

В.И. Воробьев, И.В. Розанова, А.П. Кебич

**АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ УСПЕШНОГО
ОБЗОРА АНТАРКТИДЫ И ПРИАНТАРКТИЧЕСКОЙ
АКВАТОРИИ ЮЖНОГО ОКЕАНА В НАВИГАЦИОННЫЙ
ПЕРИОД С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

V.I. Vorobyev, I.V. Rozanova, A.P. Kebich

**A PRIORI PROBABILITY OF SUCCESSFUL SCANNING
OF THE ANTARCTIC CONTINENT AND ADJACENT WATER
AREAS OF THE SOUTHERN OCEAN OVER
THE NAVIGATION PERIOD USING OPTICAL SATELLITE
MEASURING SYSTEMS**

Приводятся и рассматриваются результаты вероятностной оценки возможности использования спутниковых оптических систем для обзора состояния поверхности Антарктиды и ледового покрова прилегающей к ней акватории Южного океана в навигационный (теплый) период года. На основе анализа периодичности, с которой может быть получена полезная информация от этих систем, делается вывод, что наиболее эффективно их можно использовать над континентом Антарктиды и сравнительно узкой прибрежной частью Южного океана

Results of probability estimation of the potential to employ optical satellite systems in order to scan the surface conditions of the Antarctic Continent and ice cover of the adjacent water areas of the Southern Ocean over the navigation (warm) season are presented and considered. Based on analysis of the periodicity with which useful information can be obtained from these systems, a conclusion is made that their employment is efficient over the Antarctic Continent and the comparatively narrow coastal belt of the Southern Ocean.

Одним из важных направлений практических приложений результатов научных исследований Антарктиды и Южного океана является совершенствование методов гидрометеорологического обеспечения научных работ в Антарктике и плавания научных, транспортных, рыболовческих и других судов в приантарктических водах Южного океана, которые практически в течение всего года имеют ледовый покров. Поэтому получение информации о его состоянии и эволюции в навигационный период, так же как и обеспечение экспедиционных работ на континенте в это время года, является одной из приоритетных задач, которую приходится решать гидрометеорологам.

Ледовый покров приантарктической акватории Южного океана в навигационный период обладает сложной пространственной структурой, состоящей из многих элементов, изменчивых во времени. Это требует систематических наблюдений за его состоянием. Такой мониторинг возможно осуществить

только с помощью космических средств наблюдения. Использование спутниковых измерительных систем оптического диапазона для глобального мониторинга состояния окружающей среды и идентификации наземных объектов из космоса, дистанционное зондирование подстилающей поверхности с помощью орбитальных лидаров показали, что их эффективное применение невозможно без учета экранирующего влияния облачности. Ее наличие на линии визирования измерительной аппаратуры может осложнить процесс получения полезной информации о состоянии подстилающей поверхности, в том числе и о состоянии ледового покрова приполюсных океанических акваторий. В то же время следует иметь в виду, что наблюдения из космоса в оптическом диапазоне обладают наибольшей разрешающей способностью и являются наиболее надежным источником информации о состоянии подстилающей поверхности и эволюции находящихся на ней объектов [Говердовский, 1995].

Поэтому на этапе планирования операций целесообразно оценить возможности и условия получения надежной оперативной информации о состоянии поверхности Антарктиды и ледового покрова в прилегающей части Южного океана в различные отрезки времени (месяцы) навигационного периода. Такие данные позволят потребителю судить о периодичности, с которой он может получать информацию о состоянии подстилающей поверхности в интересующем его районе с заранее заданной вероятностью или иметь сведения о вероятности, с какой он получит эти данные при одном, двух и более пролетах спутника над этим районом.

