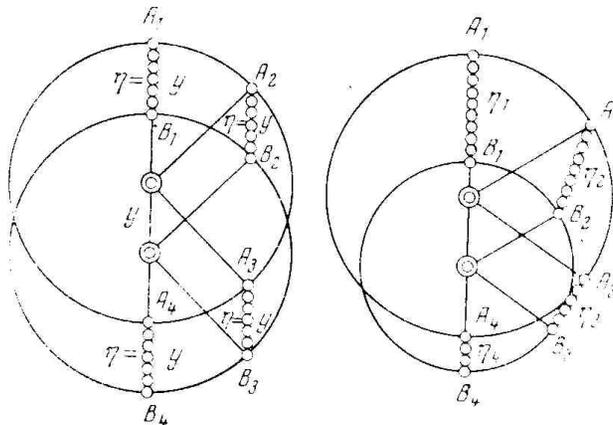
2. Теория Крайка и Либовича

Ветер образует (а) волны на поверхности и (б) течение.

- Течение – со сдвигом, т.е. убывающее с глубиной:



- Волны – нелинейны, т.е. возникает «Стоксов дрейф»:



Путь математического решения – метод малых возмущений:

Пусть существует **Основное состояние**:

сдвиговое ветровое течение

и
поверхностные волны, приводящие к формированию стокова дрейфа,
уменьшающегося с глубиной.

Пусть возникает **Возмущение Основного состояния** –
имеющее вид струи, направленной вниз по ветру.

Эта струя неизбежно приводит к возникновению зоны конвергенции на поверхности
- вдоль оси этой струи.

А дальше получается, что переменный с глубиной стоков дрейф и переменный же
сдвиговой поток *усиливают* эту струю.

Таким образом, направленное вниз по ветру «сдвиговое ветровое течение +
волновой дрейф» оказывается неустойчивым. Возникшее в нём возмущение не затухает, а
приводит к распаду существовавшего течения - результат которого мы и видим как серию
продольных вихрей.

Leibovich, S. (1983) The form and dynamics of Langmuir circulation.
Annual Review of Fluid Mechanics 15, 391-427.

Физическая находка:

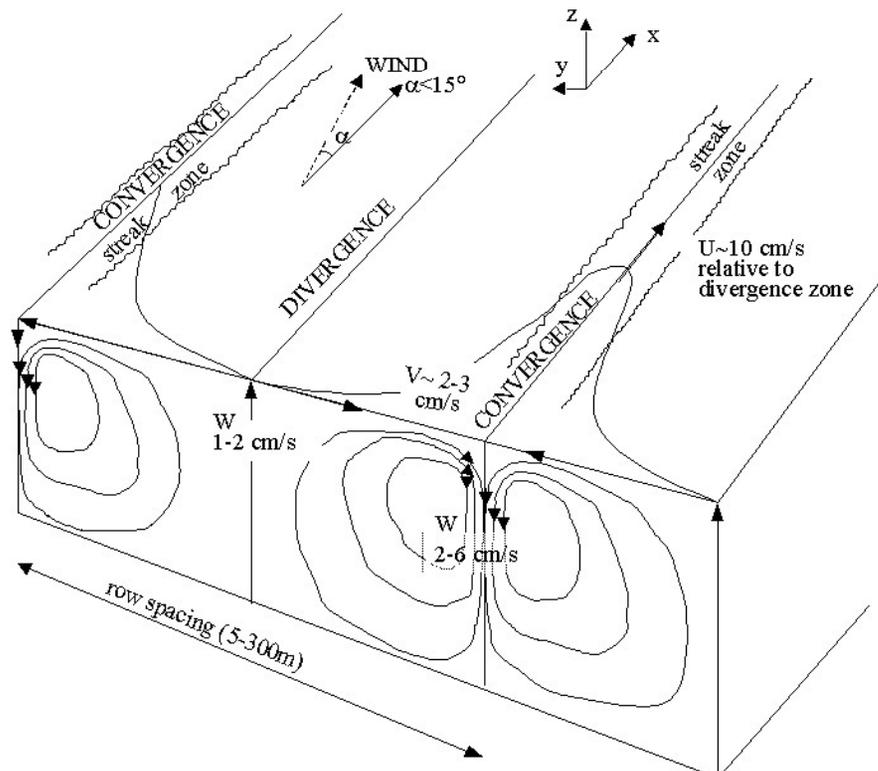
The Craik-Leibovich equations for the evolution of Langmuir circulation (Leibovich, 1977):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U = -\nabla p + \nu_T \nabla^2 U + U_s \wedge \omega, \quad \text{— «вихревая сила»}$$

Стоксов (волновой) дрейф

завихренность сдвигового течения

векторное произведение



Теперь, помимо наблюдений,
у нас есть и теория,
объясняющая природу
возникновения Lc.

Но по-прежнему **нет ответов** на
вопросы о форме и масштабах
роллов, о времени их жизни, о
скоростях и траекториях движения
частиц жидкости...

С появлением новых современных приборов и методов измерений – данных стало гораздо больше, но по-прежнему **не удаётся предсказать даже средние величины** (скоростей, глубины перемешанного слоя, расстояний между полосами и т.п.).

