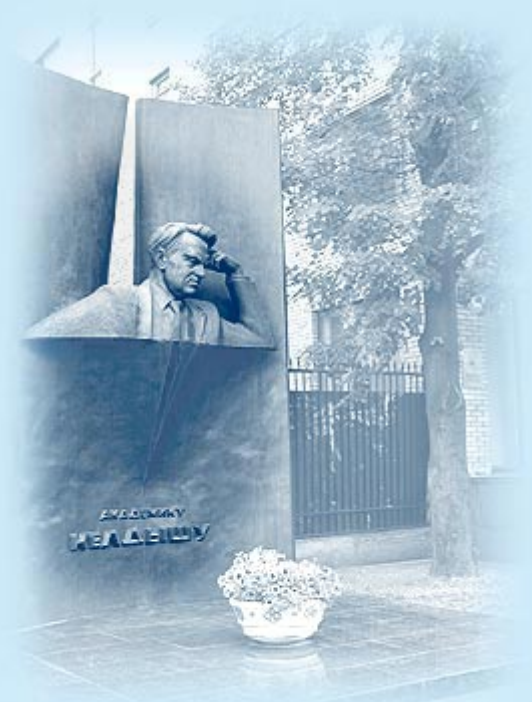




ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 16 за 2022 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**В.В. Лопаченко, А.В. Мохнаткин,
В.А. Воропаев**

Оценка прогноза погоды при подготовке к оптическим наблюдениям космических объектов

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Лопаченко В.В., Мохнаткин А.В., Воропаев В.А. Оценка прогноза погоды при подготовке к оптическим наблюдениям космических объектов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 16. 14 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2022-16>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2022-16>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

В.В. Лопаченко, А.В. Мохнаткин, В.А. Воропаев

**Оценка прогноза погоды
при подготовке к оптическим наблюдениям
космических объектов**

Москва — 2022

Лопаченко В.В., Мохнаткин А.В., Воронаев В.А.

Оценка прогноза погоды при подготовке к оптическим наблюдениям космических объектов

Предлагается метод формирования численного критерия, который является обобщенной характеристикой прогноза погоды и учитывает специфику проведения оптических наблюдений. Этот метод используется при подготовке к работе телескопов сети, координируемой ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Ключевые слова: погода, облачность, оптические наблюдения, планирование наблюдений, автоматизация планирования, околоземное космическое пространство.

***Vladimir Vladimirovich Lopachenko, Artem Vitalevich Mokhnatkin,
Viktor Anatolevich Voropaev***

Weather forecast estimation for planning of optical observations

A method is proposed for the formation of a numerical criterion, which is a generalized characteristic of weather forecast taking into account features of optical observations. The proposed approach on weather forecast parameterization is used for planning optical observation on some telescopes coordinated by KIAM RAS.

Key words: weather, cloud cover, optical observations, planning of observations, planning automation, near-Earth outer space.

Оглавление

Введение	3
Исходные данные для оценки погодных условий	4
Критерий пригодности погодных условий для оптических наблюдений	5
Вероятностная трактовка признака W	8
Практическое применение.....	9
Заключение.....	12
Библиографический список.....	13

Введение

Получение оперативной информации о текущем положении и состоянии искусственных спутников Земли (ИСЗ) является комплексной задачей, требующей привлечения различных измерительных средств и совершенствования планирования их применения. Оптические средства являются основными инструментами для наблюдения космических объектов (КО) на средних и высоких орбитах. При этом, в отличие от всепогодных радиотехнических средств, возможность работы оптических инструментов напрямую зависит от наличия благоприятных погодных условий, в первую очередь отсутствия значительной облачности, осадков, сильного ветра.

Учет прогноза погоды перед проведением оптических наблюдений, как правило, осуществляется персоналом обсерватории (пункта наблюдений) вручную и непосредственно перед началом работ. Различные обсерватории используют разные по содержанию и достоверности источники метеорологической информации, при этом нет общепринятой методики для выработки надёжных критериев пригодности погодных условий. Как следствие, принятие бесспорного решения о проведении или отмене предстоящих работ возможно только в случае явно благоприятного или явно неблагоприятного прогноза погоды. Для промежуточных данных волевое решение также принимается, но его результат варьируется в широком диапазоне, исходя из личного опыта и субъективной оценки. Для отдельно работающей обсерватории отмеченное обстоятельство не является существенным, т.к. в зависимости от специфики решаемой задачи, получение целевой информации возможно даже в условиях переменной облачности, а решение о прекращении работ может быть принято оператором на основании фактического состояния окружающей среды и качества принимаемых данных.