Ледовый покров приантарктических морей сформирован из нескольких типов ледовых образований: припая, дрейфующих льдов и айсбергов. Все эти ледовые образования претерпевают значительные сезонные изменения. Достаточно, например, упомянуть, что общая площадь ледового покрова от зимы к лету уменьшается в 4–5 раз. Формирование припая начинается в апреле – мае и заканчивается к ноябрю, когда его площадь составляет, примерно, 0,5 млн. км². После этого начинается период его постепенного разрушения от северной кромки в направлении берега. При этом его площадь в феврале – марте уменьшается до 0,1 млн км², т.е. примерно в 5 раз [Романов, 1984].

Основную часть ледового покрова приантарктических морей составляют дрейфующие льды. Направления дрейфа льдов определяются особенностями циркуляции атмосферы и поверхностных вод. В целом вдоль берегов Антарктиды наблюдается западный дрейф льдов, а вдоль северной кромки области дрейфующих льдов – восточный. Вместе с тем в общей схеме дрейфа льдов существует несколько циркуляционных систем. Их наличие приводит к тому, что в теплое полугодие в морях Уэдделла, Беллинсгаузена, Амундсена и в районе островов Баллена возникают скопления дрейфующих сплоченных льдов, так называемые ледяные массивы. В декабре – марте в этих ледяных массивах сосредоточено 75–85 % сплоченных льдов Южного океана [Северный..., 1985]. В то же время наиболее значительные зоны разреженных льдов

наблюдаются в крайней восточной части моря Уэдделла, в море Содружества, центральной и западной частях моря Росса. Здесь обычно проходят трассы плавания судов к берегам Антарктиды [Романов, 1984]. Естественно, что эти части акватории приарктических морей требуют более детального изучения особенностей ледовой обстановки в навигационный период, в том числе с помощью космических средств.

Одной из характерных черт ледового режима приарктической акватории является наличие обширных полыней. Они квазистационарны, наблюдаются обычно в прибрежной зоне вдоль всего побережья Антарктиды во все сезоны. Максимальная их площадь (около 7 % площади дрейфующих льдов) достигается в декабре. В январе – феврале, в связи с отступлением северной границы пояса дрейфующих льдов к югу, эти полыни соединяются с районами чистой воды.

Еще одной особенностью ледового режима приарктической акватории Южного океана является наличие большого количества айсбергов. По некоторым оценкам их число превышает 200 тысяч. Средняя длина 500 м, высота 50 м. По мере удаления от побережья количество айсбергов уменьшается и на расстояние более 700 км они встречаются редко.

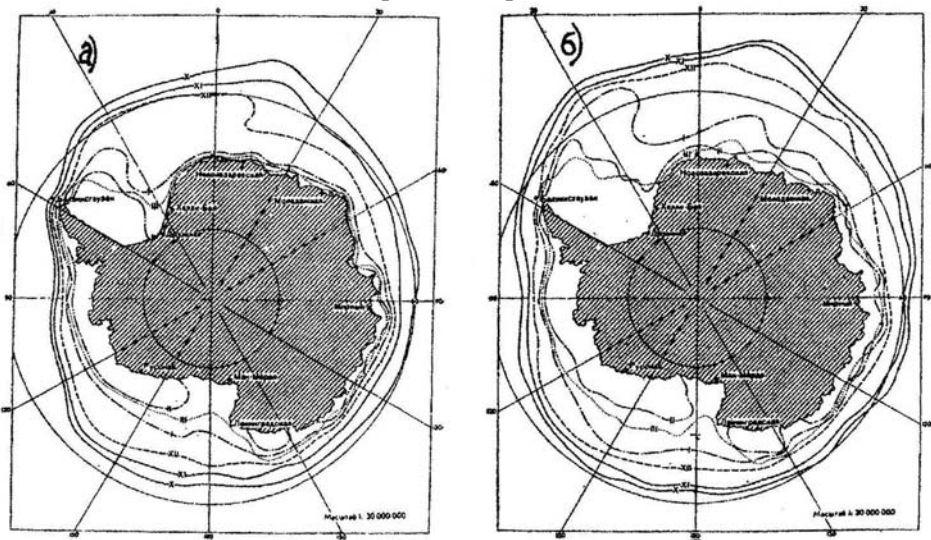


Рис. 1. Границы ледового покрова Антарктиды с октября по март при среднем (а) и максимальном (б) его развитии.

