

ПЛОТНОСТЬ СТАМУХ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

д-р геогр. наук Ю.А.ГОРБУНОВ, канд. геогр. наук С.М.ЛОСЕВ,
канд. геогр. наук Л.Н.ДЫМЕНТ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, gia@ari.nw.ru

Представлены результаты анализа плотности стамух, рассчитанной по многолетним данным ледовой авиаразведки в обширных регионах моря и по материалам аэрофотосъемки на отдельных локальных участках. Выявлены закономерности уменьшения плотности стамух с увеличением глубины в основных регионах. Показано, что у открытого Варандейского и отчасти Тиманского берегов наряду с максимумом плотности стамух, формирующимся осенью во вдобереговой полосе с глубинами до 2,5 м, существует второй, менее значительный максимум, проявляющийся вблизи положения средней многолетней границы припая в зоне с глубинами 8,5–10,5 м. Установлено, что значения плотности стамух, осредненные в пределах всего диапазона их осадки, как по данным ледовой авиаразведки, так и по фотосхемам полигонов аэрофотосъемки, зависят от площади обобщения исходной информации и соответствуют одной общей закономерности. На этом основании делается вывод, что, несмотря на специфические особенности и недостатки данных ледовой авиаразведки о стамухах, полученные по ее материалам за 28 лет наблюдений оценки плотности стамух являются вполне достоверными.

Ключевые слова: стамуха, авиаразведка, аэрофотосъемка, плотность стамух.

В связи с возрастанием интереса к природным ресурсам шельфа арктических морей, в последние 20 лет активизировалось изучение ледяных образований, которые необходимо учитывать при реализации здесь хозяйственной деятельности. К числу таких образований относятся стамухи – торосистые нагромождения льда, сидящие на грунте. Они весьма распространены в морях Арктики и встречаются в районах со значениями глубины в основном до 20–25 м.

В настоящее время по материалам ретроспективных ледовых авиаразведок и по спутниковым снимкам во всех арктических морях России определены области распространения стамух, рассчитаны функции распределения их осадки, проанализированы межгодовые изменения количества этих образований [4, 5, 7], выявлены случаи существования многолетних стамух и оценена продолжительность их «жизни» [2, 6]. Для некоторых локальных районов на основе материалов аэрофотосъемки, радиолокационной съемки, а также прямых измерений, выполненных на льду, установлены размеры стамух [3, 8, 9].

Что касается плотности стамух, которая является мерой их концентрации в некоторой зоне и равна $q = n/S$, где n – число стамух в зоне, а S – ее площадь, то первые оценки q были получены по материалам аэрофотосъемки в Восточно-Сибирском море [9]. Съемка осуществлялась в масштабе 1:50000 с целью определения векторов скорости дрейфа льда в июле 1969 г. и в августе 1971 г. на участке протяженностью 120 км и шириной около 9 км между мысом Большой Баранов и островом Четырехстолбовой. Выделение стамух в дрейфующем льду выполнялось по отсутствию их перемещения за промежуток времени между повторными съемками, которые производились трижды с интервалом 4 часа. Глубина моря на большей части участка не превышала 20 м. Все учтенные стамухи находились на удалении более 150 м от берега на глубинах не менее 7–10 м.

Плотность стамух рассчитывалась по квадратам 5×5 км. Количество квадратов в 1969 и в 1971 гг. было одинаковым и равным 13. Площадь области со стамухами каждый раз составляла 325 км^2 . Анализ полученных данных показал, что значения q имели существенные пространственные различия. Максимальная плотность в квадратах в 4–5 раз превышала минимальную ее величину. При этом зоны с повышенными и пониженными значениями q в обоих случаях совпадали. Ниже представлены характеристики плотности, полученные в результате обобщения сведений, приведенных в указанной работе:

Дата аэрофотосъемки	Число обнаруженных стамух	q_{\min} , км^{-2}	q_{\max} , км^{-2}	$q_{\text{ср.}}$, км^{-2}
26.07.1969	207	0,24	1,12	0,64
21.08.1971	175	0,16	0,60	0,54

Поскольку в 1971 г. наблюдения проводились на месяц позже, значения характеристик плотности, вследствие таяния и разрушения стамух, оказались несколько меньше, чем в 1969 г.

На основе материалов ледовой авиаразведки с 1985 по 1990 г. были рассчитаны значения плотности стамух в Сахалинском заливе и в прибрежной зоне северо-восточного шельфа острова Сахалин [1]. Из приведенных в этой работе данных следует, что здесь пространственная неоднородность плотности и ее изменения во времени еще более выражены. Так, в прибрежной полосе северо-восточного шельфа на глубинах меньше 10 м осредненные за 5 лет значения q на девяти локальных участках составляли от 0,1 до $0,5 \text{ км}^{-2}$, а за отдельные годы – от 1 до 2 км^{-2} . Весной плотность стамух имела наибольшие значения. В апреле средняя ее величина на участках изменялась от 2,6 до $27,1 \text{ км}^{-2}$, а максимальные значения за отдельные годы от 9 до 75 км^{-2} . На глубинах больше 10 м плотность стамух была намного меньше. Средние ее значения в апреле варьировали от 0,3 до $8,2 \text{ км}^{-2}$, а максимальные – от 2 до 12 км^{-2} .