Вместе с тем ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (далее ИПМ) координирует работу сети, которая объединяет более двух десятков оптических телескопов, расположенных на разных континентах. При объединении нескольких удаленных обсерваторий в единую сеть, выполняющую наблюдения по скоординированной программе, возникает ряд дополнительных требований по автоматизации планирования и синхронизации проводимых работ. В этой связи необходимо решить задачу проведения сопоставимой и объективной оценки степени благоприятности погодных условий. Наличие такой оценки для различных обсерваторий сети позволяет в центре принятия решения осуществлять распределение между обсерваториями неперекрывающихся заданий и тем самым в полной мере использовать имеющийся потенциал по наблюдению большего числа КО.

В препринте предлагается рациональный вариант объективного числового критерия, который может служить обобщенной характеристикой прогнозных погодных условий и позволяет учесть специфику проведения оптических наблюдений. Введение данного критерия даёт возможность стандартизировать

оценку погодных условий для различных обсерваторий, сформировать критерии принятия решения о способности обеспечить выполнение запланированного объема работ, осуществить оценку необходимого числа дублирования заданий по каждому объекту, с учетом принятого порога обнаружения.

Исходные данные для оценки погодных условий

По состоянию на начало 2022 г. в мире оперативно эксплуатируется 15 глобальных моделей прогноза погоды, данные от которых поступают в центр верификации детерминистических прогнозов Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [1], при этом только 10 из них являются оригинальными разработками [2]. Лидером по оправдываемости прогноза является модель Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [3]. Россия в данном центре верификации представлена Глобальной гидродинамической полулагранжевой моделью прогноза погоды (ПЛАВ) [4]. Однако результаты прогнозирования, полученные с помощью моделей ECMWF и Российского Гидрометцентра, имеют ограниченный доступ. В данной работе за основу взята модель Icosahedral Nonhydrostatic (ICON) Метеорологического центра ФРГ (DWD) и института Макса Планка (MPI-M) [5]. Результаты прогноза погоды, сформированные на основе модели ICON, регулярно обновляются и находятся в открытом доступе. Согласно сравнительным отчетам Гидрометцентра России [6], оправдываемость прогноза с помощью модели ICON в целом не уступает, а по некоторым критериям превосходит наиболее известные модели таких ведущих центров, как NCEP (National Centers for Environmental Prediction, США) и UKMO (United Kingdom Met Office, Великобритания).

Как было отмечено ранее, необходимым условием для функционирования оптических инструментов является наличие безоблачной или малооблачной погоды. При этом среди публикуемых данных центра верификации детерминистических прогнозов ВМО оценка оправдываемости параметра общей облачности не представлена. Несмотря на длительный опыт использования астрономическим сообществом различных сервисов, предоставляющих прогнозы погоды, степень оправдываемости прогнозов плохо изучена. Так, согласно представленным результатам [7], совпадение с прогнозом такой модели, как Global Forecast System (GFS, США), для суммарного облачного покрова характеризуется средней ошибкой в пределах $\pm 15\%$. В работе Q.-Z. Ye [7] утверждается, что исследования степени достоверности численных прогнозов показателя облачности в глобальном масштабе до 2012 г. не проводились.

