

УДК 551.510.4

Сравнение результатов наземных и спутниковых наблюдений общего содержания озона над Томском за период 2006–2020 гг.

О.Е. Баженов^{✉1}, А.В. Невзоров¹, С.В. Смирнов²,
А.В. Ельников³, В.А. Логинов^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

³Сургутский государственный университет
628403, г. Сургут, пр. Ленина, 1

Поступила в редакцию 5.09.2022 г.;
после доработки 9.11.2022 г.;
принята к печати 28.12.2022 г.

Представлены временные ряды регулярных наблюдений общего содержания озона над Томском, полученные тремя независимыми приборами за период с 2006 по 2020 г. Определены основные статистические характеристики этих рядов, приводится их сравнительный анализ, в том числе анализ многолетних средних годовых ходов. Обсуждаются причины расхождения данных измерений.

Ключевые слова: общее содержание озона, озонметр М-124, спектрометр ОМІ; total ozone column, M-124 ozonometer, OMI spectrometer.

Введение

Атмосферный озон как оптически активная малая газовая составляющая атмосферы играет важную роль в защите биосферы от жесткого солнечного УФ-излучения. В настоящее время наблюдения за общим содержанием озона (ОСО) проводятся с использованием различных спектрометров, установленных как на наземных пунктах мировой озонметрической сети, так и на борту метеорологических спутников. Сравнение данных, полученных с помощью различных методов и средств измерений, является важным элементом системы мониторинга [1–4].

В настоящей работе представлены результаты сравнения данных наблюдений ОСО над Томском (56,6° с. ш., 85,0° в. д.), выполненных тремя независимыми приборами, два из которых — это озонметры М-124 [5, 6], третий — спектрометр ОМІ (Ozone Monitoring Instrument) [7]. Целью этого сравнения является оценка подобия или расхождения данных наблюдений при использовании разных методов и средств измерений.

Результаты инструментальных наблюдений ОСО в Томске

Один озонметр М-124 входит в состав измерительного оборудования Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН, другой — в состав геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН. Прибор ОМІ работает на борту спутника Aura (NASA). Лидарная станция и геофизическая обсерватория располагаются на расстоянии около 300 м друг от друга. Ряды наблюдений ОСО охватывают 15-летний интервал (с января 2006 г. по декабрь 2020 г.), в них имеются пробелы (отсутствие данных), которые составляют менее 10%.

На рис. 1 представлены результаты измерений ОСО тремя приборами в виде временных рядов среднедневных значений. В рядах показаны участки с аномальными значениями ОСО, которые наблюдались в зимне-весенние периоды 2010, 2017 и 2018 гг. (положительные аномалии) и осенне-зимний период 2011 г. (отрицательная аномалия) и были описаны в [8, 9]. На рис. 1 также приведены результаты расчета многолетних средних: среднеквадратических отклонений (СКО) и коэффициентов линейных трендов (без вычитания годового хода). Как видно, средние и тренды ОСО несколько различаются между собой, однако с учетом относительных погрешностей определения среднедневных значений ОСО в 3–4 и 1–2%, характерных для М-124 и ОМІ соответственно, эти различия допустимы.

* Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzegov@iao.ru); Сергей Васильевич Смирнов (smirnov@imces.ru); Андрей Владимирович Ельников (andreyeln@mail.ru); Вадим Андреевич Логинов (dirkloginov@gmail.com).