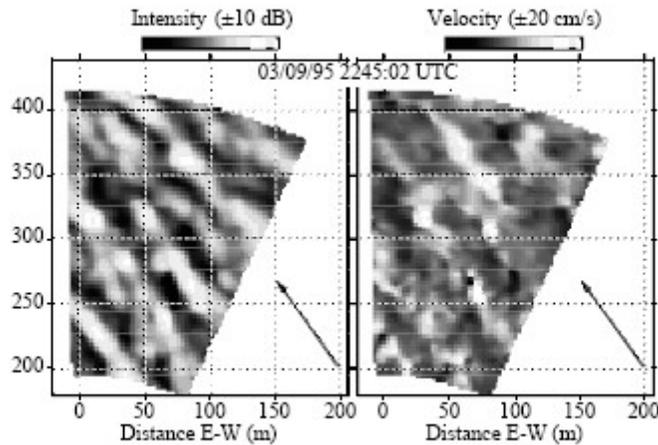


Figure 4. Example of “Phased Array Doppler Sonar” (PADS) data, gathered in the spring of 1995 during MBLEx-1. (Left panel) Acoustic backscatter intensity; (right) Radial velocity. The arrows indicate wind speed and direction; the arrow shown represents a 15

По-видимому, имеется целый ряд дополнительных факторов, влияющих на характеристики ЛС.

Возможно, это:

- текущая глубина перемешанного слоя,
- эффективная турбулентная вязкость,
- влияние облаков пузырьков и плавучих материалов...

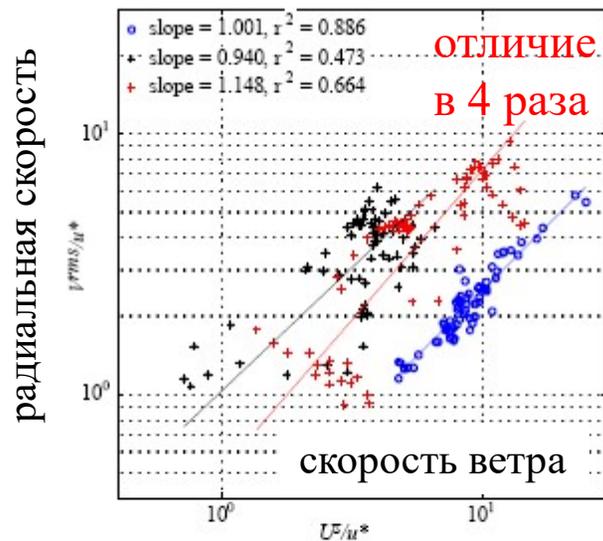


Figure 9. The empirical fits for the exponent n , for each “clean” wind event treated separately. Symbols as follows: MBLEx-1 (o), SWAPP-2 (*), SWAPP-3 (+). Note that, within each event, the fit is fairly tight. However, the vertical offset of the lines varies significantly over the three events.

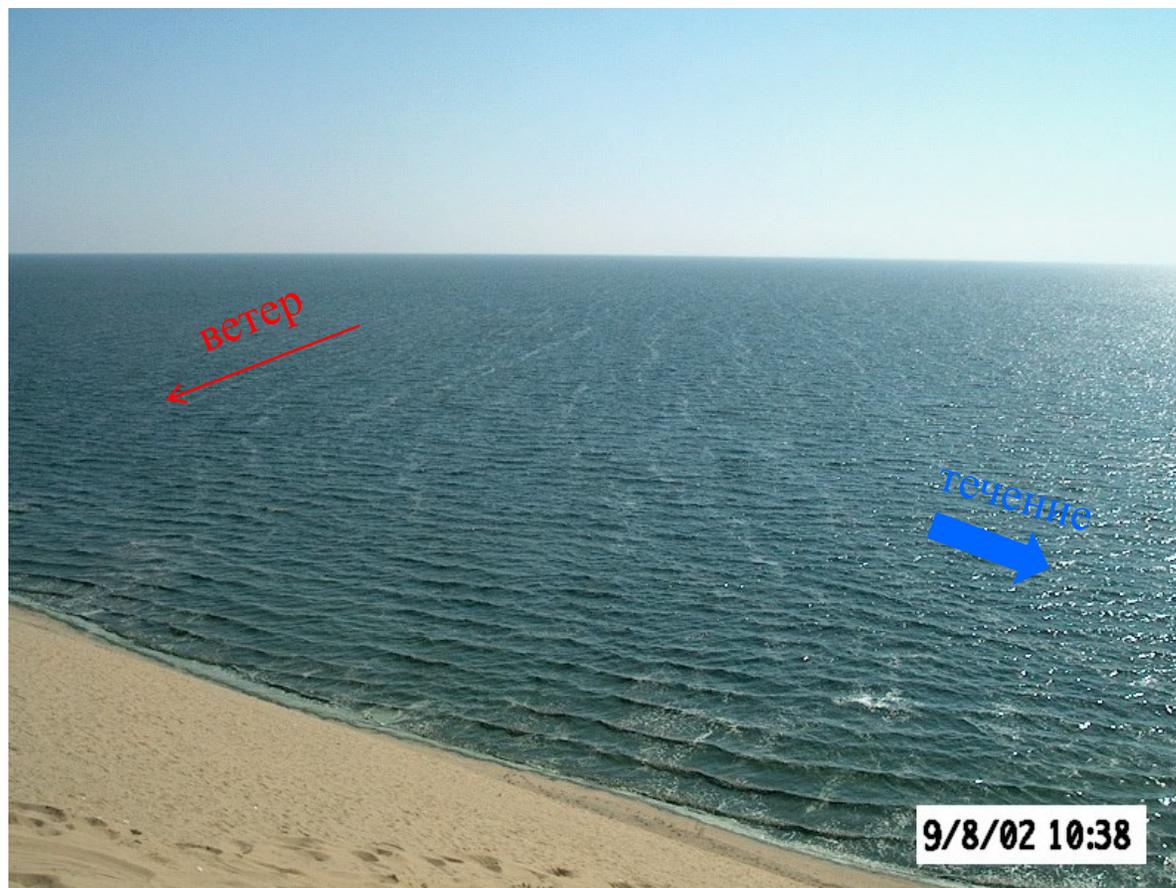
Event	MBLEX-1	SWAPP-2	SWAPP-3
Parameter			
V^{rms}/U^S	0.24	0.95	0.67
Π^{dir}	SE	SSE	NNW
Π^{max}	15 m/s	10	13.6
u^*	1.65 cm/s	1.1	1.5
U^S	7.0 cm/s	4.5	7.5
h	25 m	25	45
Γ^S	10.7 s	6.9	11.5
k^S	0.035 m ⁻¹	0.085	0.031
$k^S h$	0.87	2.12	1.37
F'	0.53	0.77	0.66
$(u^* U^S)^{1/3}$	0.124 cm/s	0.082	0.119
V_t	698 cm ² /s	190	770