Обобщенные за ряд лет данные о плотности стамух в арктических морях пока отсутствуют. Вместе с тем такие сведения, безусловно, представляют значительный интерес, поскольку позволяют решать ряд задач важных как в прикладном, так и в научном отношении. К их числу применительно к конкретному району можно, например, отнести анализ степени устойчивости припая к воздействию динамических факторов в зависимости от плотности вмерзших в него стамух, выявление хода плотности стамух в годовом ледовом цикле, оценку изменения плотности с изменением глубины моря. В прикладном плане особенно важным является то обстоятельство, что с увеличением плотности этих образований возрастает их опасность для судоходства, а также для трубопроводов и кабелей связи, проложенных по морскому льду. Сведения о плотности стамух в прибрежных районах могут быть полезными при выборе мест для возведения гидротехнических сооружений. В Печорском море, где уже проводится заправка танкеров нефтью от трубопровода на морском дне и ожидается дальнейшее расширение работ по освоению шельфа, отмеченные аспекты являются особенно актуальными.

Для оценки плотности стамух в этом море использованы материалы как аэрофотосъемки, так и ледовой авиаразведки. Аэрофотосъемка производилась на ряде отдельных полигонов в прибрежной зоне от поселка Варандей до мыса Полярный при выполнении экспедиционных исследований в апреле 1999, 2001 и 2003 гг. Съемки осуществлялись в масштабе 1:3000 – 1:5000 с целью определения характеристик грядовой торосистости припая. Благодаря крупному масштабу аэроснимков, на них, наряду с торосами, отобразились и стамухи, вмерзшие в неподвижный лед. Их местоположение определялось по смонтированным из аэроснимков фотограммам, на каждой из которой воспроизводилась сетка географических координат.

Карты ледовой авиаразведки использованы за период с 1964 по 1991 г. Их привлечение позволило существенно увеличить объем исходной информации и охватить

районы, в которых аэрофотосъемка не выполнялась. Сведения, полученные на основе выборочной аэрофотосъемки у Варандейского берега, также в значительной мере были пополнены данными ледовой разведки. В итоге оценки плотности стамух удалось установить в пределах почти всей области их распространения в Печорском море.

Перейдем к анализу результатов расчета. Сначала обратимся к значениям q , вычисленным по данным аэрофотосъемки (табл. 1). Из них следует, что у открытого Варандейского берега плотность стамух в пределах полигонов в апреле близка к ее значениям, осредненным за отдельные годы по локальным участкам прибрежной зоны северо-восточной части острова Сахалин в весенний период. В то же время она на 1–2 порядка превышает средние значения плотности в Восточно-Сибирском море в июле–августе. Столь большие различия величины q , как увидим в дальнейшем, вызваны в основном значительной разницей пространственных масштабов обобщения данных. Сказывается, очевидно, и несовпадение сроков выполнения наблюдений, а также особенностей ледовых условий в регионах сравниваемых характеристик. Вместе с тем данные табл. 1 свидетельствуют о том, что у Варандейского берега, как и в рассмотренных регионах, проявляются довольно значительные межгодовые различия величины q и ее неоднородность в пространстве. Так, на полигоне аэрофотосъемки, выполненной в 1999 г. поблизости от поселка Варандей (зона 2), средняя плотность стамух составляла около 6 км^{-2} , а в 2003 г. она почти в этом же месте (зона 4) достигала 24 км^{-2} .

Значения q , полученные в 1999 г. на полигоне у мыса Полярный (зона 1) и на маршруте съемки в прибрежной полосе моря от устья реки Песчанки до мыса Полярный (зона 5), различаются в 3 раза. При этом на аэроснимках прибрежного маршрута отмечалась локальная зона с тремя скоплениями стамух. В ее пределах величина q была равна $90,0 \text{ км}^{-2}$. Зона повышенной плотности с $q = 55,6 \text{ км}^{-2}$ существовала и мористее мыса Полярный.