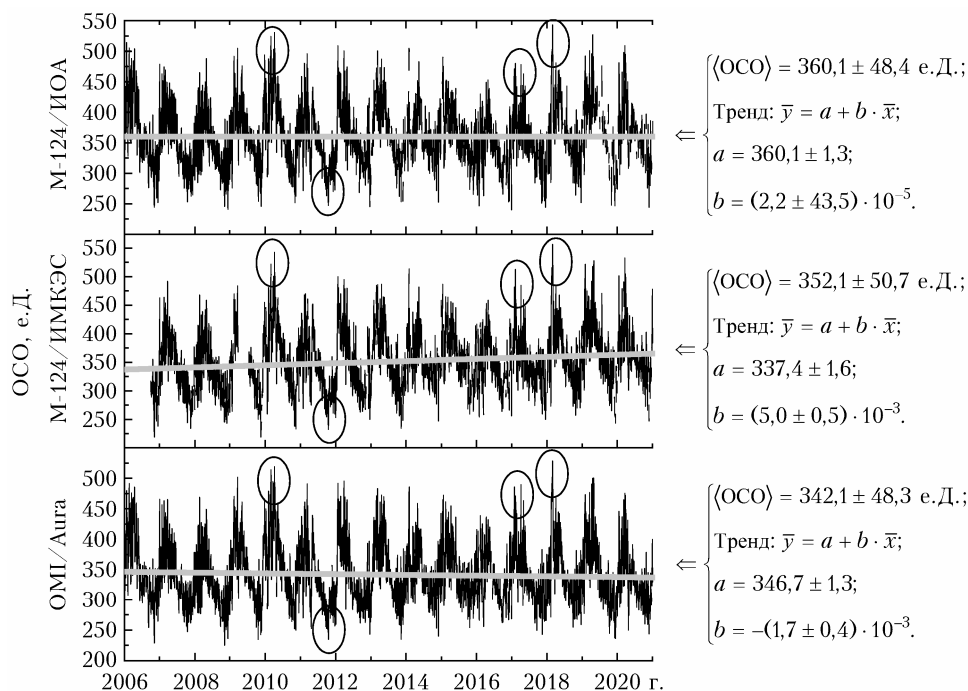


Рис. 1. Временной ход средненежных значений ОСО в г. Томске с 2006 по 2020 г. и его основные статистические характеристики по данным измерений приборами М-124 и ОМІ; аномальные значения ОСО, наблюдаемые в 2010, 2011, 2017 и 2018 гг., выделены кружками

На рис. 2 результаты наблюдений ОСО показаны в виде гистограммы плотности распределения с дискретностью 20 е.Д. — значением, превышающим среднюю погрешность измерения приборов.

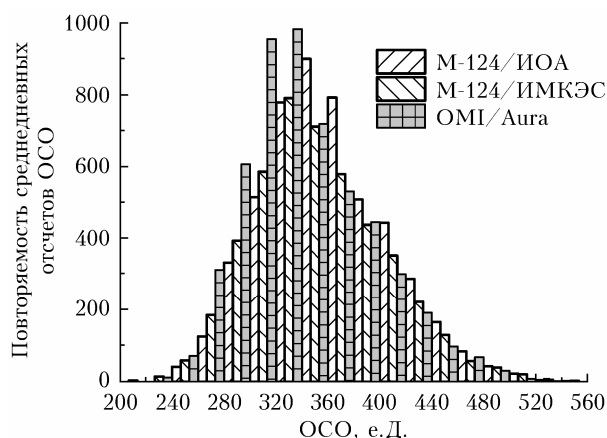


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения значений ОСО по данным измерений приборами М-124 и ОМІ

За рассматриваемый период наблюдений над Томском как самые низкие значения ОСО в интервале 200–220 е.Д., так и очень высокие в интервале 540–560 е.Д. регистрировались только в геофизической обсерватории ИМКЭС. Для некоторых интервалов значения ОСО заметно различаются, но в целом плотности их распределения подобны. Наблюдаемые значения ОСО и асимметрия их плотности распределения обусловлены как географическим местоположением пункта наблюдения, так и сезонными колебаниями поля стратосферного озона умеренных

широт, связанными с сезонной изменчивостью атмосферной циркуляции, в частности с частыми смещениями в зимне-весенние периоды богатых озоном стратосферных воздушных масс из полярных широт в умеренные. Данная особенность временного хода ОСО подробно проанализирована в [8].