(Smith, 1998)

3. Данные натуральных наблюдений

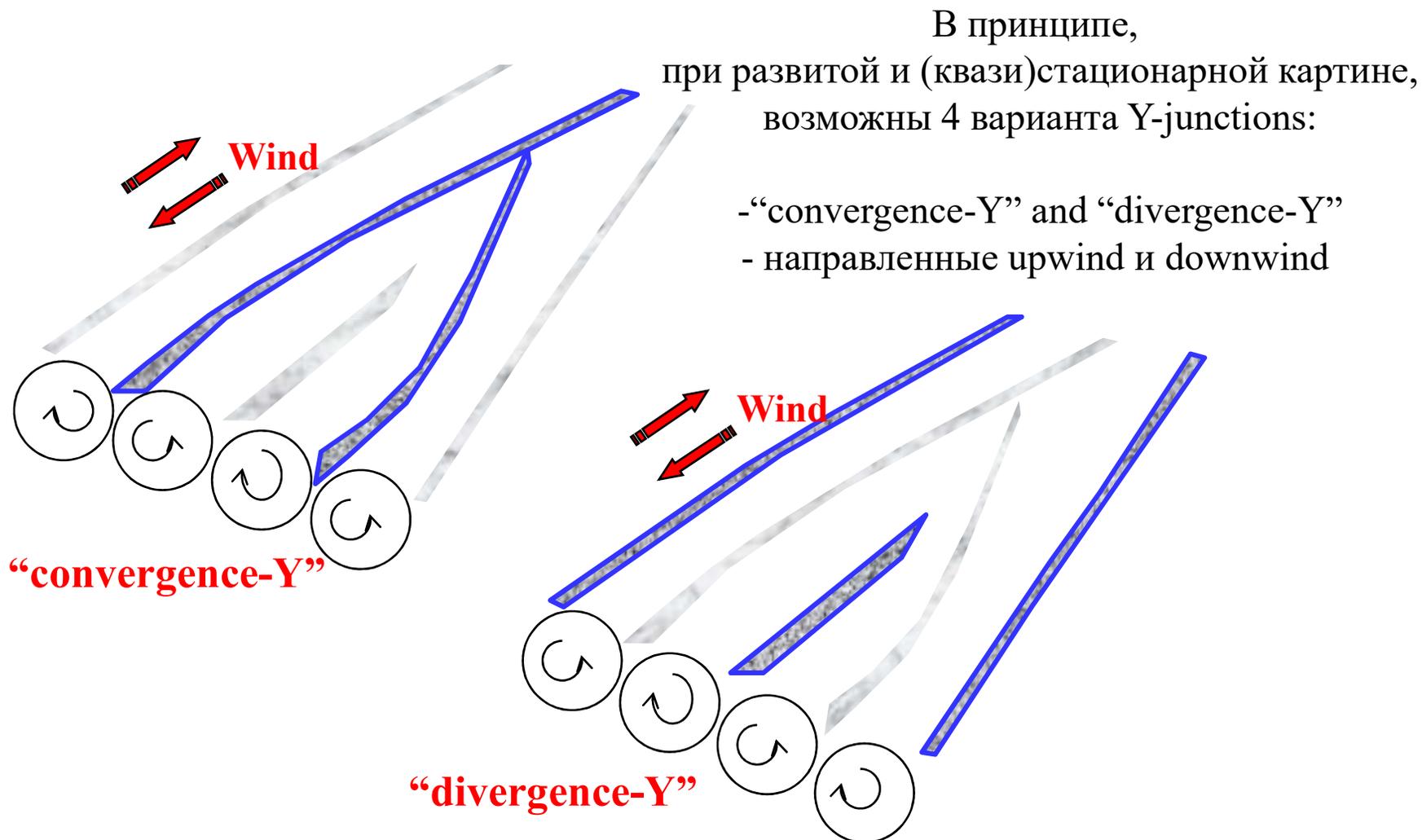
- для открытого океана – предложены варианты корреляций между расстоянием между полосами L и скоростью ветра W :
 $L=(4.8 \text{ s}) * W$ (Faller and Woodcock, 1964); $L=(0.68 \text{ s}) * W + 1.2 \text{ m}$ (Graham and Hall, 1997);
- Филатов и др. (1981) нашёл, что скорости течений в ячейках циркуляции Ленгмюра имеют порядок 3% от скорости ветра;
- течение по ветру в пределах полос конвергенции заметно больше, чем между полосами (e.g. Langmuir, 1938; Katz et al., 1965; Kenny, 1977) и примерно равно радиальной скорости (Leibovich, 1983);
- отношение расстояния между полосами к глубине перемешанного слоя:
от 0.66 до 1.66 в океане (Leibovich, 1983),
от 0.3 до 0.5 – мелкие акватории с ограниченной длиной разгона волн (Graham and Hall, 1997);
- ячейки циркуляции Ленгмюра разрушаются (перестраиваются) через 10 ± 30 мин. Дисперсия по поверхности материала, захваченного в полосах конвергенции, критически зависит от этого времени.

