

*В.И. Воробьев*

**ОПЕРАТИВНАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА  
ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ  
О СОСТОЯНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*V.I. Vorobyev*

**AN OPERATIVE PROBABILISTIC ESTIMATION  
OF POSSIBILITIES FOR RETRIEVING INFORMATION  
ON THE EARTH'S SURFACE CONDITION  
WITH THE HELP OF SATELLITE OPTICAL SYSTEMS**

*Обосновывается новый метод оперативной оценки необходимого числа пролетов искусственного спутника для успешных наблюдений земной поверхности из космоса, если во время первого пролета спутника поверхность скрыта облаками. Метод основан на применении климатических (многолетних) данных о суммарной облачности, приведенных в литературе. Таким образом, исключается необходимость прибегать к использованию труднодоступных архивов ежедневных данных по облачности (см. [6]); существенно уменьшается объем вычислений и время, необходимое для их выполнения.*

*A new method is substantiated for operative estimation of the required number of artificial satellite's passages for successful observation of the earth's surface from space if the surface is hidden by clouds during the first passage. The method is based on usage of climatic (multiyear) data on total cloudiness which can be found in the literature. Thus, excluded is the need to make use of hardly accessible archives of daily data on the amount of cloudiness (see [6]); size of the calculations and the time for their execution are essentially reduced.*

Спутниковые измерительные системы оптического диапазона широко используются для наблюдения за состоянием подстилающей поверхности и наземными объектами. Высокая разрешающая способность этой аппаратуры при сравнительно большой площади обзора делает ее регулярное использование весьма привлекательным, а иногда единственно возможным. Однако эффективность применения этих систем наблюдения в интересах различных народнохозяйственных и оборонных отраслей невозможно без учета экранирующего влияния облачности.

Впервые задача учета влияния облачности при планировании производства наблюдений в каком-либо районе земного шара была решена на основе использования архива ежедневных данных о количестве общей облачности в квадратах  $555 \times 555 \text{ км}^2$  ( $5^\circ \times 5^\circ$  экватора), созданного в результате обработки карт нефанализа северного полушария за зимние и летние месяцы 1967 – 1971 гг. [Воробьев, 1981; 1990]. Ее решение основывалось на следующих соображе-

ниях. Вероятность  $P$  того, что выбранный для обозрения район (объект) в пределах квадрата  $555 \times 555 \text{ км}^2$  будет визуально инспектирован оптическими средствами спутникового наблюдения при однократном пролете ИСЗ над этим квадратом, равна

$$P = 1 - N, \quad (1)$$

где  $N$  – количество общей облачности в квадрате (в долях единицы);  $P$  – вероятность (в долях единицы).

Очевидно, что при увеличении числа пролетов ИСЗ, в связи со смещением облачных образований и межсуточной изменчивостью количества общей облачности, вероятность успешного обзора земной поверхности будет увеличиваться. Тогда в предположении независимости смежных (через сутки) наблюдений за облачностью можно рассчитать эту вероятность при нескольких последовательных с суточным интервалом пролетах ИСЗ над интересующим потребителя районом по формуле:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^k N_i, \quad (2)$$

где  $k$  – количество пролетов ИСЗ над объектом с суточным интервалом,  $N_i$  – количество общей облачности в  $i$ -день.

Предположение о независимости результатов последовательных наблюдений не является вполне строгим. Однако, как было показано в [Воробьев, 1981], а затем и в [Матвеев, 1986], коэффициент корреляции между значением количества общей облачности через сутки не превышает  $0,2 - 0,25$ . Следовательно, предположение о независимости результатов наблюдения за облачностью с помощью ИСЗ с суточным интервалом можно считать допустимым.

Формула (2) позволяет рассчитать вероятность  $P$  в каждом конкретном случае. Для учета статистической структуры временной изменчивости количества общей облачности от суток к суткам результаты расчетов по формуле (2) следует усреднить для всей исходной выборки. В результате такого усреднения приходим к следующей формуле, позволяющей рассчитать вероятность  $P$  успешного диагноза состояния земной поверхности при  $k$  пролетах спутника с суточным интервалом:

$$P = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^k N_i, \quad (3),$$

где  $k$  – количество пролетов ИСЗ над квадратом с интервалом одни сутки,  $n$  – количество интервалов по  $k$  наблюдений в архивной выборке ежедневных значений количества общей облачности.