Характерным результатом расчета глобальной модели погоды является значительный объем прогнозных данных. Так Метеорологический центр ФРГ предоставляет доступ к 67 различным параметрам, которые характеризуют состояние окружающей среды с глубиной прогноза до 180 часов, при этом

размер элемента разрешения оперативно-детерминированной сетки разбиения R3B07 модели ICON составляет около 13 км [8]. С точки зрения применимости к возможности работы оптических инструментов нет необходимости использовать все публикуемые параметры, достаточно использовать только такие, как суммарный облачный покров (total cloud cover - CLCT) и обобщенный признак интерпретации погоды (weather interpretation - WW). Суммарный облачный покров характеризуется числом в диапазоне $0 \div 100$ и имеет размерность процентов. Признак интерпретации погоды WW является частью кодовой таблицы ВМО FM 94 BUFR/FM 95 [9], а именно CREX 0 20 003 – «Текущая погода», и может принимать следующие значения:

- 0 - ясное небо;
- 1 - в основном ясно;
- 2 - переменная облачность;
- 3 - сплошная облачность (пасмурно).

Значения параметра WW, равные четырем и более, соотносятся с такими явлениями, как, например, «туман, иней» (код 48), «сильный дождь» (код 65), «снег» (код 73), «сильная гроза» (код 96) [8]. В целом, применительно к проведению оптических наблюдений, они соответствуют неблагоприятным погодным условиям.

С учетом сказанного представляется возможным исключить из рассмотрения такие факторы, как ветер, температура, давление, влажность, и упростить задачу до двухпараметрической проверки, при которой величина суммарного облачного покрова CLCT учитывается только тогда, когда значение признака интерпретации погоды WW менее четырех. Если же значение WW более или равно четырем, будем считать, что прогноз погоды предупреждает о неблагоприятных для проведения оптических наблюдений погодных условиях.

Критерий пригодности погодных условий для оптических наблюдений

При проведении оптических наблюдений наибольшую ценность представляют интервалы времени, когда небо в месте расположения телескопа свободно от облачности. В связи с этим в дальнейшем будем использовать оценку безоблачности неба C :

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{100 - \text{CLCT}}{100}, \\ \text{CLCT} = 100 \text{ при } \text{WW} > 3, \end{array} \right. \quad (1)$$

где параметр C (Clear sky) характеризует нормированную в диапазоне значений $0 \div 1$ долю чистого неба для заданного момента времени прогнозных данных параметра CLCT.

На протяжении ночи наблюдаемые погодные условия могут значительно изменяться (рис.1), при этом ожидается, что прогнозная величина C (1) будет с ними корреляционно связана. Объяснение причин наличия невязок выходит за рамки данного препринта, однако важно понимать, что математические модели прогноза погодных параметров с разной степенью приближения реализуют численное интегрирование на основе большого числа входных данных, которые в свою очередь характеризуются индивидуальной степенью ошибок их измерений. Как результат, возникают амплитудные ΔC и фазовые $\Delta \varphi$ рассогласования между наблюдаемыми погодными условиями и данными прогноза. Оценки значения величин ΔC и $\Delta \varphi$ для облачного покрова изучены недостаточно [7]. Более того, исходя из опыта ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по наблюдению КО, оправдываемость метеопрогноза является уникальной характеристикой для различных обсерваторий, особенно расположенных в горной местности, где точность метеорологической модели погоды недостаточна для учета сложной структуры геологических образований. Таким образом, возникает противоречие, при котором прогноз погоды в целом описывает наблюдаемые явления и в то же время не в полной степени им соответствует, а значит, непосредственное использование величины C при подготовке проведения оптических наблюдений может привести к негативным последствиям, например отсутствию задания на проведение наблюдений в тот момент, когда фактически наблюдается разрыв в облачности, или наоборот – ожидать получения результатов при наличии локальной облачности.