- если течение и Стоксов дрейф не параллельны, что ролики LC, выстроенные в направлении действия ветра, медленно дрейфуют в сторону компоненты волнового Стоксова дрейфа, поперечной ветру (Сох, 1997):

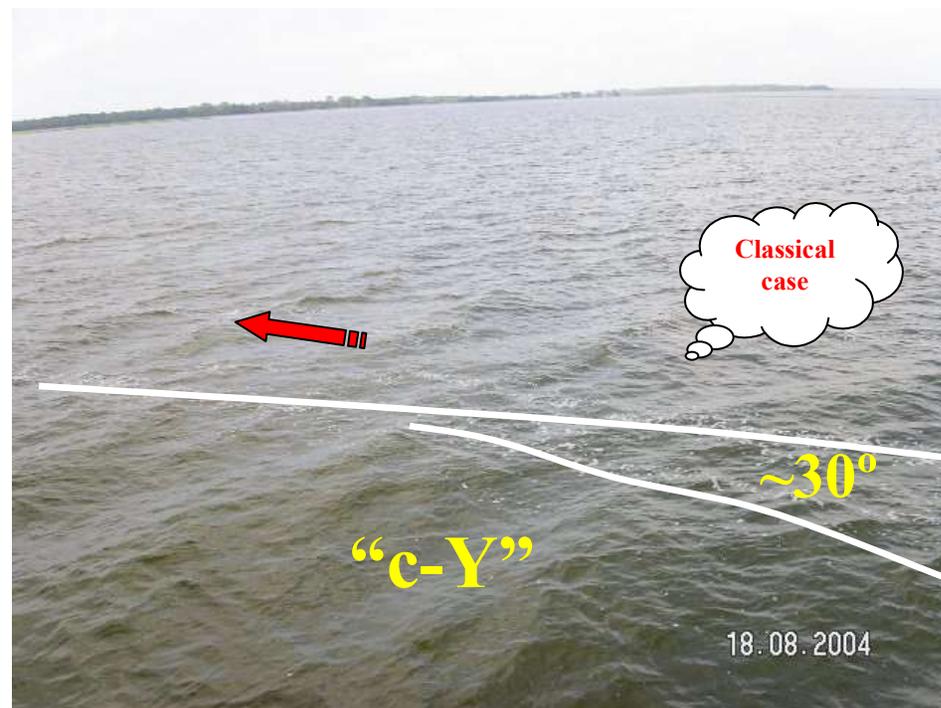
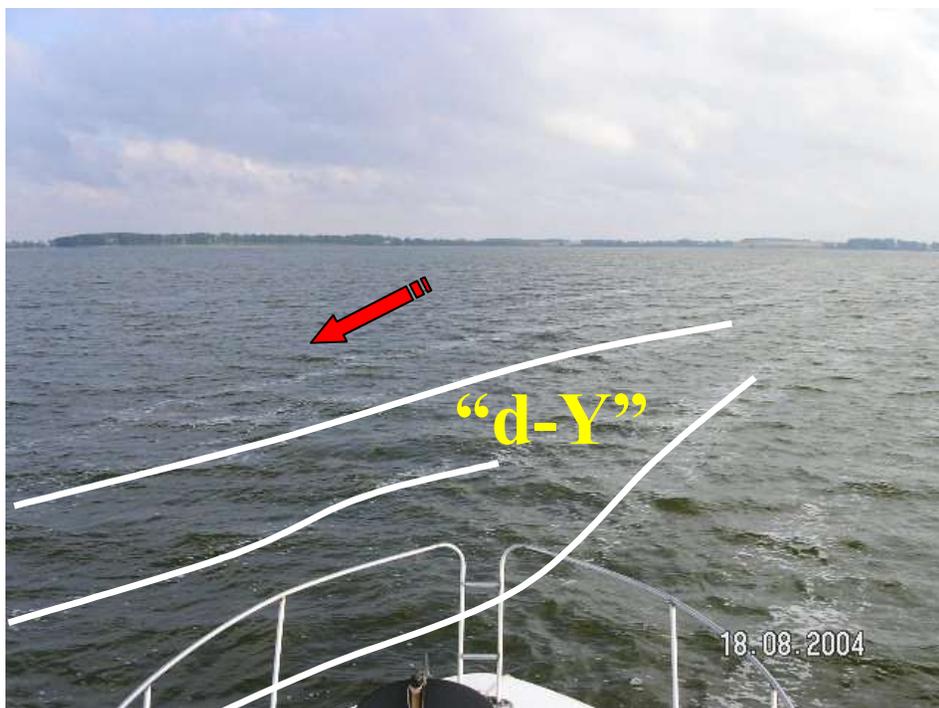
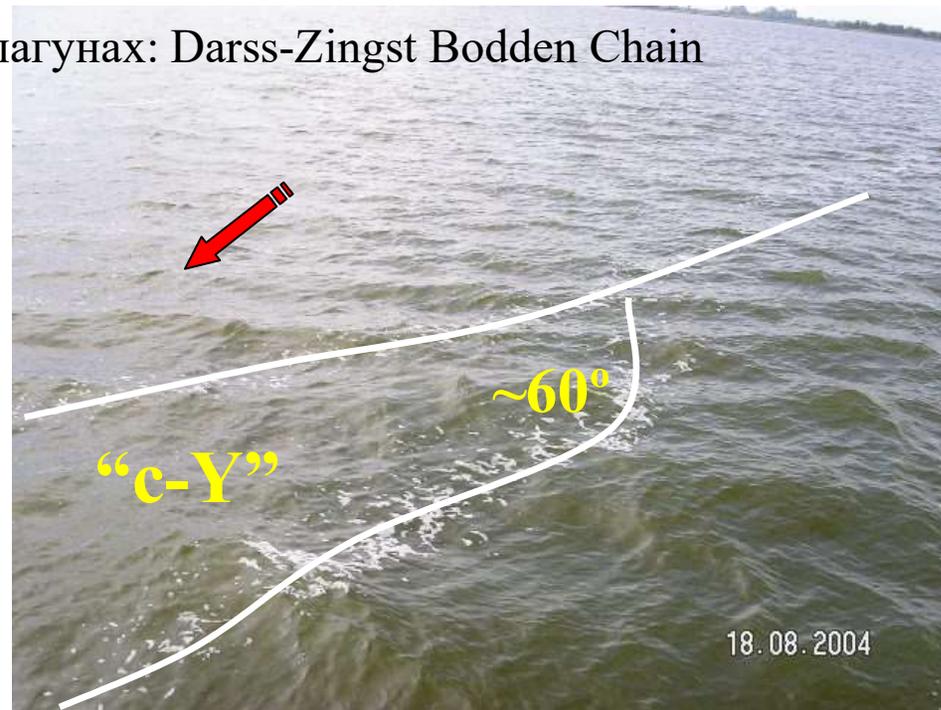


