

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.51, 528.88

О влиянии ядерного взрыва на стратосферный озон

В.Б. Кашкин, Р.В. Одинцов, Т.В. Рублева*

*Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, корп. 1*

Поступила в редакцию 2.11.2021 г.

В наш ядерный век существуют опасения о судьбе озонового слоя Земли: считается, что как крупномасштабный, так и локальный конфликт с применением ядерного оружия способен на годы разрушить озоновый слой. 22 сентября 1979 г. официально не установленное государство скрытно выполнило ночные ядерные испытания в пустынном районе мирового океана. Это событие принято называть «Инцидент Вела». В настоящей работе использованы данные об озоне, полученные спутником НАСА Nimbus-7 через 16 мин 44 с после взрыва. Показано, что ударная волна оставляет «след» на озоновом слое. Уменьшения количества озона не замечено, по «следу» определены координаты места взрыва.

Ключевые слова: Инцидент Вела, ядерное испытание, озон, оксид азота, след на озоновом слое, ударная волна, координаты места испытаний; Vela incident, nuclear test, ozone, nitrogen oxide, mark on the ozone layer, shock wave, test site coordinates.

Введение

При ядерных взрывах в атмосфере и на поверхности. Кроме разрушительных эффектов локального и глобального масштабов, происходит мощное энергетическое воздействие на озоновый слой Земли [1]. Озон — малая атмосферная примесь, его общая масса составляет $0,64 \cdot 10^{-6}$ от массы всей атмосферы. Если собрать весь озон в слой при давлении 1013,25 гПа и температуре 273,16 К, то общее содержание озона (ОСО), т.е. толщина слоя, составит всего ~ 3 мм, или 300 единиц Добсона (300 е.Д.). Несмотря на малое содержание, озон поглощает ~ 3% потока солнечной энергии, поступающей на Землю. Стратосферный озон — основной естественный поглотитель солнечной ультрафиолетовой радиации, без озонового слоя органическая жизнь на Земле в современном виде была бы невозможной [2–4].

В стратосфере озон образует сферический слой. Максимальная концентрация озона (80%) зарегистрирована в умеренных широтах в атмосферном слое на высотах 21–23 м. Среднее время жизни молекулы озона в области его максимальной концентрации в средних широтах составляет ~ 0,5–1 мес. [2, 3]. В стратосферном слое озон возникает из молекулярного кислорода под влиянием ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца. Такая же реакция может происходить при воздействии ионизирующего излучения ядерного взрыва на атмосферу. Однако при взрыве образуются окислы азота, которые считаются наиболее опасными разрушителями озона [3, 5]. Облако окислов

азота может достичь стратосферы и уничтожить часть находящегося здесь озона, оставив Землю без озонового щита [5]. Также на это способны облака микроскопического сажевого аэрозоля [6].

Не существует единой точки зрения на «судьбу» озонового слоя после ядерных взрывов. В 60-е и 70-е гг. XX в. было проведено большое число ядерных взрывов в атмосфере. Тем не менее мониторинг стратосферы, выполненный после нескольких серий ядерных испытаний в атмосфере, не выявил статистически значимых изменений концентрации озона [7].

Ю.А. Израэль [1] описал результаты моделирования геофизических и экологических последствий крупномасштабной ядерной войны. Он показал, что может произойти критическое разрушение озонового слоя. За счет ультрафиолетового излучения при ядерном взрыве возникает дополнительное количество озона, но считается, что учитывать его следует только при большой мощности взрыва. Масштабное применение ядерного оружия вызовет необратимые изменения в циркуляции атмосферы и климате, разрушит озоновый слой. Восстановление озонового слоя произойдет в течение 2–4 лет.

Тоон О.В., Робок А., Турко Р.Р. и др. [8] на основе химико-климатической модели рассмотрели последствия гипотетической региональной ядерной войны между двумя ядерными государствами с использованием 100 зарядов мощностью ~ 15 кт. Авторы считают, что значительный дефицит озона в этом случае сохранится около 5 лет.

Таким образом, возникает вопрос: какие процессы — генерации новых порций озона или его разрушения — будут преобладать при атмосферном ядерном взрыве? Ответ мог бы дать натурный эксперимент. Но в 1963 г. был подписан Договор о час-

* Валентин Борисович Кашкин (rtcvbk@rambler.ru); Роман Валерьевич Одинцов (romatov@gmail.com); Татьяна Васильевна Рублева (tvrubleva@mail.ru).

