

## **ВОЗНИКНОВЕНИЕ И СУЩЕСТВОВАНИЕ АПВЕЛЛИНГА У СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ о. САХАЛИН**

**П. В. Полупанов**

**Сахалинский научно-исследовательский институт  
рыбного хозяйства и океанографии (Южно-Сахалинск)**

Прибрежный апвеллинг – одно из тех явлений, которые оказывают существенное влияние на формирование биопродуктивных зон в океане. Существование апвеллинга на северо-восточном шельфе о. Сахалин в результате анализа инструментальных и спутниковых данных отражено в работе В. Б. Красавцева и др. (2000). Изучение условий его возникновения и существования на северо-восточном шельфе о. Сахалин приобретает особое значение в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой в этом районе, обусловленной разработкой месторождений нефти и газа. Основными задачами, решаемыми в данной работе, являются выявление зон апвеллинга на шельфе северо-восточного побережья о. Сахалин и проверка гипотезы о зависимости возникновения апвеллинга от скорости и продолжительности воздействия южных ветров, преобладающих в летний период. Отличием данной работы от предыдущих является определение вертикальной скорости подъема изопикн и привлечение для ее выполнения данных авиатемпературных съемок, что для данного района ранее не делалось. По сравнению со спутниковыми измерениями температуры, измерения с помощью ИК-радиометра с самолета Ил-14 производятся с высоты 100–300 м, вследствие чего исключается искажающее влияние облачности (рис. 1). Одним из достоинств указанных наблюдений является то, что временной масштаб их составления (сутки) меньше синоптического. Таким образом, изменения погоды за период наблюдения не оказывают существенного влияния на положение изотерм, что позволяет оценить частоту наблюдаемого явления на различных участках северо-восточного шельфа о. Сахалин. Применение данных авиатемпературной съемки является важным преимуществом по сравнению с работой В. Б. Красавцева и др. (2000), в которой использовались средние за 15 суток распределения температуры поверхности моря.

Исходным материалом послужили данные авиатемпературных съемок, выполненные СахУГМС с 1972 по 1989 г. (всего 49 карт), и данные, полученные при гидрологических съемках с 1987 по 1993 г. (всего семь карт). Основой для расчетов послужили две модели: модель апвеллинга Экмана–Свердрупа и двухслойная модель Йошида (Боуден, 1988). Определение зон апвеллинга производилось путем выделения локальных гидрологических фронтов на картах температуры поверхно-

сти воды. Для доказательства гипотезы о зависимости возникновения апвеллинга от скорости и продолжительности действия южных ветров исходный материал был подвергнут стандартной статистической обработке с помощью пакета прикладных программ Analysis Tools.

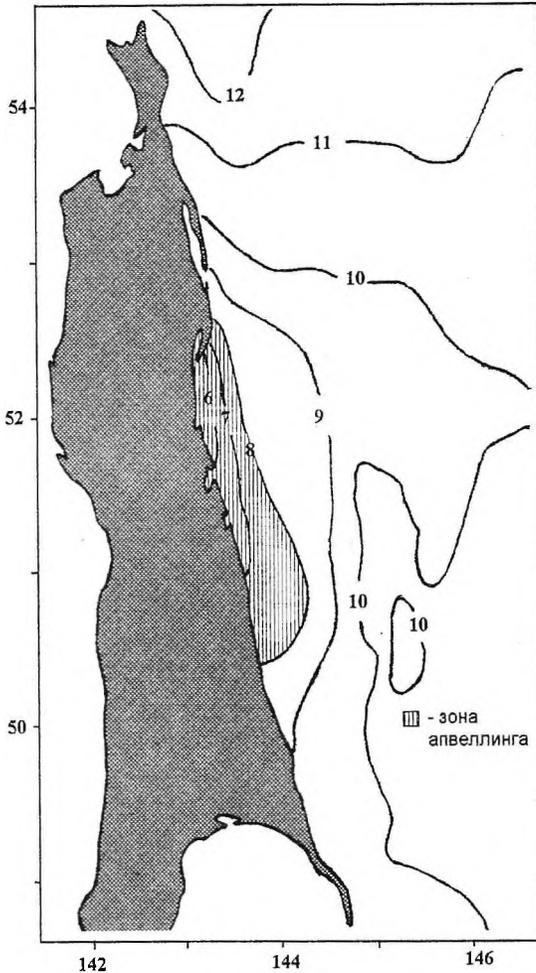


Рис. 1. Распределение температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) на поверхности Охотского моря 29 сентября 1985 г. (по данным авиатемпературной съемки)