Асимметричность положения береговой черты Антарктиды по отношению к географическому полюсу приводит к тому, что асимметрично к нему расположена северная граница кромки ледового покрова. Это хорошо видно на карте, приведенной на рис. 1, а [Романов, 1984]. На ней показано среднее положение кромки льда во все месяцы теплого полугодия (с октября по март) при среднем развитии ледового покрова. Начиная с первого месяца теплого

полугодия (октября), северная кромка ледового покрова по большей части находится южнее 60° ю.ш., а начиная с декабря – повсеместно. Однако следует иметь в виду, что при максимальном развитии ледового покрова (рис 1б) его граница удалена от параллели 60° ю.ш. в северном направлении на значительной части акватории Южного океана не только в октябре и ноябре, а даже в декабре. На северо-востоке моря Беллинсгаузена северная граница ледового покрова пересекает параллель 60° даже в январе. Отсюда следует, что в навигационный период необходимо вести целенаправленные наблюдения из космоса за состоянием ледового покрова на акватории Южного океана, ограниченной с севера 50° ю.ш.

Для определения границ периода, в течение которого систематические наблюдения с помощью спутниковых оптических систем землеобзора за состоянием ледовой обстановки являются наиболее актуальными, целесообразно рассмотреть данные о длительности навигационных периодов в районах некоторых российских континентальных антарктических станций [Романов, 1985]. Такие сведения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика навигационных периодов

Станция	Продолжительность	Сутки	Начало	Окончание
Новолазаревская	Средняя	150	Вторая декада ноября	Вторая декада апреля
	Максимальная	180	Третья декада октября	Третья декада апреля
	Минимальная	110	Первая декада декабря	Третья декада марта
Молодежная	Средняя	200	Третья декада октября	Третья декада апреля
	Максимальная	240	Первая декада октября	Третья декада мая
	Минимальная	160	Вторая декада ноября	Третья декада марта
Мирный	Средняя	230	Вторая декада октября	Первая декада июня
	Максимальная	260	Первая декада октября	Третья декада июня
	Минимальная	180	Третья декада октября	Третья декада апреля

Данные табл. 1 показывают, что если ориентироваться на среднюю длительность навигационного периода для трех отечественных антарктических станций, то практический интерес представляют средние месячные оценки успешности обзора ледовой обстановки с октября по май. Таким образом, целесообразно получить оценки вероятности успешного обзора ледового покрова с помощью оптических спутниковых систем акватории Южного океана, находящейся южнее 50° ю.ш., для каждого месяца навигационного периода (октябрь – май).

Впервые метод априорной оценки вероятности успешного обзора земной поверхности с помощью космических оптических систем с использованием архивов ежедневных спутниковых данных о количестве общей облачности был предложен одним из авторов настоящей статьи в одном из сборников на-

учных трудов ЛГМИ [Воробьев, 1990]. В использованном архиве содержались сведения о ежедневном среднем количестве общей облачности в четырехугольниках $550 \times 550 \text{ км}^2$. Данные отнесены к узлам регулярной географической сетки с дискретностью 5° широты и 10° долготы.

Используя материалы такого архива, можно дать априорную оценку вероятности диагноза состояния поверхности любого района с помощью оптических систем землеобзора по формуле:

$$P = 1 - \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n \prod_{i=1}^k N_i, \quad (1)$$

где N_i – среднее суточное количество общей облачности в квадрате; k – количество пролетов ИСЗ над квадратом с суточным интервалом; n – количество интервалов по k наблюдениям в архивной выборке, использованной для расчетов.