Неоднородность плотности стамух в области их распространения вызвана в основном пространственными изменениями глубины моря. На банках и отмелях стамух, как правило, образуется больше, чем в более приглубых соседних зонах. Представляет интерес оценить и проанализировать плотность стамух по зонам с различными значениями глубины моря. Основой для такого анализа послужили сведения о стамухах, собранные ледовой разведкой за 28 лет ее выполнения. Используемые данные были представлены тремя совокупностями, сформированными по отдельным районам моря. Первая из них относится к Печорской и Паханческой губам. Их общую акваторию по существу можно считать акваторией закрытого района. Во вторую совокупность включены данные, полученные по району, который прилегает с севера к Хайпудырской губе. С запада и востока он ограничен меридианами $59^{\circ} 15'$ и $60^{\circ} 40'$ в.д. Сама губа и восточная половина ее горла в область расчета не вошли, поскольку стамухи здесь не были обнаружены. В дальнейшем этот район для краткости будем называть

Таблица 1

Плотность стамух в припае у Варандейского берега по данным аэрофотосъемки

Характеристика	Место и год аэрофотосъемки				
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5
	1999	2001	2001	2003	1999
Площадь АФС S , км^2	6,86	10,73	1,74	2,25	7,50
Число стамух n	44	63	21	54	158
Плотность стамух q , км^{-2}	6,414	5,874	12,062	23,979	21,067

Зона 1 – мористее мыса Полярный, зона 2 – в 7 км к северо-востоку от пос. Варандей, зона 3 – в 3,5 км к северо-востоку от устья реки Песчанки, зона 4 – полоса шириной 0,5 км от берега у пос. Варандей до границы припая, зона 5 – прибрежная полоса шириной 0,5 км от устья реки Песчанки до мыса Полярный

районом подходов к Хайпудырской губе. Он не является в полной мере закрытым, т.к. с севера свободно сообщается с открытой акваторией моря.

В третьей совокупности объединены данные, которые относятся к стамухам, формирующимся на трех участках прибрежной зоны: у открытого Тиманского берега от острова Сенгейский до мыса Русский Заворот, в полосе моря к северу от гряды островов Гуляевские Кошки и в прибрежной зоне у открытого Варандейского берега от острова Песякова до мыса Полярный. В целом данные третьей совокупности можно считать данными прибрежной зоны открытого берега. Ее протяженность составляет 125 км, а ширина по нормали к суше варьирует от 3 до 65 км. Все выделенные акватории в основном соответствуют участкам однотипного припая [11]. На каждом из них условия его образования характеризуются определенными особенностями, которые оказывают влияние и на формирование стамух.

При оценке значений q учитываются географические координаты φ , λ каждой стамухи и глубина моря h в соответствующей им точке. Координаты определялись по картам ледовой авиаразведки, а глубина – по морским картам масштаба 1:100000 или 1:200000. Величина h может быть отождествлена с осадкой стамух. Зоны различной глубины, по которым рассчитывалась плотность стамух, выделялись при шаге $\Delta h = 2$ м начиная с $h = 0,5$ м. Значения площади этих зон получены путем непосредственного их измерения между представленными в картированном виде изолиниями осадки, отделяющими зоны друг от друга.

Из результатов расчета величины q (табл. 2) следует, что наиболее низкие ее значения отмечаются в Печорской и Паханческой губах, а наиболее высокие – в районе подходов к Хайпудырской губе. В зонах с равной осадкой стамух величина их плотности в этих районах различается в 2,3–3,7 раза. В то же время значения q , обобщенные в пределах всего диапазона глубины от 0,5 до 14,5 м, различаются только в 1,7 раза.

Наибольшая плотность стамух отмечается в мелководной прибрежной зоне со значениями глубины 0,5–2,5 м. Далее до глубины 4,5 м величина q уменьшается весьма интенсивно, а затем более замедленно. Зависимость q от h аппроксимируется степенной функцией (рис. 1)

$$q = kh^m.$$

Таблица 2

Плотность стамух в зонах различной глубины по данным ледовой авиаразведки

Интервалы осадки стамух в зоне $h_i - h_{i+1}$ (м)	Печорская и Паханческая губы			Подходы к Хайпудырской губе			Прибрежная зона открытого берега		
	S_i	n_i	q_i	S_i	n_i	q_i	S_i	n_i	q_i
0,5–2,5	1187,08	154	0,130	127,55	62	0,486	396,91	136	0,343
2,5–4,5	1179,19	72	0,061	352,07	53	0,151	567,64	70	0,123
4,5–6,5	855,69	42	0,049	332,41	37	0,111	1048,37	54	0,052
6,5–8,5	209,04	7	0,033	371,59	33	0,089	1441,04	51	0,035
8,5–10,5	85,58*	2	0,023*	439,09	31	0,071	707,35	65	0,092
10,5–12,5	103,43*	2	0,019*	118,56	7	0,059	547,41	37	0,068
12,5–14,5	60,62*	1	0,016*	18,94*	1	0,053*	677,77	24	0,035
14,5–16,5	–	–	–	–	–	–	465,59	8	0,017
16,5–18,5	–	–	–	–	–	–	92,3*	1	0,011*
18,5–20,5	–	–	–	–	–	–	138,8*	1	0,007*
Все интервалы	3680,63	280	0,0761	1760,21	224	0,1273	6083,18	447	0,073

Обозначения: S_i – площадь зоны (км²), n_i – число стамух, q_i – плотность стамух (км⁻²)

Ниже приведены параметры k и m этого уравнения, установленные по фактическим данным:

Район	k	m
Печорская и Паханчская губы	0,218	-0,992
Район подходов к Хайпудырской губе	0,485	-0,852

Коэффициенты детерминации полученных аппроксимаций равны соответственно 0,978 и 0,954. Большие значения коэффициентов свидетельствуют о том, что в каждом районе зависимость q от h близка к функциональной.