Для оценки внутренних взаимосвязей (колебаний) во временных рядах ОСО были рассчитаны автокорреляционные функции (АКФ) [10, 11]. В нашем случае для оценки краткосрочных колебаний ОСО максимальный временной сдвиг был ограничен 20 днями, что соответствует максимальному времени жизни макромасштабных тропосферных барических образований — блокирующих антициклонов или обширных и глубоких центральных циклонов. Результаты расчета АКФ приведены на рис. 3.

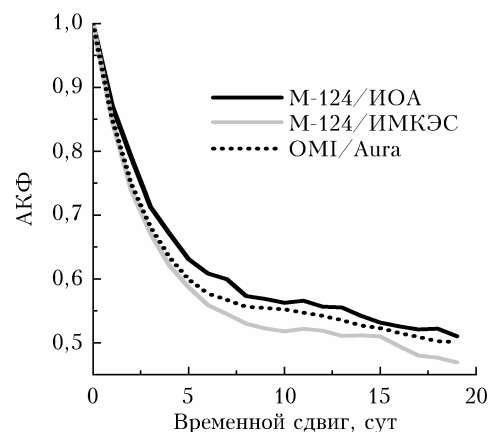


Рис. 3. Автокорреляционные функции временных рядов ОСО по данным измерений приборами М-124 и ОМІ

Поскольку временные ряды данных представляют один и тот же объект наблюдения (поле ОСО) за один и тот же временной интервал (2006–2020 гг.), то их АКФ должны быть подобны. Однако на рис. 3 они различаются. Кривая АКФ для ряда ОМІ/Aura в диапазоне временного сдвига с 5-го по 20-й день имеет более гладкий вид и располагается между кривыми АКФ для рядов двух М-124. Эта особенность, вероятно, обусловлена тем, что ряд данных ОМІ является более однородным, без пропусков в измерениях из-за неблагоприятной для наземных наблюдений погоды. К тому же влияние облачности на регистрируемое спектрометром ОМІ отраженное солнечное излучение значительно слабее, чем влияние облаков на приходящее солнечное излучение, которое регистрирует озонметр М-124 у подстилающей поверхности.

Сравнительный анализ данных наблюдений ОСО

Для количественной оценки схождения временных рядов ОСО над Томском были проведены регрессионный и статистический анализы. Их результаты представлены на рис. 4 и в таблице соответственно.

Чтобы оценить сезонные особенности данных ОСО, были рассчитаны многолетние средние величины годового хода и расхождения между ними:

$$\text{ОСО}_{A,B,C}[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \text{ОСО}_{A,B,C}[i, j],$$

$$\Delta_{A,B} = \frac{\text{ОСО}_A[i] - \text{ОСО}_B[i]}{\text{ОСО}_{A,B}[i]},$$

$$\overline{\text{ОСО}_{A,B}[i]} = \frac{\text{ОСО}_A[i] + \text{ОСО}_B[i]}{2}.$$

Формулы для пар A, C и B, C аналогичны. Здесь A, B и C – сравниваемые приборы; i – порядковый номер среднеедневного значения ОСО во временном ряде; j – порядковый номер года во временном ряде; N – длина временного ряда.

Основные статистические характеристики сравнительного анализа временных рядов ОСО, полученных по данным наземных и спутниковых наблюдений за период с 2006 по 2020 г. двумя озонόμεтрами М-124 и спектрометром ОМІ

Сравниваемые пары рядов ОСО	S , е.Д.	M , е.Д.
ИОА–ИМКЭС	16,7	6,6
ИОА–ОМІ	23,4	17,6
ИМКЭС–ОМІ	20,8	12,0

Примечание. $S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$ – среднее квадратическое расхождение;

$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)$ – среднее расхождение.

Многолетние средние годовые ходы (сезонная изменчивость) показаны на рис. 5, а, расхождения между ними – на рис. 5, б. На рис. 5, а видно, что все три годовых хода четко отражают как выраженную сезонную изменчивость поля ОСО с зимне-весенним (февраль–май) максимумом и осенним (ноябрь) минимумом, так и короткопериодную изменчивость, обусловленную в первую очередь циркуляционными процессами синоптического масштаба (3–20 сут) и фотохимическими процессами (в марте и апреле).