Используя формулу (3), можно рассчитать, по данным архива ежедневных данных о количестве общей облачности, значение вероятности успешного обзора земной поверхности с помощью оптической аппаратуры при различном числе пролетов ИСЗ с суточным интервалом над интересующим потребителя районом. По результатам таких расчетов можно построить карты или таблицы территориального распределения вероятностей при одном, двух и т.д. пролетах ИСЗ с суточным интервалом, или определять, сколько пролетов ИСЗ с суточным интервалом необходимо, чтобы была обеспечена заранее заданная вероятность успешного обзора земной поверхности.

В качестве примера реализации такого подхода к оценке ожидаемых условий наблюдений за земной поверхностью в оптическом диапазоне в работе [Воробьев, 1990] были приведены карты количества пролетов ИСЗ с суточным интервалом, необходимым для априорной оценки состояния земной поверхности северного полушария в заданном районе с вероятностью 95 % и более в январе и июле. Такие сведения позволяют осуществлять перспективное планирование экспериментов и проведение систематических наблюдений за состоянием растительного покрова, сельскохозяйственных культур, наземными и надводными объектами и т.д.

Недостатком, существенно ограничивающим практическое применение рассмотренного метода априорной оценки вероятности успешного обзора земной поверхности, является недоступность широкому кругу потребителей архивов ежедневных данных о среднем количестве общей облачности.

В то же время в отечественной и зарубежной литературе приводятся результаты обработки таких архивов в виде многолетних (климатических) характеристик количества общей облачности.

Например, в работе [Матвеев, 1985] содержатся сведения о многолетних характеристиках облачного покрова земного шара, полученных на основе обработки архива ежедневных спутниковых наблюдений за десятилетний период 1971–1980 гг. Ежедневные значения среднего количества общей облачности определяются в пределах сферических прямоугольников с размером  $555 \times 555$  км<sup>2</sup>. Эти данные отнесены к узлам географической сетки с дискретностью 5° широты и 10° долготы. Материалы этого архива были использованы автором при проведении дальнейших исследований.

В работе [Воробьев, 2002] была показана возможность использования многолетних спутниковых данных о среднем месячном или сезонном количестве общей облачности для расчета вероятности успешного обзора земной поверхности, если формулу (3) преобразовать следующим образом.

Представим каждое ежедневное значение количества общей облачности как  $N = N_{\text{ср}} - \delta$ , где  $N_{\text{ср}}$  – среднее месячное или сезонное количество облачности в квадрате  $555 \times 555$  км<sup>2</sup>, а  $\delta$  – отклонение от него в данные сутки. Так, например, формула (3) для трех пролетов ИСЗ с суточным интервалом будет выглядеть следующим образом:

$$P_3 = 1 - N_{\text{cp}}^3 - N_{\text{cp}}^2 \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)}{n} + N_{\text{cp}} \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_1 \delta_2 + \delta_2 \delta_3 + \delta_3 \delta_1)}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_1 * \delta_2 * \delta_3)}{n}. \quad (4)$$

Подобные формулы могут быть написаны и для любого числа пролетов ИСЗ с суточным интервалом.

Можно предположить, что отклонения количества общей облачности соседних суток от  $N_{\text{cp}}$  чаще всего будут иметь различные знаки, поэтому их суммы будут малы. Кроме того, поскольку отклонения от  $N_{\text{cp}}$ , как правило, меньше его значения, то их произведения также будут невелики. Поэтому в равенствах, подобных (4), члены, куда входят суммы и произведения отклонений от  $N_{\text{cp}}$ , должны быть существенно меньше разности  $1 - N_{\text{cp}}^k$ .

Например, расчеты по формуле (4) для летних месяцев 1988–1991 гг. по району с центральной точкой  $60^\circ$  с.ш. и  $30^\circ$  в.д. (368 наблюдений) дали следующие результаты. Суммарное значение первых двух членов в (4) равно 0,842, третий член составляет от этой суммы 0,08 %, четвертый – 0,801 %, а пятый – 0,08 %. Дальнейшая проверка этих предположений на более обширных материалах, результаты которой рассмотрены в статье [Воробьев, 2002], позволила сделать вывод, что без существенной потери точности (не более 1 %), при планировании экспериментов и других видов деятельности космических систем наблюдений, все расчеты вероятности успешного обзора земной поверхности в оптическом диапазоне при наличии облачности можно вести по формуле:

$$P_k = 1 - N_{\text{cp}}^k, \quad (5)$$

где  $k$  – количество пролетов ИСЗ над объектом с суточным интервалом,  $N_{\text{cp}}$  – среднее месячное (сезонное) количество общей облачности,  $P_k$  – вероятность успешного обзора земной поверхности ИСЗ над объектом наблюдения.