При наличии в интервалах осадки всего одной-двух стамух границы соответствующих им зон становятся весьма неопределенными, что исключает возможность непосредственного измерения их площадей и вычисления плотности. В таком случае приводимые в табл. 1 значения q_p , обозначенные звездочками, рассчитаны по установленным уравнениям для среднеинтервальных значений осадки $\tilde{h}_i = (h_i + h_{i+1})/2$. Соответствующие данным интервалам оценки площади S_p , также обозначенные звездочками, вычислены по соотношению $S_i = n_i/q_p$, где n_i — число стамух в интервале. С учетом расчетных значений S_i для каждого района определены общая площадь области распространения стамух $\sum S_i$ и средняя величина $\bar{q} = \sum n_i / \sum S_i$. Поскольку доля рассчитанных таким путем площадей в суммарной площади каждой совокупности невелика (от 1 до 7 %), можно полагать, что они практически не вызвали значительных погрешностей в осредненных по совокупностям значениях плотности стамух.

Пониженная плотность стамух в Печорской и Паханчской губах обусловлена локальной спецификой их географических условий. Как уже отмечалось, обе губы в совокупности представляют собой закрытую акваторию с опресненной водой, в результате чего замерзание и становление припая происходят здесь довольно спокойно. При средних гидрометеорологических условиях замерзание губы отмечается обычно в конце октября, торосистость льда при этом равна 1–2 балла. Припай развивается от прибрежных мелководных районов в сторону более глубоководной части акватории. Первые стамухи возникают при нажимных ситуациях на мелководьях. По мере увеличения ширины припая процесс их образования также смещается в зоны большей глубины. В конце ноября—начале декабря, когда припай уже полностью покрывает всю поверхность акватории, образование стамух в основном прекращается. Таким образом, продолжительность периода образования стамух здесь весьма невелика, а их формирование происходит в основном

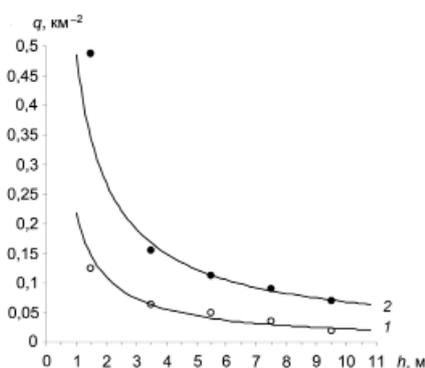


Рис. 1. Изменение плотности стамух с увеличением глубины моря в Печорской и Паханчской губах (1) и в районе подходов к Хайпудырской губе (2)

**Характеристики плотности и осадки стамух в районах Печорского моря
по данным ледовой авиаразведки**

Район	Параметр						
	S	n	q	$h_{\text{ср.}}$	h_{max}	σ_h	$\sigma_h/h_{\text{ср.}}$
Печорская и Паханчская губы	3680,63	280	0,076	3,12	14,0	1,80	0,577
Подходы к Хайпудырской губе	1760,21	224	0,127	5,09	13,0	3,03	0,595
Прибрежная зона у открытого берега	6083,18	447	0,073	5,83	20,0	4,09	0,702

Обозначения: S – площадь распространения стамух (км^2), n – количество стамух, q – плотность стамух (км^{-2}), $h_{\text{ср.}}$ – средняя осадка стамух (м), h_{max} – максимальная осадка стамух (м), σ_h – стандартное отклонение осадки стамух (м), $\sigma_h/h_{\text{ср.}}$ – коэффициент вариации

из молодого, то есть довольно тонкого льда, который преобладает в это время. Оба обстоятельства при прочих равных условиях снижают как количество стамух, образующихся на единице площади, так и их осадку. Средняя величина последней составляет около 3 м (табл. 3), а средняя плотность равна $0,076 \text{ км}^{-2}$. Коэффициент вариации осадки стамух ($\sigma_h/h_{\text{ср.}}$) в этом районе также имеет наименьшее значение.

Поскольку район подходов к Хайпудырской губе в отличие от предыдущего не является полностью закрытым, динамические процессы в ледяном покрове происходят здесь довольно интенсивно. Нажимные ситуации, сопровождающиеся сжатиями и торошением льда, а также формированием стамух, возможны при ветрах восточной, западной и особенно северной четвертей. Образованию стамух в районе способствует и рельеф дна. Кроме прибрежных мелководий в районе имеется ряд банок со значениями глубины 4–10 м. Зимой случается взлом припая на отдельных участках, в результате чего на акватории, которая уже была покрыта неподвижным льдом, снова складываются условия, благоприятные для торошения льда и образования стамух. Однако теперь в эти процессы вовлекается лед, толщина которого с течением времени увеличилась. При таком ходе процессов средняя величина как осадки стамух (5,09 м), так и их плотности ($0,1273 \text{ км}^{-2}$) оказываются больше, чем в Печорской и Паханчской губах.