Следует отметить, что в годовом ходе ОСО в Томске с 2006 по 2020 г., по сравнению с последним десятилетием прошлого века и началом текущего

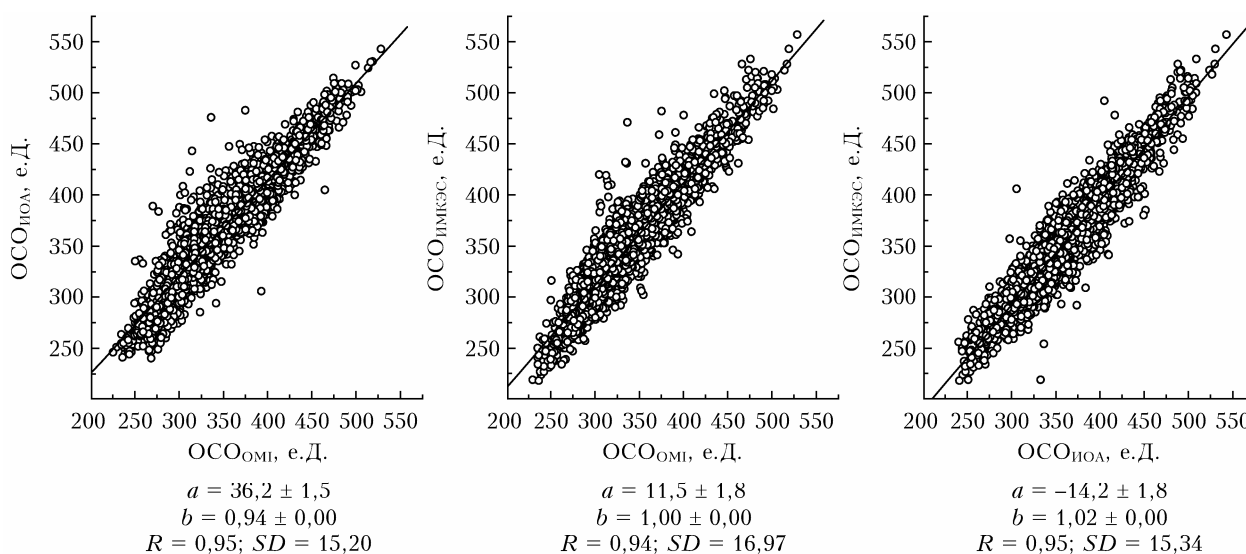


Рис. 4. Корреляция между данными измерений ОСО, полученными с использованием трех независимых приборов: М-124/ИОА, М-124/ИМКЭС и ОМІ/Aura; a и b – коэффициенты регрессионного уравнения, е.Д.; R – коэффициент корреляции; SD – стандартное отклонение, е.Д.