тичном запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой (РТВТ). Его поддержали более 100 государств. Были созданы системы контроля его выполнения. Начали применяться аэрокосмические методы мониторинга. Единственный случай скрытых испытаний в нарушение Договора зарегистрирован в сентябре 1979 г. В 1996 г. был заключен новый Договор, предусматривающий всеобъемлющее запрещение ядерных испытаний, подписанный 183 странами, том числе Россией, США, Великобританией, Францией и Китаем.

Инцидент Вела и его последствия

22 сентября 1979 г. в 00:52:43 (UTC) американский спутник Vela 6911 обнаружил характерную двойную вспышку света продолжительностью ~ 2 с [9]. Vela 6911 — это один из космических аппаратов (КА) контроля ядерных испытаний с круговой орбитой высотой 11800 км и периодом обращения 112 ч. Одновременно на орбиты выводились два идентичных КА, которые располагались в противоположных полушариях Земли. Спутники были снабжены чувствительными фотодиодными матрицами для регистрации вспышек света, характерных для ядерных взрывов. Координаты взрыва оценивались грубо, с погрешностью в несколько тысяч км [10].

В момент взрыва КА Vela 6911 прошел над пустынным районом Мирового океана, где есть только один участок суши — крошечный остров Буве (Bouvet Island) с координатами 54°26′ ю.ш. и 3°24′ в.д. Полагают, что вспышка могла произойти вблизи этого острова [11].

За время своей службы КА Vela 6911 зафиксировали 41 двойную вспышку света, которая признавалась результатом ядерного испытания какой-либо из стран. В этот раз никто не взял ответственности на себя [9, 11]. Параметры наблюдаемой вспышки, которую принято называть «Инцидент Вела» (The Vela Incident), соответствуют ядерному взрыву в атмосфере мощностью ~ 2–3 кт ТНТ. Наличие двойной короткой (1–2 с при заряде мощностью 1–10 кт) вспышки характерно только для ядерных взрывов, это связано с особенностями формирования огненного шара при взрыве [12, 13]. Такую вспышку невозможно спутать с падением метеорита, разрядом молнии или другим естественным явлением [12]. Кроме излучения в видимом участке спектра, ядерный взрыв возбуждает мощную взрывную волну и ионизирующее излучение в ультрафиолетовом, рентгеновском диапазонах и гамма-излучение.

США направили в Индийский океан самолеты радиационной разведки WC-135, но следы радионуклидов в атмосфере обнаружены не были. Однако появились дополнительные факты. Установлено, что отдаленный взрыв в океане был зафиксирован на расстоянии в несколько тысяч километров системой подводных гидрофонов ВМС США (SOSUS), время взрыва было оценено как 00:52 (UTC). При-

мерно в то же время было замечено полярное сияние над японской базой Сева (Syowa) в Антарктике, а радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико) обнаружил аномальное перемещение ионосферных неоднородностей [13]. Кроме того, на островах Виктория и Тасмания, вблизи Австралии, в октябре и ноябре 1979 г. было выявлено аномальное содержание йода-131 в щитовидной железе у овец в районе, куда, возможно, произошел перенос радионуклидов из района ядерного взрыва [9, 11].

Космический аппарат Nimbus-7

В 1978 г. был запущен искусственный спутник Земли Nimbus-7 (США) с периодом обращения 104 мин 9 с. Этот аппарат с помощью сканирующего оптического спектрорадиометра TOMS [14] ежедневно снимал глобальную цифровую карту ОСО и потенциально мог зафиксировать «след» ядерного взрыва в озоновом слое Земли. Орбита КА — солнечно-синхронная, близкая к круговой. Орбитальные данные Nimbus-7 за 1979 г. в двухстрочечном формате TLE [15] были переданы нам профессором, старшим астрофизиком-исследователем Центра космических стандартов и инноваций ComSpOC (CSSI) США Т.С. Кельсо. В формате TLE за начало дня выбрано время 00:00:00 (UTC). Эти данные позволили нам рассчитать параметры витков орбиты КА на несколько недель. За 104 мин 9 с Земля поворачивается на угол $\Delta\varphi = 26,04^\circ$, именно на такую величину разнесены соседние витки орбиты.