В прибрежной зоне с открытым берегом динамические процессы в ледяном покрове, как и в предыдущем районе, характеризуются значительной интенсивностью. При средних условиях у Варандейского берега устойчивый припай шириной 2–5 км устанавливается только в конце февраля–марте, когда толщина льда достигает

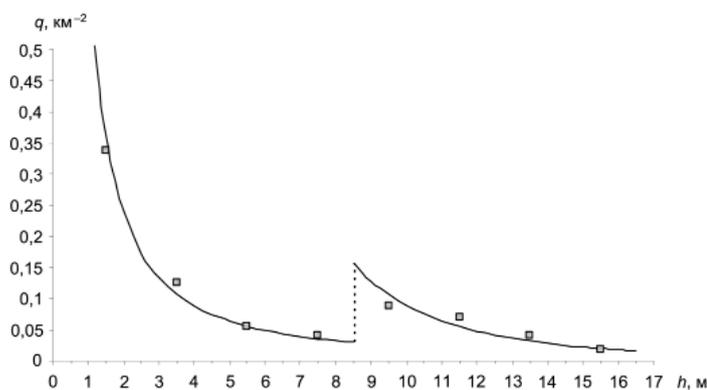


Рис. 2. Изменение плотности стамух с увеличением глубины моря в прибрежной зоне открытого берега по данным ледовой авиаразведки

50–70 см [10]. В случаях сильного и даже умеренного ветра северного или северо-западного направления в припайной зоне происходят интенсивные сжатия и तोрошения льда. Вдоль границы припая возникают крупные гряды и барьеры торосов, засташенные на отдельных участках. Максимальная осадка стамух, образующихся в данном районе при таких условиях, на 6–7 м больше, чем в районах, рассмотренных выше. Коэффициент вариации осадки стамух здесь также наибольший.

В изменении плотности стамух с увеличением глубины моря в прибрежной зоне открытого берега проявляется интересная особенность. После уменьшения значений q в интервалах осадки от 0,5–2,5 м до 6,5–8,5 м при переходе к следующему интервалу 8,5–10,5 м плотность увеличивается в 2,6 раза (табл. 2). Затем она снова уменьшается, сначала сравнительно интенсивно, а далее более замедленно. Приближенно можно считать, что на границе двух указанных интервалов, то есть при $h = 8,5$ м, происходит скачок плотности стамух и параметры функции $q = kh^m$ становятся иными (рис. 2). Ниже приводятся их значения для обеих частей функции:

	k	m	R
при $0,5 \leq h < 8,5$	0,646	–1,436	0,990
при $8,5 \leq h < 20,5$	236,98	–3,423	0,944

Значения q , вычисленные для $h = 8,5$ м по обоим уравнениям, соответственно составляют 0,030 и 0,156 км^{–2}, и, следовательно, скачок функции $q = 0,126$ км^{–2}.

Для того чтобы понять причину этого явления, обратимся к рис. 3, на котором представлены результаты обобщения части данных третьей совокупности. Они относятся к участку между меридианами 57° 23' в.д. и 58° 54' в.д. На этом участке наблюдалось повышенное количество стамух. Ширина участка увеличивается с 8 км у западного края до 30 км у восточного и в среднем составляет 16,35 км.

Кривая 1 на рис. 3, характеризующая увеличение глубины моря по мере удаления от берега d , является итогом осреднения значений h , снятых с семи профилей, выбранных в пределах рассматриваемой зоны по нормали к береговой черте при удалении 6–7 км друг от друга. На каждом профиле расстояние d определялось до точек со значениями глубины 1,5; 3,5; 5,5 м, ..., до середины зон, по которым рассчитывалась плотность стамух. По данным всех профилей никаких поднятий дна на участке не обнаружено. Средняя глубина при значениях d до 5 км возрастает довольно интенсивно, а затем более замедленно. Средние уклоны дна на этих участках соответственно составляют $2,14 \times 10^{-3}$ и $4,27 \times 10^{-4}$, то есть различаются в 5 раз.

В изменении плотности стамух с увеличением d отмечается четко выраженный скачок, подобный тому, который проявляется в данных всей третьей совокупности с изменением глубины моря h . Однако здесь величина скачка более значительна. Расстояние от него до берега приближенно равно 3,5 км. Ордината, соответствующая этому расстоянию, пересекается с кривой изменения глубины при $h \approx 8,6$ м. Это практически совпадает с величиной осадки стамух, при которой происходит скачок функции $q = f(h)$, установленной по всем данным третьей совокупности.