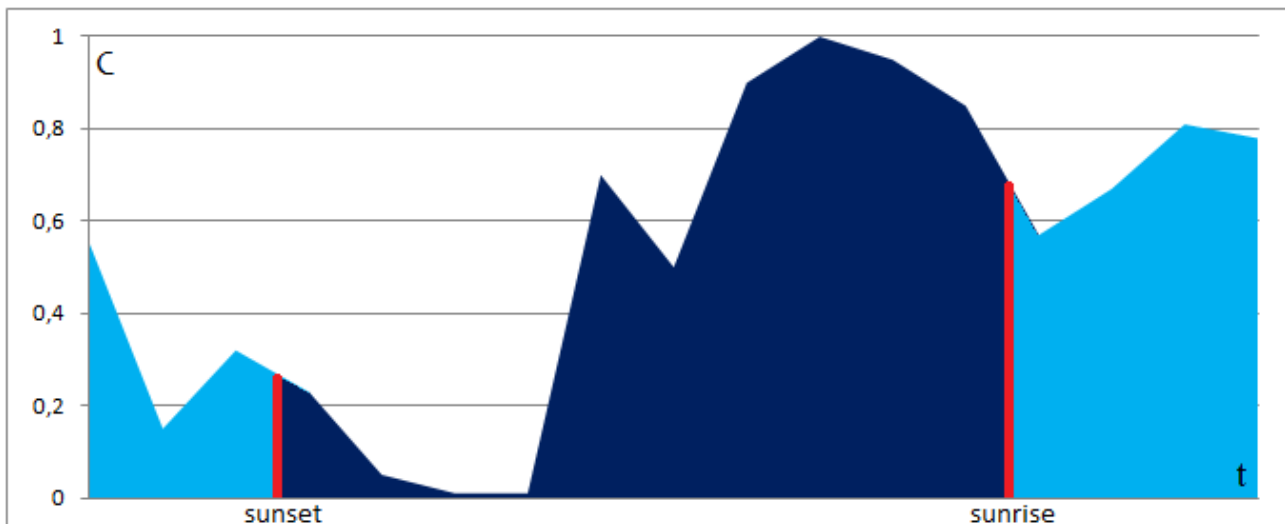


Рис. 1. Пример изменения C в течение ночи (линейная интерполяция дискретных значений) по данным ICON.

Выходом из данной ситуации представляется использование не конкретных значений параметра прогноза погоды C , а суммарной оценки безоблачной погоды на заданном интервале. Для этого рассмотрим непрерывную по времени t функцию $C(t)$, заданную опорными значениями

метеопрогноза (1) и интерполируемую (в простейшем случае - линейно) для промежуточных значений t . Это позволяет вычислить определенный интеграл (2).

$$S = \int_{t_1}^{t_2} C(t)dt, \quad (2)$$

где значения t_1 и t_2 соответствуют моментам времени, выбор которых должен определяться характером изменения $C(t)$. Очевидно, что при выборе малого интервала $\Delta t = t_2 - t_1$, сопоставимого по времени с ходом фазовой невязки $\Delta\varphi$, результат расчета (2) будет в значительной степени зависеть от выбора конкретного значения t_1 . При увеличении интервала Δt флуктуации значений $C(t)$ будут попадать в рассматриваемый интервал и наличие $\Delta\varphi$ в меньшей степени повлияет на итоговые значения S , т.к. неучтенными будут оставаться только краевые значения $C(t)$ интервала времени $\Delta\varphi$. Таким образом, чем меньше отношение $\Delta\varphi$ к Δt , тем меньше значения S зависят от кратковременных флуктуаций погодных явлений. В общем случае значение величины $\Delta\varphi$ неизвестно, поэтому для повышения оправдываемости величины S рационально использовать наибольший подходящий для оптических наблюдений интервал времени суток, а именно $t_1 = t_{\text{sunrise}}$ и $t_2 = t_{\text{sunset}}$, что соответствует моментам времени погружения Солнца на заданный угол места.

Свойством величины S является изменение значений в диапазоне $0 \div 1$, а значит, получаемое значение S прямо пропорционально значению выбранного интервала времени и динамике изменения $C(t)$. Это позволяет трактовать величину S как оценку числа часов с безоблачной погодой внутри выбранного интервала времени и для заданной обсерватории. Разделив полученное значение S на интервал интегрирования (3)

$$W = \frac{S}{t_{\text{sunrise}} - t_{\text{sunset}}}, \quad (3)$$

Получим безразмерную величину W (night **W**eather), которая численно характеризует долю ночи, доступную для проведения оптических наблюдений, и которую назовем *показателем качества ночной погоды*. Малые значения величины W соответствуют неблагоприятным прогнозным погодным условиям, а близкие к единице – благоприятным.

Разные диапазоны величины W можно сопоставить с значениями признака интерпретации погоды WW , см. Таблицу 1, и тем самым в первом приближении определить численные пороги для таких общепринятых семантических понятий, как «хорошая погода», «неблагоприятные условия» и т.п.