Спектрорадиометр TOMS регистрировал излучение обратного рассеяния от молекул атмосферного озона на освещенной Солнцем части планеты в шести участках спектра от 312,34 до 379,95 нм. Прибор включает в себя монохроматор и зеркало, которое поворачивается и построчно сканирует земную атмосферу. Угол поворота зеркала α начинается с 51° в западном и заканчивается на 51° в восточном направлении. Время выполнения одного скана — не более 8 с. Приборная погрешность оценки ОСО составляет ~ 3%, случайная — 2% [14]. Результаты ежедневных измерений представлены в виде таблицы [16], включающей 288 отсчетов ОСО в области от $179,375^\circ$ з.д. до $179,375^\circ$ в.д. с шагом $1,25^\circ$ и 180 отсчетов ОСО в интервале от $89,5^\circ$ ю.ш. до $89,5^\circ$ с.ш. с шагом 1° .

По методике, приведенной в [17], угол поворота α сканирующего зеркала пересчитывался в долготу β точки на сферической поверхности Земли. При $\alpha = \alpha_{\max} = 51^\circ$ имеем $\beta = \beta_{\max} = 12,41^\circ$, это отклонение в одну сторону при сканировании по долготе от точки, отвечающей направлению в надири, т.е. $\alpha = 0$. Полному размаху сканирования соответствует значение $2\beta_{\max} = 24,82^\circ$, что при расстоянии между соседними витками $\Delta\beta = 26,04^\circ$ дает практически полный, с малыми пропусками, обзор атмосферы на экваторе. На экваторе 1° долготы примерно равен 111 км. На других широтах из-за сферичности Земли «цена» одного градуса становится меньше, а размах сканирования β_{\max} увеличивается,

причем перекрываются сцены, снятые на соседних витках орбиты. В частности, на $\varphi = 50^\circ$ ю.ш. 1° долготы соответствует 71,35 км, а размах по долготы в одну сторону $\beta_{\max} = 19,31^\circ$. На этой широте сцены на соседних витках перекрываются на $6,31^\circ$, т.е. почти на четверть всего скана. На $\varphi = 55^\circ$ ю.ш. перекрытие составило $8,64^\circ$.

Инцидент Вела и озоновый слой

Чтобы определить, повлиял ли взрыв на озоновый слой, потребовалось исследовать спутниковые карты ОСО по данным [16] в обширном регионе, включающем часть Атлантического и Индийского океанов, с 18 по 30 сентября 1979 г. Из орбитальных данных КА Nimbus-7 следует, что 22 сентября в 00:00:00 (UTC) закончился виток этого спутника № 4600 и начался новый виток № 4601. Изображения фрагментов этих витков показаны на рис. 1. Здесь по горизонтальной оси отложена географическая долгота λ , а по вертикальной — географическая широта φ .

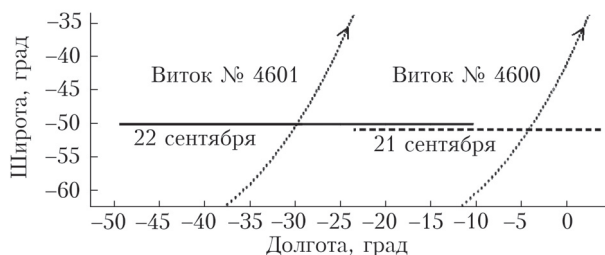


Рис. 1. Фрагменты двух витков № 4600 и № 4601 орбиты КА Nimbus-7

На рис. 1 показана также проекция орбиты КА на сферическую поверхность Земли. Точки проекции орбиты построены через 10 с. Стрелки указывают направление движения спутника по орбите. Сплошная линия — полный размах сканирования 22 сентября на $\varphi = 50^\circ$ ю.ш., а пунктир — размах сканирования 21 сентября на той же широте. Сцены на соседних витках спутника перекрываются. Орбита Nimbus-7 в 23:25:50 (UTC) 21 сентября пересекла параллель 50° ю.ш., при этом ее долгота

составляла $4,87^\circ$ з.д. В это время был выполнен последний скан. В 01:10:00 (UTC) орбита спутника пересекла параллель 50° ю.ш. при $\lambda = 30,87^\circ$ з.д., тогда был выполнен первый скан за 22 сентября.