Характеристики плотности стамух, их осадки и эмпирические параметры показательной функции $q = kh^m$, рассчитанные по участку, имеют следующие значения:

S , км ²	n	$q_{\text{ср.}}$, км ^{–2}	$h_{\text{ср.}}$, м	$h_{\text{макс.}}$, м	σ_h , м	$\sigma_h / h_{\text{ср.}}$	k_1	m_1	k_2	m_2
816,389	265	0,325	5,00	16,0	3,94	0,788	2,34	–1,062	$3,81 \cdot 10^7$	–7,948

Параметры m и k для первой (до скачка) и второй частей функции обозначены соответственно цифрами 1 и 2. Плотность стамух, обобщенная в пределах участка, существенно больше плотности, рассчитанной по всему району с открытым берегом (см. табл. 3). В то же время среднее и максимальное значения осадки здесь несколько меньше.

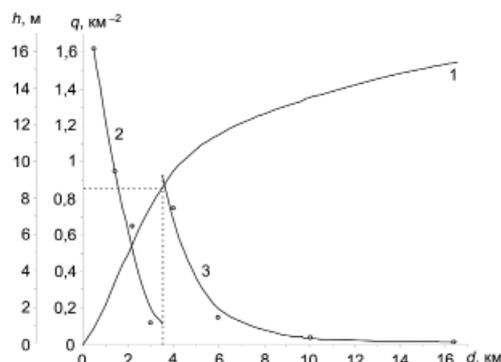


Рис. 3. Изменение глубины моря и плотности стамух с удалением от береговой черты в прибрежной полосе у открытого Варандейского берега между меридианами 57°23' в.д. и 58°54' в.д.

Поскольку в рассматриваемой полосе моря банки или поднятия дна отсутствуют, остается предположить, что скачок плотности стамух на удалении около 3,5 км от берега обусловлен влиянием границы припая. Поэтому обратимся к информации о его распространении в зоне анализируемых характеристик.

Согласно обобщенным данным, представленным в картированном виде, в период наибольшего развития неподвижного льда (конец марта—апрель), когда он сохраняет довольно стабильное положение, расстояние от берега до средней многолетней границы припая составляет здесь от 3,1 до 3,9 км и в среднем равно 3,6 км. Как видим, расстояние до скачка плотности стамух хорошо соответствует этой величине.

Наличие скачка плотности стамух при переходе от зоны со значениями глубины 6,5–8,5 м к зоне, в которой они составляют 8,5–10,5 м, проявилось и по данным разовой аэрофотосъемки (табл. 4), выполненной в апреле 2001 г. северо-восточнее поселка Варандей. Полигон располагался в средней части рассматриваемого участка и составлял лишь 1,3 % от площади последнего. На фотосхеме полигона вблизи берега на мелководье с глубинами $h < 2,5$ м отмечалась сплошная беспорядочная торосистость, среди которой распознать стамухи было невозможно даже на крупномасштабных аэрофотоснимках. По этой причине в табл. 4 первый интервал глубин отсутствует.

Ниже приводятся статистические характеристики осадки стамух на полигоне и параметры аппроксимации зависимости q от h :

$h_{\text{ср.}}$, М	h_{max} , М	σ_h , М	$\sigma_h/h_{\text{ср.}}$	k_1	m_1	k_2	m_2
6,61	14,2	3,32	0,502	13425	-4,34	44738	-4,057

Значения плотности стамух, рассчитанные по аппроксимации до скачка, являются довольно приближенными, после него – близки к фактическим значениям q .

Таким образом, в полосе моря с открытым берегом около места дислокации средней многолетней границы припая в период его максимального развития, когда положение границы наиболее стабильно, проявляется второй максимум плотности стамух. Он приходится на район с глубинами 8,5–10,5 м. Очевидно, что как первый максимум, который образуется осенью в начале развития припая в непосредственной близости от берега на глубинах 0,5–2,5 м, так и второй, появляющийся весной у границы припая, формируются в основном при нажимных ветрах северной четверти. В связи с тем, что в зоне второго максимума глубина моря существенно больше, чем в зоне первого, величина плотности стамух здесь меньше плотности в зоне первого максимума (см. табл. 2).

Поскольку плотность стамух, рассчитанная по материалам ледовой авиаразведки, во много раз меньше ее значений, установленных по фотосхемам полигонов аэро-

Таблица 4

**Плотность стамух в зонах различной глубины на полигоне аэрофотосъемки
между меридианами 58°08'–58°14' в.д. в апреле 2001 г.**

Характеристика	Интервалы осадки стамух, м						
	2,5– 4,5	4,5– 6,5	6,5– 8,5	8,5– 10,5	10,5– 12,5	12,5– 14,5	2,5– 14,5
Площадь зоны S , км ²	0,503	0,964	1,323	2,222	4,709	1,004	10,725
Число стамух n	27	11	2	10	12	1	63
Плотность стамух q , км ⁻²	53,678	11,411	1,512	4,500	2,548	0,996	5,874