В период производства непрерывных наблюдений за состоянием земной поверхности и находящимися на ней объектами возникает необходимость оценки вероятности получения положительных результатов, если при пролете ИСЗ над объектом наблюдения он оказался закрытым облачностью.

Попытка решения такой задачи была предпринята сотрудниками Института оптики атмосферы СО РАН с участием автора настоящей статьи [Комаров, 1988]. Исходными материалами для этого исследования послужили ежедневные спутниковые данные о среднем количестве общей облачности в двух сравнительно небольших районах северного полушария. Используя выборки с раз-

личным начальным количеством среднего суточного значения общей облачности, были выполнены расчеты по формуле (3). В итоге был получен вывод, что по результатам наблюдений с ИСЗ за количеством общей облачности, закрывающей объект наблюдения, можно оценить вероятность получения информации о его состоянии при последующих пролетах ИСЗ с суточным интервалом.

С целью устранения уже упомянутых сложностей, связанных с использованием архивов ежедневных данных о количестве общей облачности, в настоящей статье предлагается для решения задачи оперативной оценки возможности получения информации о состоянии объекта наблюдения, при его закрытии облаками при очередном пролете ИСЗ, использовать другой, более рациональный метод.

Естественно предположить, что влияние исходного (при начальном пролете ИСЗ) количества общей облачности на последующее распределение вероятности успешного обзора земной поверхности ограничивается результатами наблюдений только при 1–2 последующих пролетах ИСЗ. Это связано со слабой межсуточной корреляцией среднего количества общей облачности, на что уже указывалось выше. В последующие сутки распределение количества общей облачности должно соответствовать климатическому распределению. Поэтому есть основания для расчета вероятности успешного обзора земной поверхности и находящихся на ней объектов, в случаях их закрытия облачностью в исходный момент пролета ИСЗ, использовать следующую формулу:

$$P_k = 1 - N_n N_{cp}^k, \quad (6)$$

где  $k$  – количество пролетов ИСЗ с суточным интервалом после того, как его предыдущий (исходный для расчёта) пролет, из-за наличия на линии визирования облачности, не позволил оценить состояние земной поверхности и находящихся на ней объектов;  $N_n$  – количество общей облачности при этом исходном пролете;  $N_{cp}$  – среднее месячное (сезонное) количество общей облачности;  $P_k$  – вероятность успешного обзора земной поверхности и находящихся на ней объектов при  $k$  пролетах ИСЗ с суточным интервалом.

С целью оценки возможностей использования более удобной для практических целей формулы (6) вместо формулы (3) были проведены параллельные расчеты по данным за 1989 г. для двух районов с центральными точками  $50^{\circ}$  с.ш.,  $90^{\circ}$  в.д. (Алтай) и  $60^{\circ}$  с.ш.,  $0^{\circ}$  в.д. (южная часть Норвежского моря). При различном начальном количестве общей облачности  $N_n$ , расчеты по формуле (3) велись по ежедневным данным, а по формуле (6) – по средним значениям за этот год. При расчетах по ежедневным данным из годового ряда наблюдений формировались выборки ежедневных наблюдений, начинающихся с 9,8,7 и т.д. баллов. Не для всех начальных значений количества общей облачности число случаев было достаточным для получения надежных результатов сравнения расчетов по формулам (3) и (6) (табл. 1).

Таблица 1

Число случаев (суток) наблюдений за количеством общей облачности в 1989 г. в двух квадратах  $555 \times 555 \text{ км}^2$  Северного полушария при различном начальном количестве общей облачности  $N_n$  и среднее годовое значение количества общей облачности  $N_{cp}$  в этих квадратах

Координаты центра квадрата	Баллы											$\Sigma$	$N_{cp}$
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$60^0$ с.ш. $0^0$ в.д.	19	1	19	0	38	29	31	127	62	29	10	365	6,214
$50^0$ с.ш. $90^0$ в.д.	50	2	16	0	32	46	53	114	32	17	3	365	5,334

Разумеется, наиболее показательными для сравнения результатов расчетов по формулам (3) и (6) будут данные, полученные для случаев с начальным количеством общей облачности  $N_n$ , когда число наблюдений наиболее велико. Поэтому в табл. 2, в целях сокращения табличного материала, помещены результаты расчетов по упомянутым формулам для случаев с наибольшим для каждого квадрата количеством наблюдений с фиксированным начальным количеством общей облачности.