Фрагменты 3D-карт озонового слоя приведены на рис. 2. Фрагмент слева за 21 сентября 1979 г. характеризует поле озона до взрыва. Справа показано, что 22 сентября в 00:52:43 (UTC) КА Vela зарегистрировал ядерный взрыв. Из-за перекрытия сканов на фрагменте за 22 сентября присутствуют участки поля озона и за 21 сентября, когда взрыва еще не было.

Найдено, что цифровая карта ОСО за 20 сентября похожа на карту ОСО за 21 сентября, средние значения различаются менее чем на 3%, коэффициент взаимной корреляции $R = 0,71443$. Если же сдвинуть карту за 20 сентября по λ на восток на 10° и по φ на 1° от экватора в Южное полушарие, то получим, что $R = 0,8731$, т.е. за сутки поле ОСО сместилось на 10° на восток и на 1° к югу.

Сравнивая фрагменты карты озона на рис. 2, можно отметить заметное изменение поля ОСО 22 сентября по сравнению с 21 сентября. Если бы взрыв не состоялся, карты были бы идентичны.

По характеру изменения поля ОСО можно утверждать, что на озоновом слое образовался «след» — возможный результат воздействия ударной волны ядерного взрыва, двигавшейся вверх со скоростью не менее скорости звука. Однако даже при скорости в 300 м/с достаточно 1,2 мин, чтобы волна достигла слоя озона. При мощности взрыва в атмосфере на уровне моря 1–3 кт расчетное избыточное давление фронта волны на высоте 20–22 км составило $0,07\text{--}0,1$ кг/см² без учета отражений, фокусировки лучей и влияния зонального ветра [18]. Импульс фазы сжатия может деформировать значительный объем воздуха вместе с содержащимся в нем озоном. На части озонового слоя появляется «провал», окруженный своеобразными волнами (рис. 2, б), который по размерам и форме существенно отличается от следов, возникающих при извержениях вулканов, сильных землетрясениях, военных действиях с участием большого количества авиации [2, 6]. Наземные химические взрывы, например взрыв в порту Бейрута в августе 2019 г., подобных следов не оставляют.

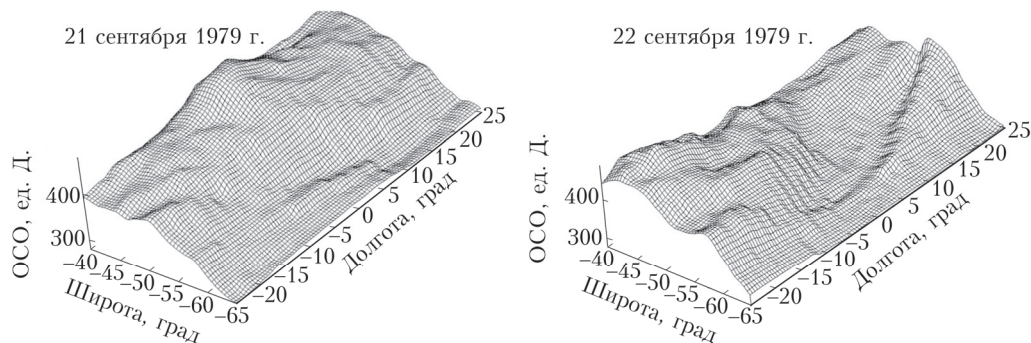


Рис. 2. Трехмерные изображения полей ОСО за 21 и 22 сентября

Заметим также, что в области от 60° ю.ш. до $30,5^\circ$ ю.ш. и от 30° з.д. до 50° в.д. среднее ОСО за 22 сентября, по сравнению со средним за 21 сентября, увеличилось слабо, всего на 5%, что лежит в пределах погрешности измерений. Дисперсия возросла с $1310,12$ (е.Д.)² до $2003,36$ (е.Д.)². Коэффициент корреляции полей ОСО за 20 и 21 сентября достигал $R = 0,8731$, а за 21 и 22 сентября $R = 0,045$. Следовательно, с вероятностью 98% можно считать, что случайные поля ОСО на рис. 2 со статической точки зрения относятся к разным генеральным совокупностям.