фотосъемки, может сложиться представление, что результаты расчетов по данным первого вида наблюдений занижены и не вполне достоверны. Формированию такого мнения способствует и специфика ледовой авиаразведки. При каждом ее выполнении галсы маршрута полета располагаются обычно далеко друг от друга, и наблюдениями покрывается весьма незначительная площадь моря. Даже в условиях хорошей видимости характеристики льда определяются в полосе весьма ограниченной ширины. При сложных же погодных и ледовых условиях бортнаблюдатель бывает настолько загружен, что физически не в состоянии фиксировать все стамухи, встречающиеся в зоне наблюдения. Иначе говоря, во время выполнения ледовой авиаразведки из общего числа стамух, имеющих в море, каждый раз фиксируется лишь небольшая их часть. Вместе с тем нельзя не учитывать, что этот недостаток в значительной мере может компенсироваться многократным повторением разведок с использованием разных галсов, причем такие наблюдения в Печорском море осуществлялись в течение 28 лет.

В отличие от авиаразведки при использовании аэрофотосъемки на фотосхемах полигонов, за исключением редких случаев, опознаются практически все стамухи, которые имелись в зоне наблюдений и, следовательно, достоверность рассчитываемых значений q не вызывает сомнения. Однако этот вид наблюдений также имеет свои особенности.

Основная цель аэрофотосъемочных работ у Варандейского берега заключалась в получении исходных данных, необходимых для последующего гидротехнического проектирования. По этой причине съемка производилась на участках припая с повышенной торосистостью и наиболее крупными грядами, а значит, и с повышенной плотностью стамух. Площадь полигонов, кроме одного (табл. 1), составляла менее 8 км². Значения q , осредненные в рамках полигона или участка аэрофотосъемки

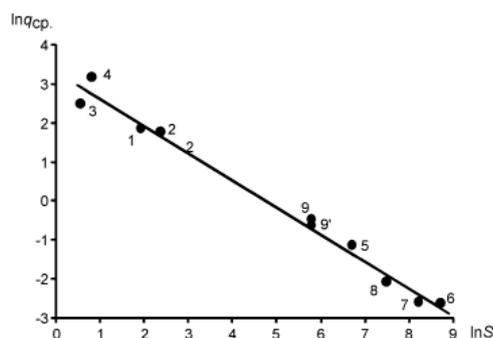


Рис. 4. Изменение плотности стамух, осредненной по всем диапазонам их осадки, в рамках выделенных акваторий в зависимости от площади обобщения данных:

1 – полигон у мыса Полярный, 1999 г.; 2 – полигон у пос. Варандей, 2001 г.; 3 – полигон вблизи устья реки Песчанки, 2001 г.; 4 – маршрут аэрофотосъемки поперек припая в районе пос. Варандей, 2003 г.; 5 – зона у Варандейского берега между меридианами 57°23' и 58°54' в.д.; 6 – вся прибрежная зона у открытого берега; 7 – Печорская и Паханчская губы; 8 – район подходов к Хайпудырской губе; 9, 9' – маршрут аэрофотосъемки в южной части Восточно-Сибирского моря 1969 и 1971 гг. соответственно.

с охватом всего диапазона осадки стамух, при столь целенаправленной выборочной аэрофотосъемке близки к максимальным для таких площадей осреднения данных. Понятно, что с увеличением области их обобщения, в результате неизбежного попадания в нее локальных участков с пониженным числом стамух и даже с полным их отсутствием, средняя величина q_{cp} будет уменьшаться.

Анализ значений плотности, осредненных по районам моря площадью от 800 до 6000 км² и по весьма ограниченным участкам величиной в несколько квадратных километров, показал, что величина q_{cp} действительно зависит от площади обобщения данных S (рис. 4). Положение точек, соответствующих логарифмам этих характеристик, относительно осей координат для каждого региона или участка обозначено на рисунке разными символами. Кроме того, маркеры, относящиеся к данным аэрофотосъемки и ледовой авиаразведки, представлены черным и серым цветом соответственно.

Из рис. 4 следует, что, несмотря на принадлежность анализируемых характеристик к разным регионам и участкам моря, они тем не менее подчиняются общей закономерности. Для нее установлено следующее эмпирическое уравнение:

$$q_{cp} = 27,6S^{-0,697}.$$

При расчете параметров приведенной аппроксимации характеристики S и q_{cp} учитывались по всем рассмотренным регионам и участкам моря. Опущены только данные, относящиеся к вдольбереговому маршруту аэрофотосъемки от устья реки Песчанки до мыса Полярный (зона 5, табл. 1). Полоса фотографирования приходилась здесь в основном на зону максимальной плотности стамух с глубиной $h < 2,5$ м. Ширина зоны была близка к 1 км. Поскольку ширина полосы съемки в масштабе 1:3000 составляет всего около 500 м, стамухи с большей осадкой в нее не попадали или фиксировались лишь частично. На других полигонах аэрофотосъемка производилась от берега до границы припая или почти до нее с фиксированием стамух во всем диапазоне их осадки. По изложенной причине характеристики зоны 5 оказались неадекватными характеристикам остальных зон и не были учтены при определении аппроксимации $q_{cp} = f(S)$. Естественно, что не могли учитываться также значения S , установленные по материалам аэрофотосъемки в южной части Восточно-Сибирского моря, хотя значения и соответствуют общей закономерности.