Существенным недостатком, ограничивающим возможности практического применения этого метода, является недоступность архивов ежедневных спутниковых данных о количестве общей облачности широкому кругу потребителей. В то же время в отечественной работе [Матвеев, 1985] опубликованы средние многолетние (климатические) спутниковые данные о количестве общей облачности за каждый месяц года, полученные в результате обработки таких архивов. Их можно использовать для получения априорной (климатической) оценки вероятности успешного обзора земной поверхности из космоса при различном количестве пролетов ИСЗ над изучаемым районом с суточным интервалом, если формулу (1) определенным образом преобразовать, что сделано авторами настоящей статьи в публикации [Воробьев, 2002]. В ней было показано, что без существенной потери точности расчетов вполне возможно для оценки успешности обзора подстилающей поверхности с помощью спутниковой оптической аппаратуры использовать такую формулу:

$$P = 1 - N_{\text{cp}}^k, \quad (2)$$

где k – количество пролетов ИСЗ с суточным интервалом, N_{cp}^k – среднее многолетнее количество общей облачности.

Формула (2) позволяет, используя опубликованные данные о среднем многолетнем количестве общей облачности, оценить с заданной вероятностью ожидаемую периодичность успешности обзора земной поверхности. Для этого нужно при данном N_{cp} найти такое значение k , при котором $P_k \geq P^*$, где P^* – заданное критическое значение вероятности, обеспечивающее потребителю приемлемую для его целей оценку возможности обзора земной поверхности. Расчеты по этой формуле позволяют, например, построить карты распределения вероятностей успешного обзора поверхности Антарктиды и приантарктической акватории Южного океана с целью оценки их состояния для каждого

месяца навигационного периода при двух, трех пролетах ИСЗ с суточным интервалом. Очевидно, что при сравнительно большом значении среднего количества общей облачности в каком-либо районе для достижения приемлемой для потребителя вероятности успешного обзора земной поверхности (например, 80–90 %) нужно будет для каждого месяца построить карты или сделать таблицы до 5–6 и более пролетов ИСЗ. Поэтому с целью сокращения картографического и табличного материала и удобства пользования результатами расчетов по формуле (2) целесообразно оперировать числом пролетов ИСЗ с суточным интервалом, обеспечивающим заданную потребителем вероятность успешного обзора земной поверхности с помощью оптических систем космического землеобзора (например 90 %, как обычно принято в инженерных расчетах). При таком подходе для каждого месяца навигационного периода будем иметь только одну карту или таблицу, позволяющую оценить условия космического землеобзора.

Исходным материалом для оценки количества пролетов ИСЗ с суточным интервалом, обеспечивающих успешность обзора поверхности Антарктики в навигационный период с вероятностью 90 %, послужили многолетние ежемесячные данные о количестве общей облачности, приведенные в [Северный, 1985]. Они получены в результате обработки ежедневных спутниковых фотографий облачного покрова Земли за десятилетний период (1971–1980 гг.) и представляют собой оформленные в виде таблиц средние месячные значения количества общей облачности в сферических прямоугольниках размером 5° широты и 10° долготы.

С целью создания общего представления о территориальном распределении количества пролетов ИСЗ с суточным интервалом, обеспечивающих успешность обзора поверхности Антарктики с помощью оптических систем землеобзора, равное 90 %, на рис. 2 приведены три карты. На первой из них (рис. 2, а) показано распределение числа пролетов ИСЗ в первый месяц навигационного периода (октябрь), на второй (рис. 2, б) – в его середине (январь) и на третьей (рис. 2, в) – в его конце (май). В первую очередь обращает на себя внимание общее сходство в распределении количества пролетов ИСЗ, обеспечивающее 90 %-ную вероятность успешного обзора поверхности Антарктики в начале, середине и конце навигационного периода. В течение всей его продолжительности для обеспечения успешности обзора континента Антарктиды с вероятностью 90 % необходимо не более трех пролетов ИСЗ с суточным интервалом. Изолиния три пролета практически везде окаймляет контуры материка. Характерна несимметричность по отношению к полюсу положения области с наиболее благоприятными условиями наблюдения за поверхностью Антарктиды. Это связано с такой же несимметричностью по отношению к полюсу самого континента с очень холодной подстилающей поверхностью, формирующей антициклонический режим циркуляции с нисходящими вертикальными движениями, что, в свою очередь, препятствует образованию экранирующей облачности.