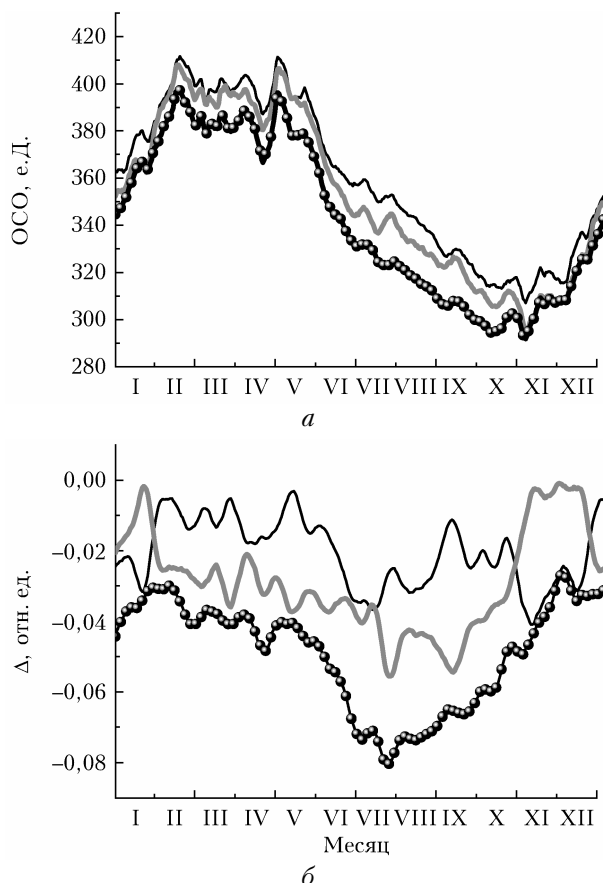


Рис. 5. Сезонная изменчивость ОСО в Томске по данным наблюдений в 2006–2020 гг. приборами М-124/ИОА (черная кривая), М-124/ИМКЭС (серая кривая) и ОМІ/Ауга (кривая с символами) (а). Расхождения между данными наблюдений ОСО: черная кривая — $\Delta_{\text{ИМКЭС-ИОА}}$, серая кривая — $\Delta_{\text{ОМІ-ИМКЭС}}$, кривая с символами — $\Delta_{\text{ОМІ-ИОА}}$ (б). При построении при менялось сглаживание по 10 точкам

столетия, появились некоторые характерные особенности: наличие двух выраженных максимумов в феврале и мае вместо одного в марте-апреле и смещение осеннего минимума с октября на ноябрь. Однако если рассматривать абсолютные значения в рядах ОСО, то мы видим определенные расхождения между ними. Так, данные измерений М-124/ИОА превышают данные измерений двух других приборов. Наиболее выраженными эти расхождения становятся с июня по октябрь. Это хорошо видно на рис. 5, б, где представлены результаты расчета расхождений между рядами данных трех приборов. Максимальное расхождение (до 8%) наблюдается в июле между приборами М-124/ИОА и ОМІ/Ауга, 4–6% — в июле–сентябре между М-124/ИМКЭС и ОМІ/Ауга, менее 5% — в ноябре между озонометрами М-124/ИОА и М-124/ИМКЭС.

Основной причиной наблюдаемого систематического расхождения между данными трех приборов, вероятно, являются различия в значениях калибровочных коэффициентов, определяемых в ходе проверок. В нашем случае все три прибора калибровались в разное время независимо друг от друга.

Прибор ОМІ регулярно самокалибруется на борту спутника. Озонометры М-124 поверяются раз в 2–3 года в ГГО им. А.И. Воейкова по эталонному спектрофотометру Добсона. Увеличение расхождения между данными ОСО в теплое время года связано, по нашему мнению, с образованием и присутствием в этот период в атмосфере полей конвективной облачности, обладающей значительной горизонтальной и вертикальной неоднородностью оптической плотности по сравнению с преобладающей облачностью неконвективного происхождения в холодное время.

Основной причиной наблюдаемых случайных расхождений предположительно является также облачность, которая по-разному влияет на регистрируемое приборами излучение. В случаях наземных измерений по рассеянному в зените солнечному излучению с использованием М-124 при расчетах ОСО вводится корректирующий, так называемый зенитный, коэффициент, значение которого зависит от состояния облачного небосвода, т.е. спектральной оптической плотности присутствующей облачности. Поэтому неточно определенный тип облачности и, следовательно, неверно введенный зенитный коэффициент могут привести к искаженному значению ОСО. При спутниковых же измерениях используется отраженное подстилающей поверхностью и облачностью солнечное излучение, ослабление которого обуславливается фактически только поглощением стратосферным озоном.

Заключение

Проведено сравнение результатов наземных и спутниковых наблюдений ОСО в Томске за период с 2006 по 2020 г., полученных тремя независимыми приборами — озонометрами М-124 и спектрометром ОМІ.