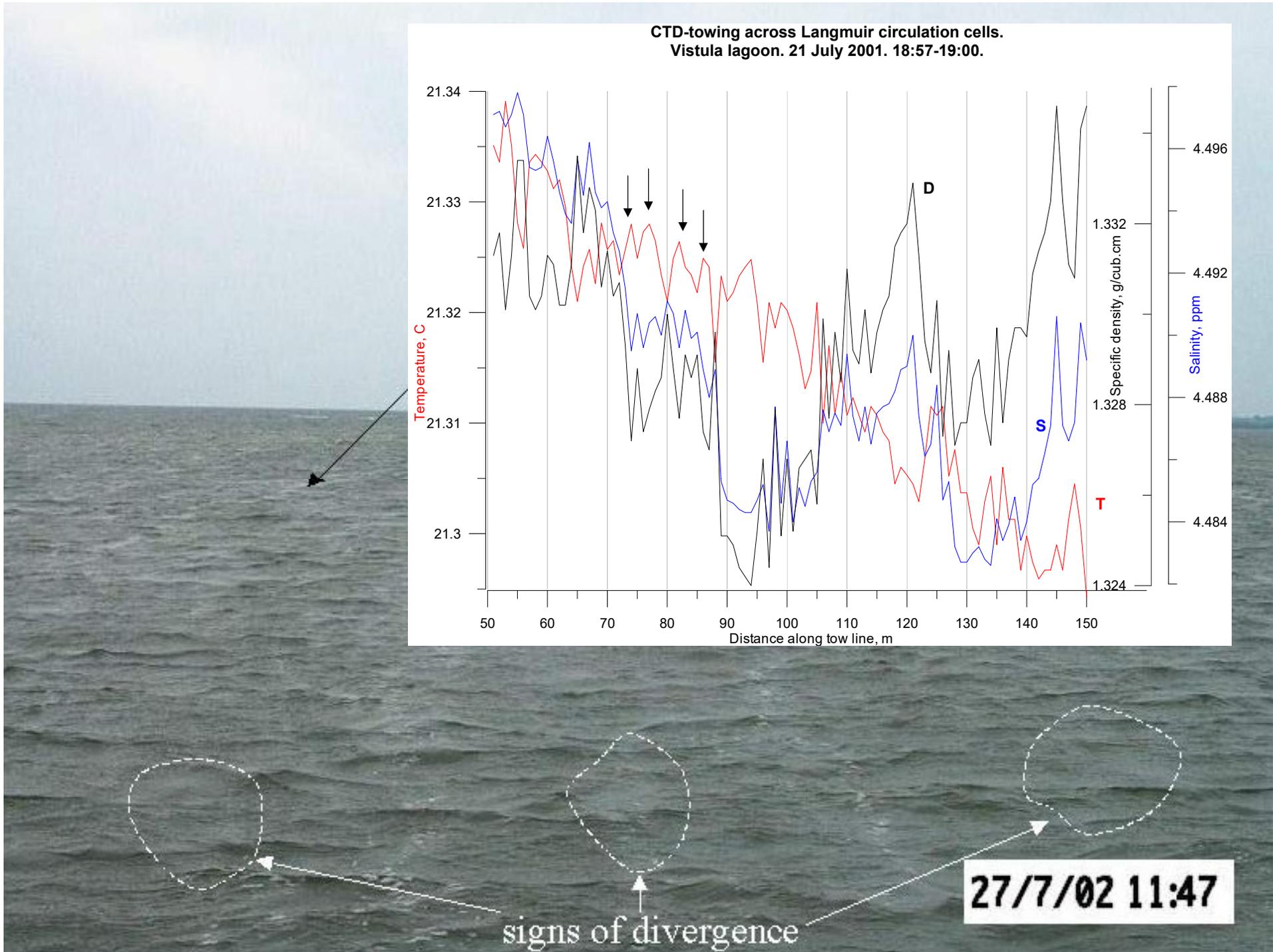
- Неустойчивость картины циркуляции Ленгмюра:

полосы с течением времени изгибаются, попарно соединяются или пропадают вовсе, образуя характерные «рогатки» («Y-junctions»). По наблюдениям в океане, узкий конец Y's в подавляющем большинстве случаев смотрит вниз по ветру, угол при слиянии — около 30° (Farmer & Li, 1995; Thorpe, 1992).