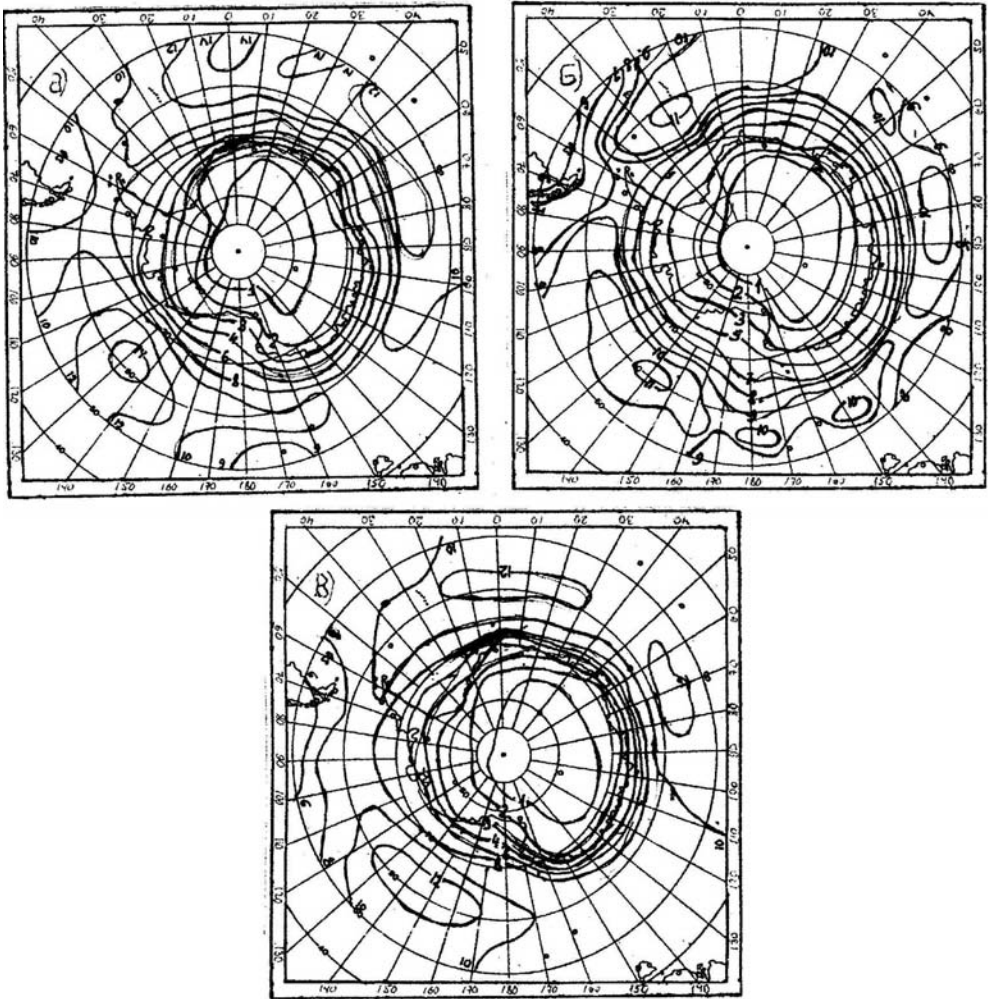


Рис. 2. Распределение количества пролетов ИСЗ с суточными интервалами, обеспечивающих 90%-ную вероятность успешного обзора поверхности Антарктики в октябре (а), январе (б) и мае (в).

Другой особенностью распределения количества пролетов ИСЗ, обеспечивающих успешность обзора поверхности Антарктики с вероятностью 90 %, является наличие в широтном поясе 50–60° ю.ш. полосы высоких их значений. В её пределах необходимое количество пролетов достигает 12 и местами даже более. Вдоль этого широтного пояса в своем движении с запада на восток проходят северные периферии фронтальных циклонов со сплошной и значительной облачностью, покрывающей большие территории и на длительное время исключающей возможность получения полезной информации о состоянии ледовой обстановки в этой части Южного океана от спутниковых оптиче-

ских систем. По мере приближения к континенту условия наблюдения несколько улучшаются и вблизи береговой черты составляют 3–5 пролетов ИСЗ с суточным интервалом.