Наблюдения прибрежного апвеллинга включают, прежде всего, измерения температуры поверхности воды, указывающей на области выхода холодных глубинных вод. Вертикальные профили температуры, солености и биогенных элементов позволяют выявить наличие апвеллинга и горизонт, с которого поднимаются глубинные воды. В работе К. Боудена (1988) рассматривается возможный методический подход определения скорости подъема вод. В соответствии с ним ее приходится определять по изменению во времени глубин залегания изопикн или рассчитывать по известным значениям горизонтальных скоростей с учетом условия неразрывности. Скорость подъема изопикн при этом отождествляется со скоростью апвеллинга (вертикальной скоростью подъема вод). Для различных временных масштабов таким способом можно получить лишь оценку нижней границы диапазона вертикальных скоростей, поскольку не учитываются диффузионные процессы. Однако для событий с характерным масштабом времени около двух-трех суток диффузионные процессы считаются несущественными (Боуден, 1988).

Предлагаемые в работе Г. В. Румянцева (1974) условные градации гидрологических фронтов для Охотского моря позволяют выделить основные фронты в районе апвеллинга по данным авиасъемок (табл. 1). В связи с тем, что характерный пространственный масштаб измерения температуры в направлении, поперечном фронту, в зоне гидрологического фронта имеет порядок 10 миль, сравнение по точности измерений температуры для ИК-радиометра ( $\pm 0,4^\circ$ ) и стандартной судовой гидрологической аппаратуры ( $\pm 0,02^\circ$ ) позволяет при выделении гидрологических фронтов дополнять данные авиатемпературных съемок судовыми наблюдениями (Чаленко, Сивакова, 1972).

Таблица 1

Условные градации гидрологических фронтов в Охотском море

Максимальные горизонтальные градиенты температуры воды (в градусах на милю)	Степень развития гидрологического фронта
0,01–0,04	Фронт выражен слабо
0,05–0,10	Фронт выражен хорошо
0,11–0,20	Большие температурные контрасты

При выделении зон апвеллинга по данным судовых и авиационных наблюдений за температурой поверхности моря учитывались результаты сравнительного анализа судовых и авиационных наблюдений. Отклонения в измерении температуры ИК-радиометром относительно судовых измерений в 80% случаев не превышали  $\pm 1,5^\circ$ . Это является достаточным для выделения хорошо выраженных фронтов в указанном выше пространственном масштабе. Среднее отклонение измерения температуры при авиасъемках, относительно судовых наблюдений, в целом для моря составило  $-0,42^\circ$ , то есть оно лежит в пределах сертификационной точности приборов (Чаленко, Сивакова, 1972).

Полученные при проведении гидрологической съемки НИС «Профессор Хромов» (3 августа 1992 г.) данные позволяют достаточно уверенно утверждать, что область пониженных температур образовалась именно в результате апвеллинга. Таким образом, для указанного случая можно рассчитать типичную вертикальную скорость и бароклинный радиус деформации Россби на начальной стадии развития, применяя двухслойную модель. Общий анализ такой задачи был выполнен Йошидой (Боуден, 1988). Радиус деформации определяется выражением:

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{g' H_1 H_2}{H_1 + H_2}}, \quad (1)$$

где  $g' = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g$ ,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ;

характерное время подъема границы раздела равно:

$$T = \rho_1 H_1 \lambda / \tau_y. \quad (2)$$

Соответственно, типичное значение вертикальной скорости определяется соотношением:

$$\omega = \frac{\tau_y}{\rho_1 \lambda} \frac{1}{f}, \quad (3)$$

где:  $f$  – параметр Кориолиса (на широте  $53^\circ f=1,16 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ );  $\tau_y$  – касательное напряжение ветра (для ветра 5 м/сек.  $\tau_y=0,18 \text{ Н/м}^2$ ).