Таблица 1

Связь диапазонов W с признаками интерпретации погоды WW

WW , значение	Облачность %	Трактовка	Диапазон W
0	0 ... <6	чистое небо (безоблачно)	>0.94 ... 1.00
1	6 ... <44	в основном ясно (малооблачно)	>0.56 ... 0.94
2	44 ... <81	переменная облачность	>0.19 ... 0.56
3	81 ... ≤100	сплошная облачность	0.00 ... 0.19
≥4	100	иные неблагоприятные условия	0.00

Таким образом, W является интегральным параметром, значение которого характеризует долю безоблачности неба для данного пункта наблюдения на заданном интервале времени и при этом принимает ненулевое значение только для благоприятных условий окружающей среды. Интегрирование на интервале ночи позволяет дать достаточно надежную осреднённую оценку принципиальной возможности проведения оптических измерений для конкретной календарной даты.

Вероятностная трактовка признака W

Необходимо отметить, что значение W характеризует общее состояние облачного покрова заданной ячейки пространства и выбранного интервала времени. Эта скалярная величина не позволяет получить детерминированный ответ на вопрос: будут ли наблюдаться облака (событие A_1) или их отсутствие (событие A_2), если в произвольный момент времени задать произвольное направление визирования. При этом для любого направления в пределах рассматриваемой ячейки и для заданного интервала времени эти два события составляют полное множество событий (4):

$$P(A_1) + P(A_2) = 1, \quad (4)$$

где:

$P(A_1)$ – вероятность того, что для произвольного момента времени рассматриваемого временного интервала и произвольного направления визирования, ограниченного размером ячейки модели погоды, луч визирования встретит препятствие на своем пути (облачность), что соответствует невозможности проведения наблюдений оптическим инструментом;

$P(A_2)$ – вероятность того, что для оговоренных выше условий луч визирования не встретит препятствия (безоблачное небо), и это является необходимым условием для проведения успешных наблюдений КО данным оптическим инструментом.

Принимая во внимание, что изменения значений величины W пропорциональны прогнозным значениям облачности, а диапазон изменений лежит в интервале $0 \div 1$, параметр W можно рассматривать как вероятность

наступления благоприятных условий погоды для проведения оптических наблюдений, а значит, $P(A_2) \equiv W$.

Практическое применение

Наличие W – оценки вероятности наступления благоприятных условий наблюдения – позволяет рассматривать работу двух, удаленных друг от друга телескопов по наблюдению одного КО, в терминах теории вероятности. Так, проведение наблюдений двумя и более инструментами являются независимыми событиями, а наличие безоблачной погоды и успешность проведения наблюдений — взаимозависимые события. Тогда, считая, что данный КО технически наблюдаем, вероятность успешности проведения наблюдений данного КО хотя бы одним телескопом можно рассчитать, используя формулу (5) вероятности суммы совместных событий [10]:

$$P_{12} = W_1 + W_2 - W_1 W_2, \quad (5)$$

где:

P_{12} – вероятность успешного проведения наблюдений КО хотя бы одним из двух телескопов;

W_1 – вероятность безоблачной погоды для первого телескопа;

W_2 – вероятность безоблачной погоды для второго телескопа.

Если рассчитанная вероятность успешности наблюдений окажется ниже требуемого порога, то к наблюдению данного КО следует привлечь дополнительные телескопы. Комбинируя различные телескопы, с учетом их индивидуальных значений вероятности проведения успешной работы можно решить задачу минимизации числа привлекаемых оптических инструментов для обеспечения проведения измерений по данному объекту с заданным вероятностным порогом.

Таким образом, использование данных прогноза погоды позволяет привлекать не все имеющиеся телескопы для наблюдения данного объекта, а только их минимальное число, необходимое для обеспечения заданного уровня вероятности выполнения задания. Это позволяет направить освободившиеся наблюдательные ресурсы на наблюдение других объектов, увеличивая тем самым объем получаемых измерений от работы скоординированной сети телескопов в целом.