Таблица 2

Вероятность успешного обзора земной поверхности при разном количестве пролетов ИСЗ с суточным интервалом над двумя квадратами Северного полушария, рассчитанная по формулам (3) и (6), при начальном количестве общей облачности 7 баллов

Количество пролетов ИСЗ	Координаты центров квадратов					
	$50^0$ с.ш. $90^0$ в.д., $n = 114$			$60^0$ с.ш. $0^0$ в.д., $n = 127$		
	Формула (3)	Формула (6)	$\Delta$	Формула (3)	Формула (6)	$\Delta$
1	0,6003	0,6266	-0,0263	0,5456	0,5650	-0,0194
2	0,7818	0,8008	-0,0190	0,7080	0,7297	-0,0317
3	0,8796	0,8938	-0,0142	0,8149	0,8320	-0,0171
4	0,9322	0,9433	-0,0111	0,8843	0,8957	-0,0114

Примечание.  $\Delta$  – разность результатов расчетов по формулам (3) и (6).

Анализ данных табл. 2 показывает, что для оперативной оценки вероятности успешного обзора земной поверхности в случаях, когда в момент пролета ИСЗ над объектом он был закрыт облачностью, с успехом могут быть использованы средние многолетние данные. Ошибки расчета по ним, если в качестве критерия использовать результаты расчетов по данным ежедневных наблюдений, не превышают трех процентов и наиболее велики в первые два дня после того, как пролет ИСЗ над объектом, в связи с наличием облачности, не позволил произвести его инспектирование.

По мере увеличения числа пролетов ИСЗ различия в оценках вероятности успешного обзора земной поверхности по формулам (3) и (6) уменьшаются.

Эти выводы в основном подтверждают данные, полученные для других исходных значений количества общей облачности, хотя и по существенно меньшему числу ежедневных наблюдений. Но что важно – даже при небольшом количестве ежедневных наблюдений различия в результатах расчетов по обеим

формулам не превышали 3 %. Имели место только отдельные случаи, когда расчеты по формуле (3) давали несколько большие значения вероятности, чем расчеты по формуле (6).

Таким образом, с использованием достаточно большого объема материалов ежедневных данных о количестве общей облачности, показана возможность при оперативной работе спутниковых систем оптического землеобзора, по осредненным за большой промежуток времени (месяц, сезон) данным о количестве общей облачности и известному ее количеству при пролете ИСЗ над объектом, исключаяющим его инспектирование, оценить вероятность его успешного обзора при следующих пролетах ИСЗ. Более того, формула (6) позволяет, используя опубликованные данные о среднем месячном количестве общей облачности, оценить с заданной вероятностью ожидаемую периодичность успешного обзора земной поверхности при заданном значении количества облачности при пролете ИСЗ над объектом в случае, если эта облачность закрывает объект наблюдения. Для этого нужно при заданном  $N_n$  и  $N_{cp}$  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. Так, например, если задать значение  $P^*$ , равное 85 %, то при начальном значении количества общей облачности 7 баллов в квадрате, с координатами в центральной точке  $60^\circ$  с.ш.,  $0^\circ$  в.д., для достижения этого значения нужно 4 пролета ИСЗ, а в квадрате с центральной точкой  $50^\circ$  с.ш.,  $90^\circ$  в.д. – 3 пролета (табл. 2).

При использовании новой рациональной методики не только отпадает необходимость в привлечении труднодоступных архивов ежедневных спутниковых наблюдений за количеством общей облачности, но и существенно сокращается объем расчетов. Это позволяет за небольшой промежуток времени, после поступления текущей информации о количестве общей облачности, закрывающей объекты наблюдения, получить для больших территорий вероятностные характеристики возможности успешного обзора земной поверхности при последующих пролетах ИСЗ с суточным интервалом.

### Литература

1. Воробьев В.И., Фадеев В.С. Характеристика облачного покрова северного полушария по данным метеорологических спутников. – Л.: Гидрометеониздат, 1981. – 172 с.
2. Воробьев В.И. Исследования макроструктуры планетарных облачных полей по спутниковым данным. // Гидрометеорология научно-техническому прогрессу. Сборник научных трудов. – Л.: изд. ЛГМИ, 1990, с. 19–25.
3. 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, с. 38–41.
4. Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина И.Я., Воробьев В.И. Об оценке требуемого количества пролетов ИСЗ для успешного обзора земной поверхности из космоса при ее закрытии облачностью в момент первого пролета. // Оптика атмосферы и океана, 1988, т. 11, № 1, с. 71–74.
5. Матвеев Ю.Л., Титов В.И. Данные о структуре и изменчивости климата. Глобальное поле облачности. – Обнинск: ВНИИГМИ МЦД, 1985. – 100 с.
6. Матвеев Ю.Л., Матвеев Л.Т., Солдатенко С.А. Глобальное поле облачности. – Л.: Гидрометеониздат, 1986. – 279 с.