Удельные плотности ( $\rho_{1,2}$ ) и толщины ( $H_{1,2}$ ) двух слоев соответствуют фактическим по данным гидрологической съемки (рис. 2).

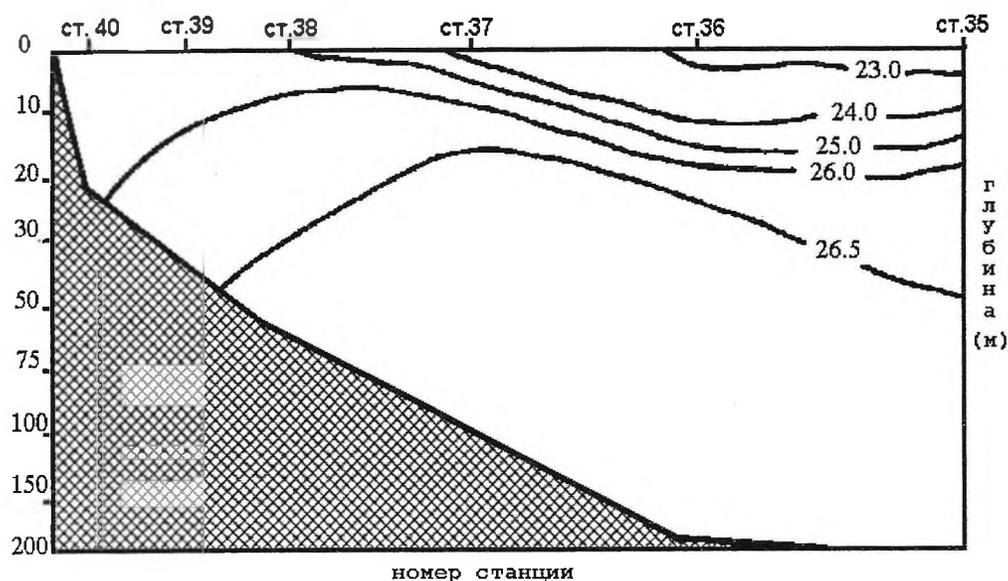


Рис. 2. Распределение плотности ( $(\rho-1) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) морской воды на разрезе Пильтун-море 3 августа 1992 г. (по данным СахТИНРО, СТР «Вера Белик»)

В данном случае, при средней скорости южного ветра 5–7 м/сек., вертикальная скорость подъема границы раздела, характеризующей термоклин (изопикны  $1,025 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), согласно формуле (3) составляет 7,8 м/сут. Рассчитанный по формуле (1) радиус Россби равен 3 км. В соответствии с формулой (2) воды, лежащие за термоклином, достигнут поверхности в течение двух суток.

Скорость подъема воды при стационарном апвеллинге (по модели Экмана–Свердруп) будет составлять от  $0,6 \cdot 10^{-5}$  до  $3,0 \cdot 10^{-5}$  м/сек. (0,5–2,5 м/сутки) при скоростях ветра 5–10 м/сек. соответственно (Боуден, 1988). При скорости ветра менее 5 м/сек. касательное напряжение ветра мало и не в состоянии вызвать дрейфовое течение, способное быть причиной возникновения апвеллинга.

Таким образом, проведенные расчеты позволяют предположить, что основным фактором, определяющим возникновение апвеллинга у побережья восточного Сахалина, является наличие в данном районе ветров южных румбов со скоростями не менее 5 м/сек. при продолжительности более двух суток. Данные о фактическом ветре по району (за предшествующие съемке пять суток) выбирались из карт ГПК-5 из архива СахУГМС.