На практике в большинстве случаев величина W принимает значения более нуля. С математической точки зрения, привлечение к работам множества телескопов с низким значением W должно повысить вероятность успешного наблюдения заданного КО в целом. В то же время это означает необходимость израсходования технического ресурса этих телескопов на выполнение работы с низким практическим выходом. Нахождение баланса между необходимостью повышения вероятности получения информации и необходимостью экономии

ресурса выходит за рамки данной работы. Тем не менее представляется целесообразным ввести порог применимости телескопов по критерию погоды, а расчет вероятности с использованием формулы (5) осуществлять только для пунктов наблюдений, значение W которых более заданной величины.

В качестве первого приближения, для формирования такого порога можно использовать данные Таблицы 1, где событие «в основном ясно» наступает при значении $W > 0.56$. В качестве примера в Таблице 2 представлен результат расчета оценки возможности проведения оптических наблюдений некоторых пунктов наблюдений ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, где разным цветом подсвечены: благоприятные условия наблюдений (зеленым, $W > 0.56$), переменная облачность (желтым $0.56 \geq W > 0.19$), сплошная облачность (красным, $W \leq 0.19$).

Таблица 2 Сравнительная оценка качества погоды для 2022-01-01 UT							
N	Обсерватория	$W \cdot 100$ [%]	S [h]	Ночь [h]	Закат	Восход	Преобладающая погода
1	Кастельгранде	100.0	13.7	13.7	01.01 16:10	01.02 05:50	Чистое небо
2	Китаб	69.2	9.4	13.5	01.01 12:48	01.02 02:20	Небольшая облачность
3	Котгамия	49.6	6.4	12.9	01.01 15:28	01.02 04:21	Переменная облачность
4	Уссурийск	17.8	2.5	13.9	01.01 08:15	01.01 22:11	Облачно/пасмурно
5	Краснодар	0.0	0.0	14.0	01.01 14:24	01.02 04:27	Небольшой дождь

Кроме этого, использование величин S и W позволяет численно охарактеризовать погодные условия как на коротких, так и на длинных интервалах времени, а именно:

- рассчитать суммарное время безоблачного ночного неба в году, в том числе со значительной долей присутствия переменной и сплошной облачности. Эта величина может служить обобщенной характеристикой наблюдательного потенциала данной местности и его изменения в ретроспективе;
- определить суммарное время благоприятной ночной погоды в году. Где под благоприятной будем понимать погоду со значением $W > 0.56$ данной ночи. Эта характеристика схожа с предыдущей, но позволяет оценить фактический наблюдательный потенциал. Для данной величины ожидается наличие корреляции со значением суммы интервалов времени проведения целевых работ. Сопоставление между собой общего числа часов безоблачной погоды и благоприятного

числа безоблачной погоды позволяет дополнительно численно охарактеризовать влияние переменной облачности на наблюдения, проводимые в данном месте расположения телескопа.

- Выявлять сезонную составляющую изменения погодных условий.

В качестве примера статистического применения на рис. 2-4 представлены графики изменения в течение 2021 г. различных параметров для телескопа, расположенного в пункте «Косала» (Мексика). При этом на рис. 3,4 данные отображены с осреднением на интервале 15 ночей, что позволяет трактовать два соседних столбика рис. 3 как соответствующие одному календарному месяцу, а также для рис. 4 убрать из данных W высокочастотную составляющую и выделить сезонный тренд.