Количественные характеристики особенностей распределения количества пролетов ИСЗ, обеспечивающих 90 %-ную вероятность успешного обзора поверхности Антарктики с помощью оптических систем землеобзора, приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Средние месячные и среднее за навигационный период количество пролетов ИСЗ по широтным зонам, обеспечивающее вероятность успешного обзора поверхности Антарктики, равную 90 %

Широтная зона, °	Месяцы (№)								Период
	10	11	12	1	2	3	4	5	
50–55	11	11	10	9	9	10	10	10	10
55–60	9	11	10	9	9	11	11	10	10
60–65	10	10	9	8	9	9	10	9	9
65–70	6	7	8	6	7	7	7	7	7
70–75	4	4	3	4	4	4	3	3	4
75–80	2	2	2	2	2	2	2	2	2
80–85	1	1	1	1	1	1	1	1	1
85–90	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Среднее	4,1	4,4	4,2	3,7	3,9	4,2	4,3	4,1	4,1

Данные табл. 2 подтверждают выводы, сделанные в результате визуальной оценки особенностей распределения количества пролетов ИСЗ над Антарктикой по картам за начальный, срединный и конечный месяцы навигационного периода (рис. 2). Действительно, во все месяцы навигационного периода наибольшее среднее количество пролетов ИСЗ, обеспечивающих 90 %-ную вероятность успешного обзора поверхности Антарктики, характерно для широтного пояса 50–60° ю.ш. При этом количество пролетов остается высоким практически над всей океанической частью Антарктики. Только в непосредственной близости к материку (в среднем около 70° ю.ш.) отмечается резкое уменьшение количества пролетов ИСЗ. Так, уже в широтном поясе 70–75° ю.ш. их среднее количество во все месяцы навигационного периода составляет 3–4. Южнее 75° ю.ш. во все месяцы достаточно 1–2 пролетов ИСЗ с суточным интервалом, чтобы диагностировать состояние поверхности Антарктиды с вероятностью 90 %. А в приполюсных районах информацию о состоянии поверхности с помощью спутниковых оптических систем можно получать практически ежедневно. С целью выделения в навигационном периоде месяцев с относительно более благоприятными условиями для получения информации о состоянии поверхности Антарктики было рассчитано осредненное по всей площади Антарктики (южнее 50° ю.ш.) количество пролетов ИСЗ, обеспечивающее вероятность успешного её обзора, равную 90 %. При этом, естественно, учитывалось различие в площадях широтных поясов. Эти данные приведены в последней строке табл. 2. Они позволяют сделать вывод, что

наиболее благоприятные условия для получения информации о состоянии поверхности Антарктики следует ожидать в январе–феврале.

Научные станции находятся, а трассы их снабжения по акватории Южно-го океана проходят в различных секторах Антарктики. Их, как известно, три: атлантический, индоокеанский и тихоокеанский. Площадь их разная, не одинаково в них соотношение площадей, занятых морем и сушей. Поэтому могут представить интерес сведения, аналогичные приведенным в табл. 2, по секторам Антарктики (табл. 3). Основные отличия в распределении числа пролетов, обеспечивающих 90 %-ную вероятность диагноза состояния поверхности Антарктики, связаны с тем, что в индоокеанском секторе континент Антарктиды наиболее далеко, по сравнению с двумя другими секторами, вытянут в северном направлении. Поэтому в этом секторе переход от типа распределения с большим количеством пролетов ИСЗ, характерного для океанической части Антарктики, к континентальному типу с его малым числом пролетов спутника происходит в более низких широтах. Данные табл. 3 действительно показывают, что в широтном поясе 65–70° ю.ш. в индоокеанском секторе среднее месячное количество пролетов ИСЗ, при котором вероятность успешного обзора поверхности достигает 90 %, составляет 4–5, тогда как в двух других секторах – 7–9.