Обнаруживается довольно устойчивая взаимосвязь между наличием областей пониженных температур на поверхности воды и повторяемостью ветров южных румбов. Возникновение температурных аномалий в прибрежной зоне северо-восточного Сахалина также возможно в результате таяния льда (весной), выхолаживания и льдообразования (осенью). Поэтому при анализе исходного материала отбраковывались явные случаи возникновения очагов пониженной температуры за счет вышеперечисленных факторов. Однако достоверно судить о наличии апвеллинга можно лишь при использовании зональных гидрологических разрезов. Поскольку подавляющая часть используемых здесь материалов относится к данным авианаблюдений за поверхностной температурой, в ряде случаев области по-

ниженных температур не удавалось однозначно интерпретировать как апвеллинг. Если данные явно не браковались, то область пониженной температуры рассматривалась как апвеллинг. При этом не принимались во внимание размеры областей пониженных температур. Еще одним условием, определяющим апвеллинг, было замыкание на берег гидрологического фронта, охватывающего зону апвеллинга.

При сведении результатов наблюдений в одну таблицу получили двухмерное альтернативное распределение с коэффициентом взаимной сопряженности  $K=0,62$  (табл. 2).

Таблица 2

**Двухмерное альтернативное распределение**

Число случаев	Наличие южных ветров	Отсутствие южных ветров	Итого
Наличие апвеллинга	16	3	19
Отсутствие апвеллинга	6	31	37
Итого	22	34	56

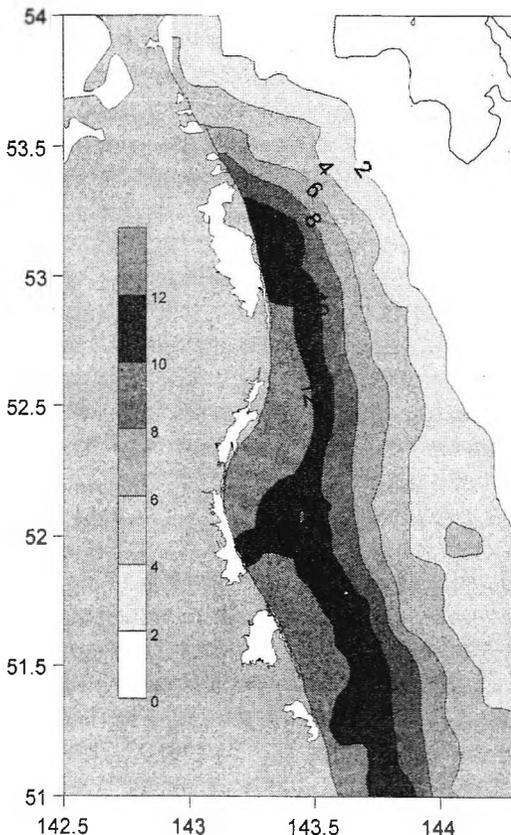
При установлении взаимосвязи *южный ветер – апвеллинг, северный ветер – отсутствие апвеллинга* важное значение имеет учет продолжительности и силы ветра. Поэтому целесообразно ввести условное понятие «ветродень» (по аналогии с градусоднем в метеорологии). За положительные значения примем ветра южных румбов, северные ветра будут иметь отрицательное значение, а западные и восточные – нулевое. Таким образом, величина ветродня ( $Vd$ ) определяется как сумма средней суточной скорости ветра (с соответствующим знаком) за определенное количество дней. В данном случае уместно суммировать значения скорости ветра на день съемки и предшествующие двое суток, что очевидно из вышеприведенных расчетов. Наличие апвеллинга будем обозначать как 1, его отсутствию будет соответствовать цифра 0 (данному параметру присвоим обозначение  $A_v$ ). Полученные результаты можно представить в виде таблицы. Как видно, число случаев возникновения апвеллинга при неблагоприятных ветрах и его отсутствие при южных довольно мало. Причем, иногда весной апвеллинг не возникает и при южных ветрах, а осенью наблюдается даже при ветрах северных румбов. По материалам, используемым в этой работе, отмечается наличие зон подъема вод в сентябре и октябре, когда, по данным В. Б. Красавцева и др. (2000), вертикальные  $TS$ -градиенты исчезают и условия для апвеллинга отсутствуют (табл. 3).