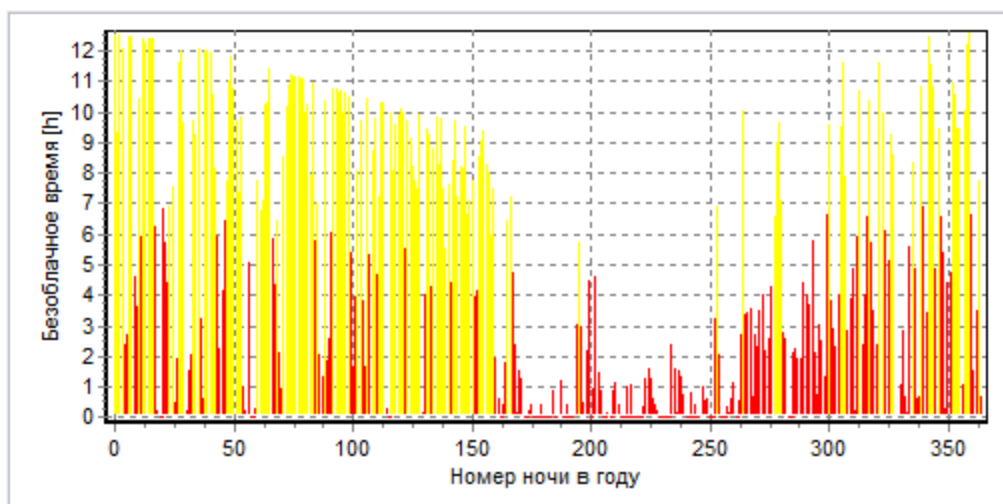


Рис. 2. Изменение числа ясных ночных часов S в пункте «Косала» в 2021 г. Желтые столбики — ночь характеризуется $W > 0.56$, красные — $W \leq 0.56$

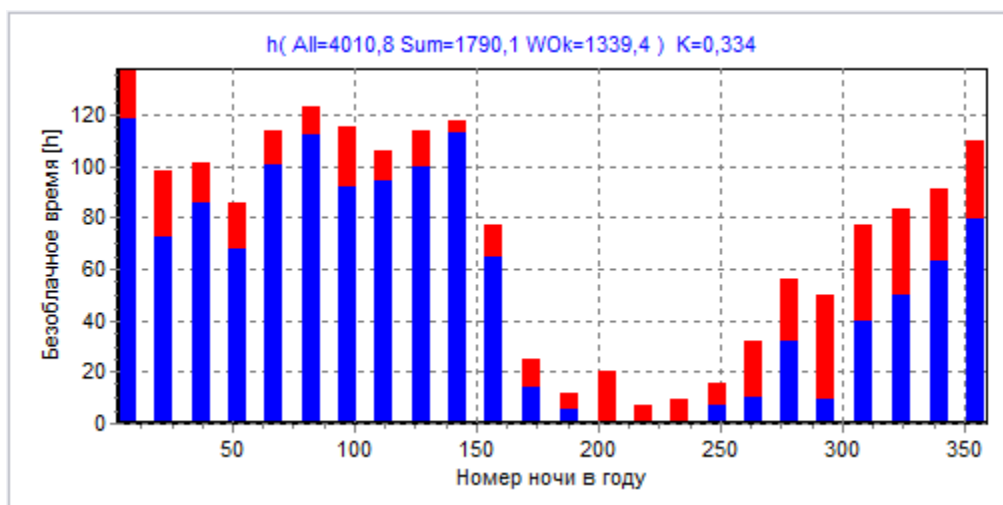


Рис. 3. Изменение суммарного числа часов безоблачного неба S для пункта «Косала» в 2021 г. Синяя часть столбика – для ночей с $W > 0.56$, красная часть столбика – для ночей с $W \leq 0.56$