Обратимся снова к рис. 1. Участок поля ОСО за 21 сентября в интервале от -5° до -15° в.д. не может быть искажен ядерным взрывом, так как это результат измерений на витке орбиты № 4600 до взрыва. Через 104 мин 9 с КА Nimbus-7 прошел по витку № 4601, это случилось 22 сентября через 16 мин 44 с после взрыва. Таким образом, имеем участок поля озона до и после взрыва. Вычитая из данных ОСО за 22 сентября соответствующие данные за 21 сентября, получаем «след» взрыва, который отобразится как некоторый «провал» в озоновом слое. В «провале» ОСО уменьшилось на ~ 90 е.Д. Для сравнения: в Антарктической озоновой дыре количество озона может уменьшиться на ~ 200 е.Д. [2].

На практике удобнее вычитать данные за 22 сентября из данных за 21 сентября. Результат

приведен на рис. 3. Здесь вместо провала — «холм», более наглядный и удобный для анализа. Можно видеть, что темные участки на рис. 3 соответствуют подножию «холма», а серые и более светлые участки — вершине «холма». Скорее всего, на вершину пришлось основное воздействие ударной волны. Границы участка с ОСО более 90 е.Д. очерчивают район, где, по-видимому, был проведен ядерный взрыв. Это $4-7^\circ$ в.д. и $48-50^\circ$ ю.ш. к северо-востоку от о. Буве. Координаты точки взрыва оцениваются в $5,5^\circ$ в.д. и 49° ю.ш.

После 22 сентября след взрыва сместился к востоку, а его конфигурация существенно изменилась. Если 23 сентября он еще походил на «след» на рис. 2, то в следующие 4–8 дней вследствие зонального, меридионального переносов и перемешивания масс озона провал заполнился. При этом среднее ОСО практически оставалось прежним. В частности, среднее ОСО за 27 сентября на 10% больше такого же значения за 22 сентября, что превышает погрешность измерений, но лежит в пределах естественных вариаций ОСО.

Под воздействием электромагнитного и корпускулярного излучения во время взрыва в тропосфере могло образоваться облако озона, как и облако оксидов азота, разрушающее озон. Однако по истечении 16 мин 44 с после взрыва изменения общего содержания озона не обнаружено.