Исходя из полученных результатов, можно сделать еще один важный вывод. Суть его заключается в следующем. Поскольку средние значения плотности стамух, рассчитанные по акваториям с разной величиной площади по материалам ледовой авиаразведки за длительный ряд наблюдений и по данным разовых аэрофотосъемок, подчиняются общей закономерности, можно утверждать, что оценки q , полученные по материалам авиаразведки, являются вполне достоверными и считать их заниженными нет основания.

Параметры k и m в функциях, выражающих зависимость q от h в регионах моря, также связаны с величиной площади обобщения данных. Однако для определения аналитического выражения такой связи и создания на этой основе метода расчета плотности стамух с учетом площади заданной зоны и ее средней глубины данных пока не достаточно.

ВЫВОДЫ

1. В Печорской и Паханческой губах, а также в районах подходов к Хайпудырской губе наибольшая плотность стамух наблюдается в непосредственной близости от берега в зоне с глубиной до 2,5 м и составляет 0,13–0,49 км⁻². Далее она уменьшается и на глубине 10–14 м составляет 0,2–0,06 км⁻². Изменение q с увеличением глубины описывается степенной функцией.

2. В районе открытого Варандейского и отчасти Тиманского берегов наряду с максимумом плотности стамух в зоне со значениями $h < 2,5$ м проявляется наличие второго максимума. Он формируется весной в зоне, прилегающей к средней

многолетней границе припая с глубинами от 8,5 до 10,5 м. В зонах первого и второго максимумов плотность равна соответственно 0,34 и 0,09 км⁻².

3. Плотность стамух, осредненная с охватом всего диапазона их осадки в рамках обширных регионов моря и отдельных локальных участков, зависит от площади обобщения данных и уменьшается с увеличением последней. Изменение q_{cp} с изменением S выражается степенной функцией.

4. Оценки плотности стамух, рассчитанные по регионам моря на основе материалов ледовой авиаразведки за 28 лет наблюдений, несмотря на ее специфические особенности, вполне достоверны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря. СПб.: «Прогресс–Погода», 1997. 182 с.
2. Бородачев В.Е., Комов Н.И., Дворкин Е.Н. Многолетние стамухи в Карском море // Труды ААНИИ. 1990. Т. 418. С. 107–115.
3. Горбунов Ю.А. Стамухи в юго-восточной части моря Лаптевых // «Полэкс–Север-76». Ч. II. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 107–110.
4. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи Баренцева и Карского морей // Ледяные образования морей Западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 61–66, 70–81.
5. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи Восточно-Сибирского и Чукотского морей // Материалы гляциологических исследований. 2007. Вып. 102. С. 41–47.
6. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Многолетние стамухи в арктических морях сибирского шельфа // Известия РГО. 2007. Т. 13. Вып. 3. С. 86–89.
7. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 2(79). С. 111–116.
8. Гудошников Ю.П., Зубакин Г.К., Наумов А.К. Морфометрические характеристики стамух по данным прямых измерений и стереофотосъемки в юго-восточной части Баренцева моря // Ледяные образования морей Западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 66–70.
9. Лосев С.М., Горбунов Ю.А. Изучение стамух по аэрофотоснимкам // Труды ААНИИ. 1977. Т. 343. С. 127–132.
10. Спичкин В.А. Характеристики межгодовой и пространственной изменчивости сроков становления припая в юго-восточной части Баренцева моря // Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей. СПб.: ААНИИ, 2004. С. 245–247.
11. Спичкин В.А. Типизация распространения припая // Ледяные образования морей западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 51–58.

YU.A.GORBUNOV, S.M.LOSEV, L.N.DYMENT

DENSITY OF STAMUKHAS IN THE PECHORA SEA

The article presents the results of analysis of the density of stamukhas calculated from multiyear data of airborne ice reconnaissance in the extensive sea regions and on the basis of aerial photography in some local areas. Regularities of the decreasing density of stamukhas with increasing depth were revealed in the main regions. It is shown that near the open Varandey and partly Timansky shores along with the maximum density of stamukhas, formed in autumn in the coastal strip with depths up to 2,5 m, there is a second less significant maximum manifested near the location of the mean multiyear boundary of landfast ice in a zone with depths of 8,5–10,5 m. It was determined that the values of the density of stamukhas averaged within the entire range of their draft both from airborne ice reconnaissance and from photo-schemes of aerial photography polygons, depend on the area of generalization of initial information and correspond to a common regularity. Based on this, a conclusion is made that in spite of specific peculiarities and disadvantages of airborne ice reconnaissance data on stamukhas obtained from its materials for 28 years of observations, the estimates of the density of stamukhas are quite reliable.

Keywords: stamukha, airborne reconnaissance, aerial photography, density of stamukhas