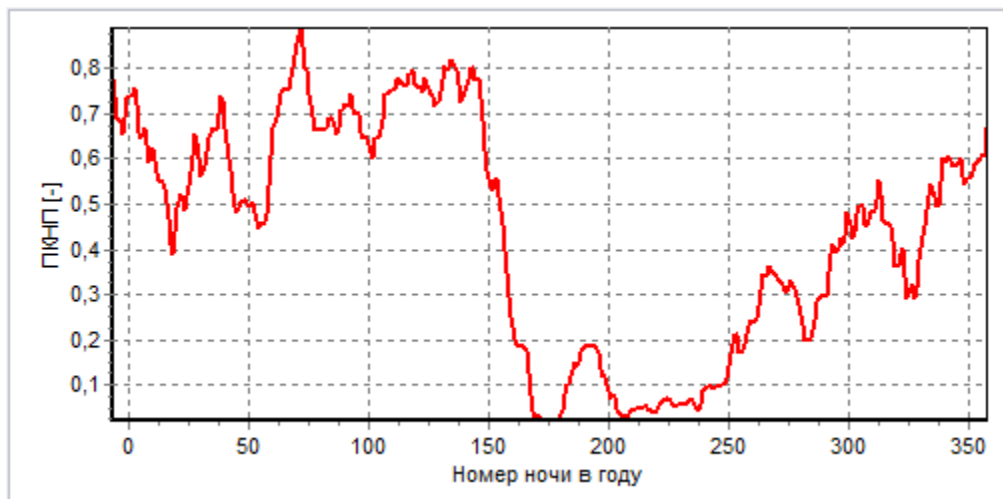


Рис. 4. Изменение значений W , демонстрирующее сезонное изменение качества ночной погоды для пункта «Косала» в 2021 г.

Результат использования параметров S и W демонстрирует практическую пользу данных характеристик. Основное их предназначение – использование в системе автоматизированного планирования работ оптических пунктов наблюдения КО. При этом данные критерии можно использовать как в качестве самостоятельных статистических показателей эффективности эксплуатации данного телескопа, так и для сравнения наблюдательного потенциала различных телескопов сети, а также для выявления перспективности размещения пункта наблюдений в том либо ином местоположении и т.п.

Заключение

Прогнозирование погоды является сложной и ресурсоемкой задачей, однако тенденции развития прогностических моделей с каждым десятилетием демонстрируют повышение оправдываемости прогнозов. Доступность результатов метеопрогноза для некоторых моделей, регулярное обновление данных позволяет использовать их при решении задачи обеспечения проведения оптических наблюдений.

Предложенная методика оценки безоблачного ночного времени на основе прогнозных метеоданных позволяет реализовать объективный подход к статистической оценке условий работы оптических инструментов. Так, значение суммарного числа часов благоприятной ночной погоды в году может быть сопоставлено с такой широко используемой астрономическим сообществом характеристикой, как число астрометрических ночей в году. Возможность разделения данных W с использованием пороговых значений позволяет в том числе осуществлять оценку сезонных особенностей мест расположения пунктов наблюдения, влияние объективных причин на производительность привлекаемых к наблюдениям оптических инструментов.

Наличие априорной информации о наиболее вероятном состоянии погодных условий для предстоящей ночи позволяет индивидуально оценивать

возможность проведения успешных наблюдений. Особую актуальность такая оценка имеет для совместной скоординированной работы, т.к. позволяет на этапе планирования осуществить перераспределение привлекаемых к наблюдению данного КО оптических инструментов и тем самым более рационально использовать ресурс доступного наблюдательного времени в целом. Таким образом, основным достоинством предложенного подхода является возможность его использования в процессах автоматизации подготовки и проведения оптических наблюдений космических объектов.

Библиографический список

1. WMO Lead Centre for Deterministic Forecast Verification — <https://apps.ecmwf.int/wmolcdnv/>
2. Толстых М.А. Численные методы прогнозирования погоды и климата // Интервью для редакции Бюллетеня "Изменение климата" Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — http://global-climate-change.ru/downl/interv/intervich_Tolstich.pdf
3. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской федерации. — 2016. — № 359. — 19. — <http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr359/tolstih.pdf>
4. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. – 111 с.
5. ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model — https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/01_num_weather_prediction_modells/icon_description.html
6. Краткосрочные и среднесрочные прогнозы полей метеорологических величин на основе гидродинамических моделей циркуляции атмосферы // Методический кабинет Гидрометцентра России. — <http://method.meteorf.ru/estimate/estimate.html>
7. Ye Q.-Z., Chen S.-S. The ultimate meteorological question from observational astronomers: how good is the cloud cover forecast? // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Volume 428 — Issue 4 — 1 February 2013 — Pages 3288–3294 — <https://academic.oup.com/mnras/article/428/4/3288/1000251>
8. DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System // Research and Development at DWD — https://www.dwd.de/DWD/forschung/nwv/fepub/icon_database_main.pdf

9. Наставление по кодам, Международные коды, Том I.2, Дополнение II к Техническому регламенту ВМО // WMO-No. 306. — 2015. — https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/WMO/wmo-N306_vI2_codes.pdf
10. Семенов В.А. Теория вероятностей и математическая статистика // Учебное пособие. — СПб.: Питер — 2013.