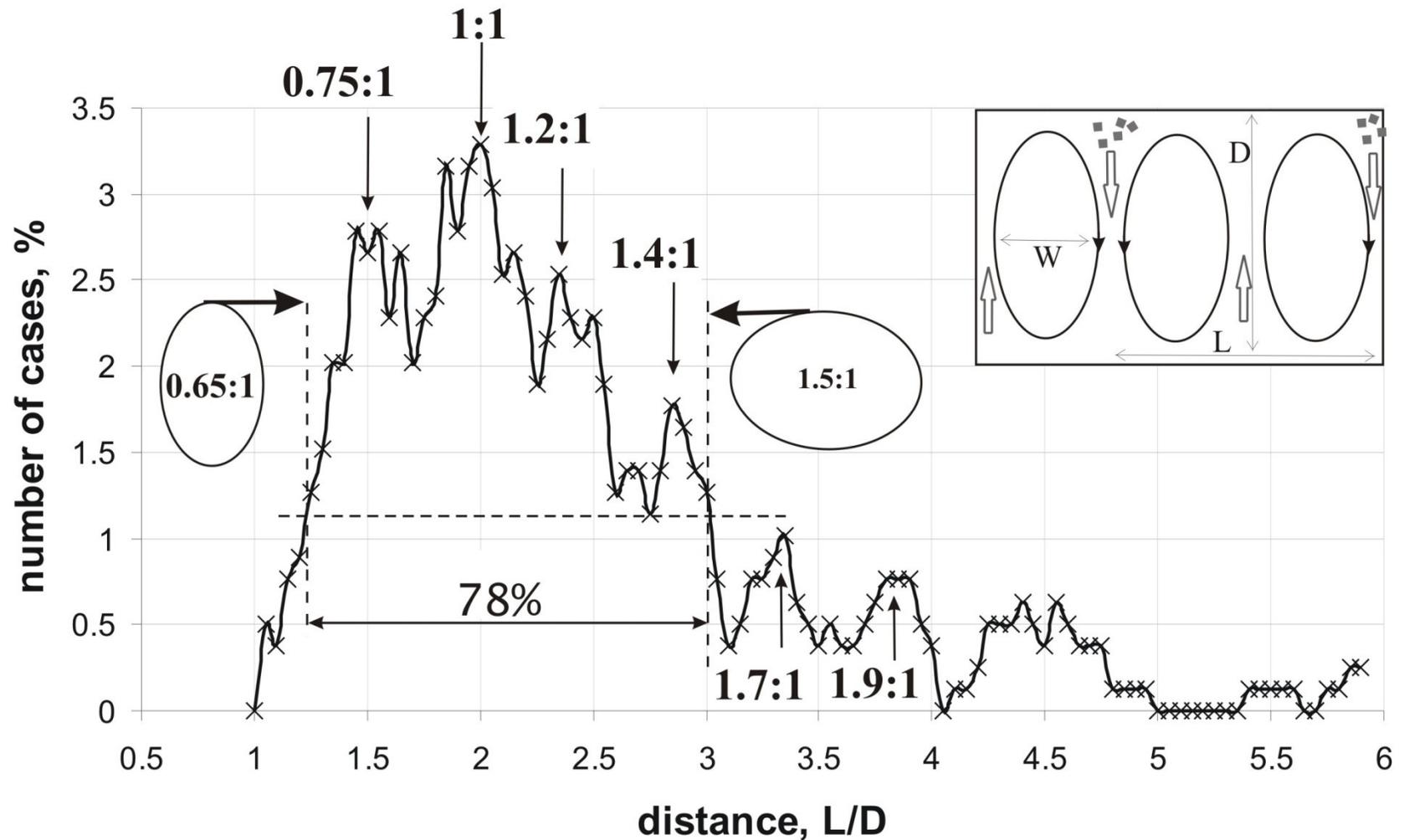


Наблюдения в мелководных лагунах: Darss-Zingst Bodden Chain





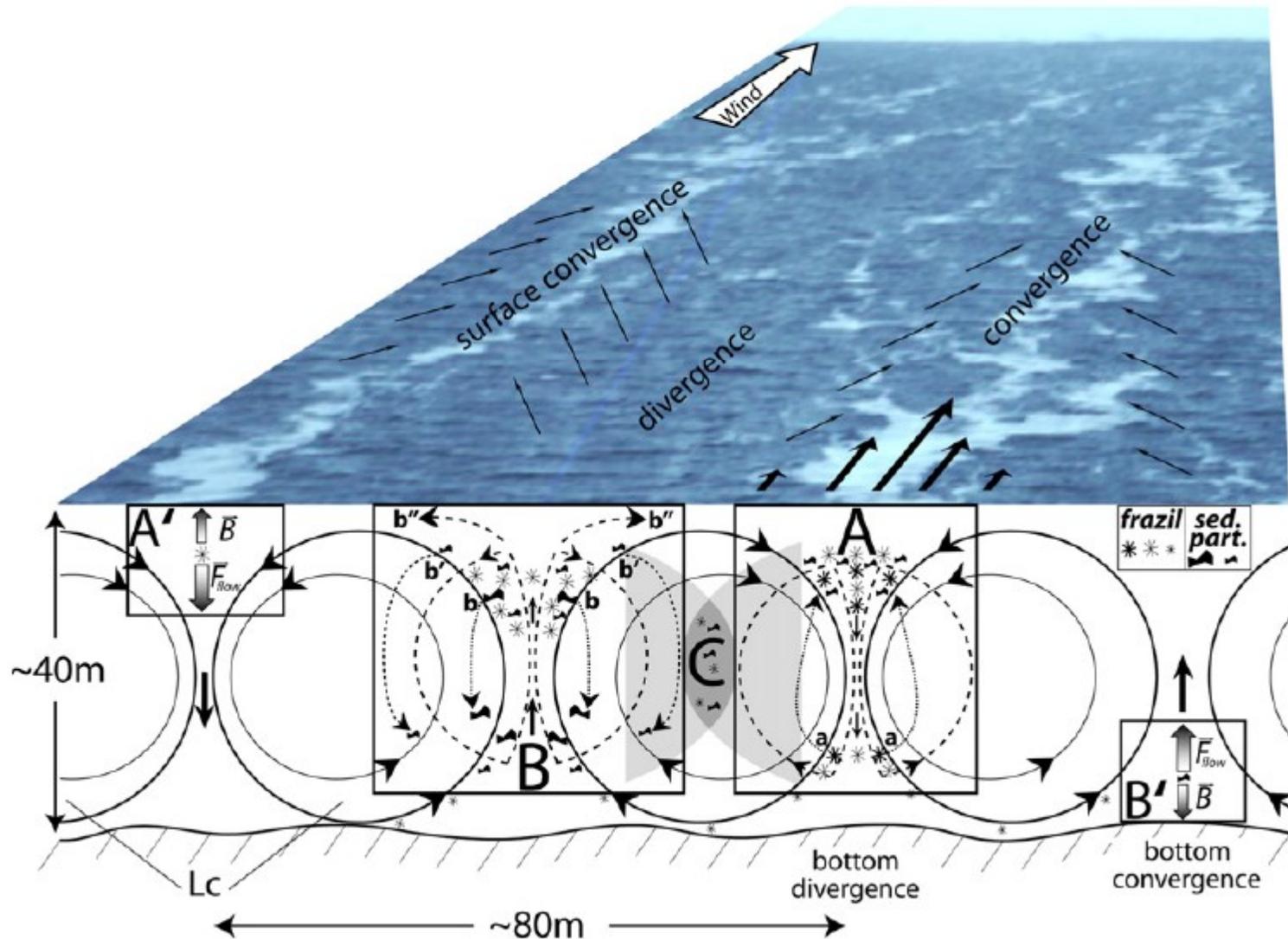
Соотношение расстояния между полосами и глубины



Chubarenko, I., Chubarenko, B., Esiukova, E., Baudler, H., 2010. Mixing by Langmuir circulation in shallow lagoons. *Baltica*, 23 (1), 13-24.