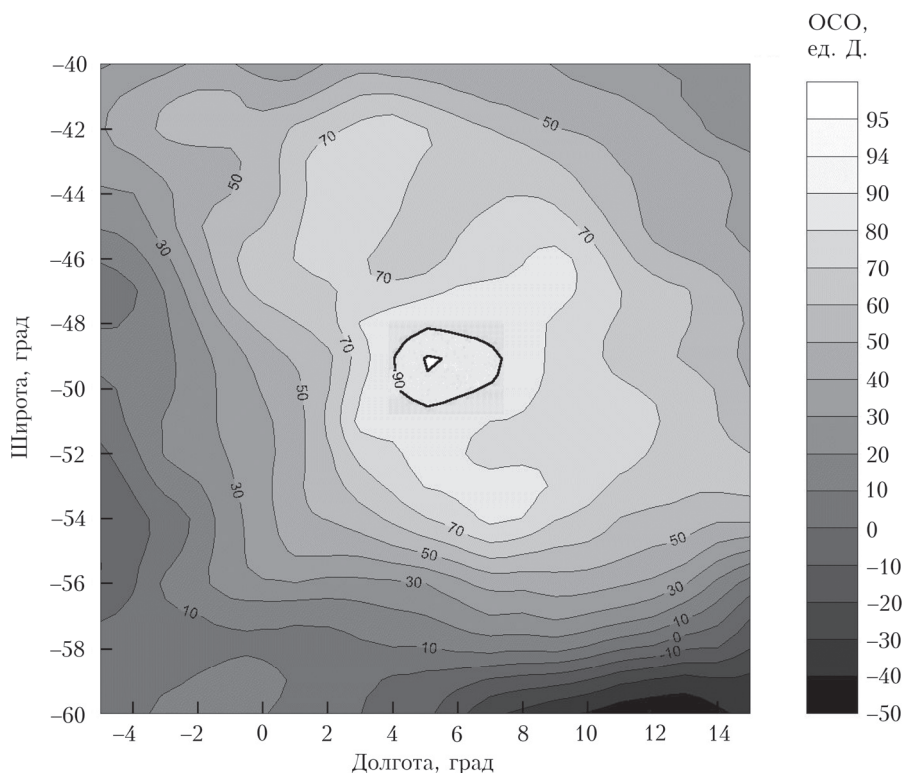


Рис. 3. Карта изолиний ОСО и выделенный «след» ядерного взрыва на озоновом слое

Заключение

Исследовано состояние озонового слоя Земли в Южном полушарии после ядерного взрыва малой мощности в атмосфере. Для анализа использованы спутниковые данные об ОСО за 22 сентября 1979 г., полученные через 16 мин 44 с после ядерного испытания. Показано, что стратосферный озон подвергся воздействию ударной волны при взрыве, в слое озона образовался «провал», окруженный своеобразными волнами — «отпечаток» взрыва. Через несколько дней «провал» исчез. Не обнаружено заметного изменения среднего ОСО в стратосфере после взрыва. Не замечено влияния ионизирующего излучения при взрыве на стратосферный озон, как и влияния оксидов азота.

Авторы выражают благодарность Т.С. Kelso за предоставление орбитальных данных спутника Nimbus-7 и В.Ю. Ромасько за расчет орбиты.

1. Израэль Ю.А. Крупномасштабные геофизические и экологические последствия возможной ядерной войны // Крупномасштабные климатические и биологические последствия ядерной войны. М.: Наука, 1986. С. 46–65.
2. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: СФУ, 2015. 218 с.
3. Кондратьев К.Я. Глобальная динамика озона // Итоги науки и техники. Геомagnetизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 11. 212 с.
4. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Д., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб. Гидрометеоздат, 1992. 288 с.
5. Johnston H., Whitten G., Birks J. The Effect of nuclear explosions on stratospheric nitric oxide and ozone // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N 27. P. 6107–6135.
6. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Специфика формирования антарктической и арктической озоновых аномалий // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 407–412.
7. Bauer E., Gilmore F.R. Effect of atmospheric nuclear explosions on total ozone // Rev. Geophys. 1975. V. 13, iss. 4. P. 451–458.
8. Toon O.B., Robock A., Turco R.P., Bardeen C., Oman L., Stenchikov G.L. Consequences of regional-scale nuclear conflicts // Science. 2007. V. 315, iss. 5816. P. 1224–1225.
9. Sublette C. Report on the 1979 Vela Incident // Nuclear Weapon Archive. 2001. P. 6–7. URL: <https://nuclearweaponarchive.org/Safrica/Vela.html>
10. NASA's HEASARC. [Электронный ресурс]. URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 15.12.2020).
11. De Geer L.-E., Wright C.M. The 22 September 1979 Vela Incident: Radionuclide and hydroacoustic evidence // Sci. Glob. Secur. 2018. V. 26, N 1. P. 20–54.
12. Действие ядерного оружия. М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1965. 678 с.
13. Guy E., Barasch G.E. Light Flash Produced by an Atmospheric Nuclear Explosion. Los Alamos: University of California, 1979. 4 p.
14. McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Nimbus-7 TOMS. User's Guide // NASA. 1996. 73 p.
15. Andersen D.E. Computing NORAD Mean Orbital Elements From A State Vector: Thesis Air Force Inst. of Tech. Harvard: NASA Astrophysics Data System, 1994. P. 1–9.
16. NASA [Электронный ресурс]. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.01.2021)
17. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
18. Рид Дж.В. Воздушная ударная волна при подземных взрывах // Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974. С. 293–413.

V.B. Kashkin, R.V. Odintsov, T.V. Rubleva. Impact of nuclear explosions on the ozone layer of the Earth.

In our nuclear age, fears are expressed about the fate of the Earth's ozone layer, and it is believed that both large-scale and local nuclear conflicts can destroy the ozone layer for years. On September 22, 1979, an unidentified state secretly performed a nuclear test in a desolate region of the World Ocean. This event is commonly referred to as the Vela Incident. In this work, we used ozone data obtained by the NASA satellite Nimbus-7 17 minutes after the explosion. It is shown that the shock wave left a mark on the ozone layer. No decrease in the amount of ozone is noticed. The coordinates of the explosion site are determined from the mark.