Представленные помесечно ряды  $A_v$  и  $Vd$  характеризуют зависимость возникновения зоны подъема вод у северо-восточного побережья о. Сахалин от продолжительности и силы действия южных ветров, а также – отсутствие подъема вод при ветрах северных румбов. Коэффициент сопряженности этих двух рядов довольно высок ( $K=0,72$ ), что говорит о наличии существенной зависимости между выбранными нами параметрами и подтверждает гипотезу о ветровом происхождении апвеллинга в исследуемом районе. Таким образом, можно утверждать, что при  $Vd=14,5\pm 2,7$  возможно возникновение апвеллинга, что также статистически подтверждают приведенные выше расчеты. При  $Vd=-2,5\pm 2,0$  и менее возникновение апвеллинга маловероятно. Полученные оценки относятся к летнему периоду, с ярко выраженным скачком плотности на глубине залегания термоклина. Как видно из таблицы 3, наибольшие отклонения в значении  $Vd$  наблюдаются в осенние месяцы. Это связано с развитием конвективного перемешивания и выхолаживанием поверхностных вод. Именно в осенний период вносится основная погрешность в полученные результаты.

Таблица параметров, характеризующих возникновение апвеллинга у северо-восточного побережья о. Сахалин

Год	Av	Vd	Год	Av	Vd	Год	Av	Vd	Год	Av	Vd
Июнь			Август			Октябрь			Ноябрь		
1975	0	5	1983	0	2	1974	0	-19	1972	0	-5
1981	0*	15	1984	1	27	1976	0	-15	1972	0	-10
1982	0	-17	1985	0*	13	1980	0	-15	1972	0	-5
1983	1	15	1986	1	24	1981	1	32	1976	0	-24
1984	0	-12	1987	1	27	1984	0	0	1978	0	-12
1985	0	-5	1988	1	19	1985	0	14	1979	0	-7
1986	0*	19	1992	1	5	1986	0	-3	1981	0	5
1988	1	13	Сентябрь			1986	0	-20	1982	0	-1
1989	0*	12	1981	0	8	1987	0	-17	1983	1*	0
1993	0	-20	1982	1	22	1989	0	-10	1983	1*	-10
Июль			1983	1	17	1993	0	0	1984	0	-15
1984	1	25	1984	1	7				1985	0	10
1984	0	7	1985	1*	-12				1987	1	20
1985	0*	19	1986	0	8				Декабрь		
1986	0*	19	1987	1	15				1980	0	-15
1987	1	15	1990	0	0						
1988	1	15									

Примечание. Отмеченным звездочкой значениям Av соответствуют значения Vd, не способные вызывать данное явление.



На основании анализа 56 карт было выделено 19 случаев возникновения апвеллинга в районе шельфовой зоны восточного Сахалина, что дало возможность построить карту возникновения зон подъема вод (рис. 3). Значения наличия или отсутствия зоны подъема вод выбирались с карт авиатемпературной съемки по узлам регулярной сетки с шагом 5' с. ш., 9' в. д. Частота возникновения апвеллинга выражена в абсолютных единицах из числа рассмотренных случаев, а расстояние изолиний от берега характеризует пространственный масштаб зон подъема вод с различной вероятностью.

Рис. 3. Частота возникновения апвеллинга, в абсолютных единицах числа случаев

## ВЫВОДЫ

1. Возникновение апвеллинга у северо-восточного побережья о. Сахалин обусловлено действием Ю, ЮЗ, ЮВ ветров (данное утверждение наиболее надежно для летних месяцев – в связи с более выраженной вертикальной стратификацией вод). Достаточным для подъема вод является воздействие ветров указанных румбов при скорости более 5 м/сек. с продолжительностью более двух суток.

2. В рамках двуслойной модели Йошида (параметры слоев определялись по данным океанологической съемки на разрезе Пильтун–море) вертикальная скорость подъема границы раздела, характеризующей термоклин, составляет 7,8 м/сут., при установившемся апвеллинге (модель Экмана–Свердруп) скорость вертикального подъема вод составляет 0,5–2,5 м/сутки.