-траектории частиц с разной плавучестью – различны, причём пересекаются, так что LC очень эффективно смешивают частицы разного характера

D. Dethleff et al. / Cold Regions Science and Technology 56 (2009) 50–57



4. Роликовые структуры в океане и атмосфере

Сегодня можно смело утверждать, что образование роликовых структур в океане и атмосфере – явление самое обычное, и может происходить по многим причинам.

Основные из них:

- гидродинамическая неустойчивость течения и
- одновременная работа нескольких «конкурирующих» механизмов перемешивания (например, течение + конвекция).

«Облачные дорожки» над Куршским заливом.

*Роликовые структуры в атмосфере
над Вислинской косой*

18 июля 2006



Над морем:
направление
общего транспорта
в верхних слоях
(отмечено волнистыми *Cirrus*)

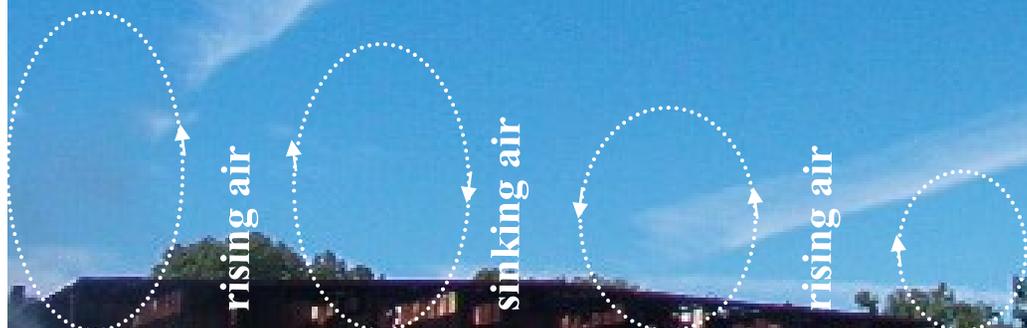
“рыбьи скелеты”
повёрнуты немного вправо от направления общего транспорта

Над косой:

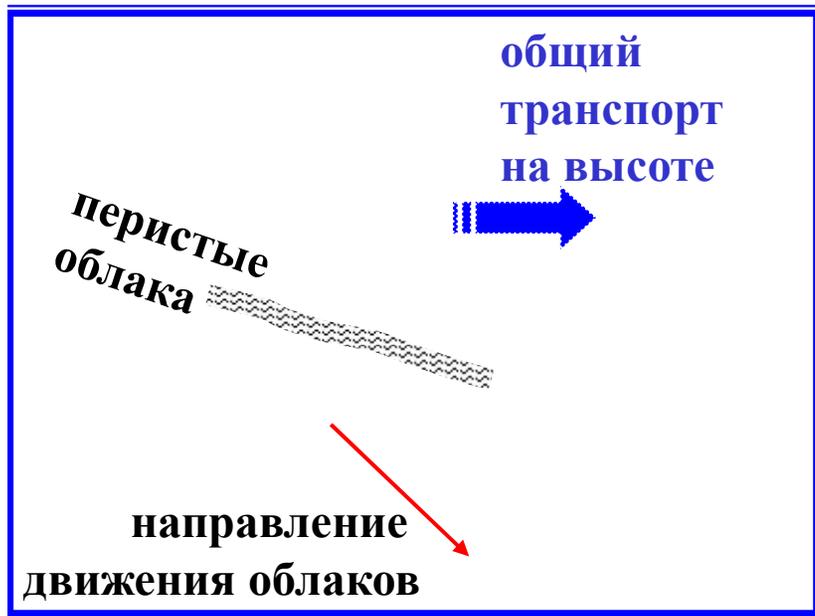
над землёй (из-за дневного прогрева) усилилась вертикальная конвекция, и это привело к смене структуры облаков:

это направление движения облаков

это направление
общего транспорта над морем



Вид в плане:





ВОСХОДЯЩИЕ ПОТОКИ





Cumulus Fractus над Балтийским морем



Выводы:

- 1. Именно междисциплинарные исследования оказываются самыми продуктивными: Ваше мнение может сыграть важную роль в решении вопросов сопредельных наук.**
- 2. Теория Крайка и Либовича общепринята и раскрывает природу возникновения циркуляции Ленгмюра. В то же время, предсказать конкретные характеристики реальной картины она не в силах.**
- 3. Возможно, это связано с тем, что механизмов генерации роликовых структур в океане и атмосфере довольно много, и какой именно из них реализуется в конкретном случае – однозначно сказать непросто. *Циркуляцией Ленгмюра* принято называть систему продольных роллов, сформированную в океане (или в глубоком водоёме вдали от берегов) в результате совместного действия ветра и поверхностных волн (...независимо от того, что именно наблюдал Ирвинг Ленгмюр в 1927 году в Атлантическом океане...).**



**спасибо
за
внимание**