Средние месячные и среднее за навигационный период количество пролетов ИСЗ по секторам и широтным зонам, обеспечивающее вероятность успешного обзора поверхности Антарктиды, равную 90 %

Широтная зона, °	Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь		
	А	И	Т	А	И	Т	А	И	Т	А	И	Т
50–55	11	12	10	11	11	11	10	10	10	9	9	9
55–60	10	12	10	11	11	10	10	10	10	9	9	9
60–65	10	9	10	11	9	11	10	8	10	9	7	9
65–70	8	4	8	8	4	9	7	4	8	7	4	7
70–75	4	2	5	4	2	5	4	1	5	4	1	5
75–80	2	1	3	2	1	2	2	1	3	2	1	2
80–85	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2
85–90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Среднее	4,4	4,2	4,4	4,6	4,0	4,6	4,3	3,6	4,4	4,0	3,4	4,0
Широтная зона, °	Февраль			Март			Апрель			Май		
	А	И	Т	А	И	Т	А	И	Т	А	И	Т
50–55	9	9	9	11	10	9	10	10	9	9	11	9
55–60	9	9	9	11	11	10	11	11	10	10	9	10
60–65	9	8	9	11	8	9	11	9	10	10	8	10
65–70	7	6	8	8	5	8	8	5	9	8	5	8
70–75	4	4	5	4	2	5	4	1	5	4	1	5
75–80	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3
80–85	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2
85–90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Среднее	3,9	3,7	4,1	4,6	3,8	4,2	4,5	3,9	4,4	4,2	3,5	4,3

Примечание: А – атлантический сектор Антарктики, И – индоокеанский, Т – тихоокеанский.

В широтном поясе 75–80⁰ ю.ш. в индоокеанском секторе диагноз состояния поверхности Антарктиды с помощью спутниковых оптических систем можно осуществлять практически ежедневно, в атлантическом секторе периодичность поступления полезной информации составляет двое суток, а в тихоокеанском – трое суток.

Таким образом, благоприятные условия для использования спутниковых оптических систем землеобзора в Антарктике в навигационный период, когда ведется активная работа по обеспечению жизнедеятельности антарктических станций и проводятся обширные научные исследования, наблюдаются только над континентом и вдоль береговой черты. Здесь в основном, в зависимости от удаленности от берега, количество пролетов ИСЗ с суточным интервалом, обеспечивающее вероятность успешного обзора подстилающей поверхности 90 %, составляет 1–3. В пределах непосредственно прилегающей к побережью акватории Южного океана периодичность поступления полезной информации, как правило, не превышает 3–4 сут. По мере удаления от прибрежных вод в направлении на север периодичность получения полезной информации о состоянии ледового покрова быстро возрастает и на его северной границе достигает 9–12 сут. Это обстоятельство вряд ли позволяет считать спутниковые оптические системы землеобзора основными средствами наблюдения за состоянием ледового покрова этой части Южного океана.

Литература

1. *Воробьев В.И.* Исследования макроструктуры планетарных облачных полей по спутниковым данным. Гидрометеорология – научно-техническому прогрессу. Сб. науч.х трудов. – Л.: изд. ЛГМИ, 1990.
2. *Воробьев В.И., Розанова И.В., Розанов Р.Е.* Априорная оценка вероятности успешного обзора земной поверхности из космоса по климатическим данным о количестве общей облачности. // Исследование Земли из космоса, 2002, № 1.
3. *Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология с основами астрономии. – СПб.: изд. ЛГМИ, 1995.
4. *Матвеев Ю.Л., Титов В.И.* Данные о структуре и изменчивости климата. Глобальное поле облачности. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1985.
5. *Романов А.А.* Льды Южного океана и условия судоходства. – Л.: Гидрометеониздат, 1984.
6. Северный Ледовитый и Южный океаны. – Л.: Наука, 1985.