3. Максимальная вероятность возникновения апвеллинга (64% от общего числа случаев) характерна для узкой 20-мильной прибрежной зоны между 51 и 53° с. ш. Полностью охватывать шельфовую зону (до 200-метровой изобаты) апвеллинг способен только к югу от 52° с. ш. (да и то лишь в 10% от общего числа случаев), севернее 53° с. ш. вероятность появления на поверхности холодных придонных вод резко падает. Скорее всего, это связано с влиянием стока р. Амур и, соответственно, более устойчивой плотностной стратификацией.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Боуден, К.** Физическая океанография прибрежных вод : [Пер. с англ. яз.] / К. Боуден. – М. : Мир, 1988. – 324 с.

2. Красавцев, В. Б. Формирование апвеллинга на северо-восточном шельфе о. Сахалин под воздействием ветра / **В. Б. Красавцев, К. Л. Пузанков, Г. В. Шевченко** // Тр. ДВНИГМИ. – Владивосток : Дальнаука, 2000. – Темат. вып. № 3. – С. 106–120.

3. **Румянцев, Г. В.** Распределение температуры воды на поверхности и гидрологические фронты в промысловых районах Охотского моря (по данным авиасъемок) / Г. В. Румянцев // Тр. ДВНИГМИ. – 1974. – Вып. 45. – С. 15–23.

4. Чаленко, Г. Г. Сравнительный анализ судовых и авиационных измерений температуры поверхностного слоя воды (на примере Охотского моря) / **Г. Г. Чаленко, Н. Н. Сивакова** // Тр. ДВНИГМИ. – 1972. – Вып. 37. – С. 34–36.

**Полупанов, П. В.** Возникновение и существование апвеллинга у северо-восточного побережья о. Сахалин / П. В. Полупанов // 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, 2007. – Т. 9. – С. 257–263.

Основной задачей, решаемой в данной работе, является определение зон апвеллинга на шельфе северо-восточного побережья острова Сахалин и проверка гипотезы о зависимости возникновения апвеллинга от скорости и продолжительности воздействия южных ветров. Исходным материалом послужили данные авиатемпературных съемок, выполненных СахУГМС с 1972 по 1989 г. (всего 49 карт), и данные, полученные при гидрологических съемках с 1987 по 1993 г. (всего семь карт). Основой для расчетов послужили две модели: модель апвеллинга Экманна–Свердрупа и двухслойная модель Йошида. Из проведенных исследований следует, что возникновение апвеллинга у северо-восточного побережья о. Сахалин обусловлено действием Ю, ЮЗ, ЮВ ветров. Достаточным для подъема вод является воздействие ветров указанных румбов при скорости более 5 м/сек. с продолжительностью более двух суток. Вертикальная скорость подъема границы раздела, характеризующей термоклин, составляет 7,8 м/сут., при установившемся апвеллинге (модель Экмана–Свердрупа) скорость вертикального подъема вод составляет 0,5–2,5 м/сут. Максимальная вероятность возникновения апвеллинга (64% от общего числа случаев) характерна для узкой 20-мильной прибрежной зоны между 51 и 53° с. ш.

Табл. – 3, ил. – 3, библиогр. – 4.

**Polupanov, P. V.** Upwelling along the northeastern coast of Sakhalin Island: origination and existence / P. V. Polupanov // 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, 2007. – Vol. 9. – P. 257–263.

The main task of the work was to determine upwelling zones on the shelf of the northeastern Sakhalin coast and to verify a hypothesis that upwelling origination depends on speed and duration effect of the southern winds. The data of the airplane temperature surveys performed by SakhUGMS since 1972 through 1989 (49 maps) and the data obtained during hydrologic surveys since 1987 through 1993 (7 maps) were used as the initial material. Two models (Ekman–Sverdrup' upwelling and a two-layer Yoshida' model) were used as a base for calculations. The studies have shown that upwelling origination along the northeastern coast of Sakhalin Island is caused by the south, south-west, and south-east winds. The effect of these winds at the speed more than 5 m/sec and duration more than two days is enough to originate the upwelling. A vertical velocity of the upward movement of water border section that characterizes thermocline is 7.8 m/daily; at the steady upwelling (Ekman–Sverdrup' model), velocity of the vertical raise of waters is 0.5–2.5 m/daily. The upwelling origination (64% of the total cases) is maximally probable on the narrow 20-mile coastal zone between 51 and 53° N.

Tabl. – 3, fig. – 3, ref. – 4.