Сравнительный анализ временных рядов ОСО показал приемлемое в пределах погрешностей приборов совпадение данных. Корреляция между рядами составила 0,94–0,95. Наименьшие расхождения, которые не превышают погрешности измерения приборов, как и следовало ожидать, оказались между данными однотипных приборов — озонометрами М-124. Наибольшие расхождения наблюдаются в теплый период года между данными М-124/ИОА и ОМІ, достигая 8%, и между М-124/ИМКЭС и ОМІ — до 6%, что предположительно связано с влиянием быстропеременной конвективной облачности на регистрируемое приборами солнечное излучение. Чтобы подтвердить данное предположение, необходимо дополнительно проанализировать данные наблюдений ОСО за теплые периоды с привлечением синоптической информации об облачности. В случае подтверждения полученных результаты могут быть полезными для коррекции данных как наземных, так и спутниковых наблюдений ОСО в сложных метеорологических условиях, связанных, в частности, с формированием и развитием мощной кучевой облачности, когда наземные наблюдения ОСО затруднены.

Благодарности. С.В. Смирнов выражает глубокую признательность сотрудникам обсерватории Е.Т. Чемяковой, М.В. Пахмистеровой, О.Н. Петровой и Н.С. Терсковой за проведение озонометрических наблюдений.

Финансирование. Измерения ОСО, проводимые на Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН и в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, проводятся в рамках государственных заданий ИОА и ИМКЭС. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и ННФИ (научный проект № 20-55-56028 (в части обработки и анализа результатов)).

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661).

Список литературы

1. *Bramstedt K., Gleason J., Loyola D., Thomas W., Bracher A., Weber M., Burrows J.P.* Comparison of total ozone from the satellite instruments GOME and TOMS with measurements from the Dobson network 1996–2000 // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3. P. 1409–1419.
2. *Fioletov V.E., Kerr J.B., Hare E.W., Labow G.J., McPeters R.D.* An assessment of the world ground-based total ozone network performance from the comparison with satellite data // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 1737–1747.
3. *Vanicek K.* Differences between ground Dobson, Brewer and satellite TOMS-8, GOME-WFDOAS total ozone observations at Hradec Kralove, Czech // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 5163–5171.
4. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Сравнение спутниковых и наземных измерений общего содержания озона // *Исследование Земли из космоса.* 2013. № 4. С. 83–91.
5. *Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н.* Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 238 с.
6. *Гуцин Г.П., Соколенко С.А.* Новый малогабаритный озонометр М-124, предназначенный для измерения суммарного озона // *Тр. VI Всесоюз. симп. по атмосферному озону, 15–17 мая 1985 г., Ленинград.* Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 49–56.
7. *Anton M., Lopez M., Vilaplana J.M., Kroon M., McPeters R., Bacyn M., Serrano A.* Validation of OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column using five Brewer spectroradiometers at the Iberian peninsula // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N D14307. DOI: 10.1029/2009JD012003.
8. *Баженов О.Е., Ельников А.В., Сысоев С.М.* Общее содержание озона над Томском в период 1994–2017 гг.: результаты статистического анализа // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 7. С. 556–561; *Bazhenov O.E., Elnikov A.V., Sysoev S.M.* Total ozone content over Tomsk in 1994–2017: Results of statistical analysis // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 6. P. 680–685.
9. *Долгий С.И., Невзоров А.В., Ельников А.В., Сысоев С.М.* Статистический анализ временного ряда общего содержания аэрозоля в стратосфере над Западной Сибирью // *Вестн. кибернетики.* 2017. № 3. С. 40–46.
10. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных процессов. М.: Книга, 2012. 541 с.
11. *Подкорытова О.А., Соколов М.В.* Анализ временных рядов: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2018. 267 с.

O.E. Bazhenov, A.B. Nevzorov, S.V. Smirnov, A.V. Elnikov, V.A. Loginov. Comparison of ground-based and satellite observations of total ozone content over Tomsk for 2006–2020.

In this work, we present the time series of regular observations of the total ozone content over Tomsk with three independent instruments over the period from 2006 to 2020. The main statistical characteristics of these time series are determined. We carried out the comparative analysis of these time series with each other and, in particular, the analysis of long-term annual average behaviors. The causes for the discrepancies of these measurements are discussed.