Анализ многоугловых поляризационных измерений спутникового радиометра PARASOL над оптически сложными водами Бохайского залива

П.А. Салюк^{1,2}, И.Е. Стёпочкин^{1,2}, К.А. Шмирко^{1,3}, И.А. Голик¹

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690091, Россия E-mail: shmirko.ka@dvfu.ru

² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru

³ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mail: kshmirko@gmail.com

Цель работы заключается в анализе особенностей использования многоугловых поляризационных измерений спутникового радиометра PARASOL для изучения характеристик атмосферного аэрозоля над оптически сложными водами Бохайского залива при различных состояниях атмосферы и различном оптическом типе подстилающей морской толщи. Измерения PARASOL позволяют восстановить степени поляризации регистрируемого излучения при фазовых углах около 90° на трёх длинах волн 490, 670 и 865 нм. Проведён анализ диаграмм рассеяния данных параметров, который позволил классифицировать состояние атмосферы и подстилающей поверхности в районе Бохайского залива. Рассчитанные значения степеней поляризации при фазовых углах около 90° имеют тенденцию к увеличению по мере уменьшения размера атмосферных частиц при переходе от состояния сплошной облачности к пылевой буре и к атмосферной водной дымке. В случае чистой атмосферы существенное влияние на получаемые результаты оказывает речной сток, который уменьшает степень поляризации излучения за счёт многократного рассеяния на взвешенных частицах в морской толще. Использование многоволновых поляризационных измерений позволяет анализировать такие сложные для интерпретации ситуации, как пыль в облаках или детектирование пылевых бурь над речным выносом. В целом полученные результаты не противоречат опыту использования эффекта Умова для изучения пылевого аэрозоля, который заключается в обратной связи между максимумом поляризации излучения и геометрическим альбедо, и открывают перспективы применения данного подхода в отношении спутниковых измерений при использовании предварительной классификации данных и таблиц сравнения, полученных методами прямого численного моделирования.

Ключевые слова: многоугловые измерения, спутник, поляризация, пыль, оптически сложные воды, эффект Умова, PARASOL, POLDER, Бохайский залив

Одобрена к печати: 11.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-255-265

Введение

Данные поляризационных многоугловых измерений обладают высокой чувствительностью к морфологии атмосферных частиц, вертикальной изменчивости аэрозольных слоёв и поляризации отражённого от поверхности излучения (Dubovik et al., 2019; Pavlov et al., 2017). Применение метода со спутников открывает большие возможности по оперативному анализу данных на больших территориях и позволяет изучать различные атмосферные процессы на синоптических, сезонных, межгодовых и потенциально на климатических временных масштабах (Fréville et al., 2020; Li et al., 2020), а также позволяет использовать измерения в качестве входных данных для численных моделей (Tsikerdekis et al., 2021). Кроме этого, возможно изучение вклада моря в измеряемые сигналы, что открывает дополнительные перспективы для дистанционного зондирования цвета океана (Jamet et al., 2019).

В настоящее время накоплен большой массив спутниковых поляризационных измерений радиометрами семейства POLDER (POLDER-1 1996–1997, POLDER-2 2003, PARASOL 2005–2013), с помощью которых проводилось многоугловое и многоспектральное измерение поляризации в оптическом диапазоне (три спектральных канала: 490, 670 и 865 нм; три угла поляризации: -60, 0, $+60^{\circ}$; 14-16 углов направления детектора). Для того чтобы продолжить ряд аналогичных измерений в период после 2011 г., НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ*. NASA — National Aeronautics and Space Administration) планировало к запуску многоугловой радиометр APS (*англ*. Aerosol Polarimetry Sensor) (Peralta et al., 2007), но он был уничтожен при неудачном старте ракеты (https://www.nasa.gov/mission_pages/Glory/launch/index.html). В настоящее время планируется запуск аналогичных радиометров: 3MI (от *англ*. Multi-Viewing Multi-Channel Multi-Polarisation Imaging) космическим агентством EUMETSAT в 2021 г. (https://www.eumetsat.int/eps-sg-3mi) (Fougnie et al., 2018) и MAIA (*англ*. Multi-Angle Imager for Aerosols) космическим агентством NASA в 2022 г. (https://maia.jpl.nasa.gov) (Diner et al., 2018), где будет реализовано многоугловое и многоспектральное измерение поляризации оптического излучения.

Несмотря на весь имеющийся объём спутниковых многоугловых поляризационных измерений, он остаётся малым по сравнению с фотометрическими измерениями. При этом существующие измерения поляризации рассматриваются лишь как дополнительные данные, необходимые для понимания возможностей поляриметрии для разработки новых миссий, а не как незаменимый источник аэрозольной информации для конкретных климатологических и экологических приложений (Dubovik et al., 2019). Такая ситуация сложилась из-за сложности анализа многоугловых поляризационных измерений и их теоретического обоснования. При этом данный тип измерений со спутников в целом не уступает фотометрическим измерениям по точности восстанавливаемых значений физических величин (Dubovik et al., 2011; Kokhanovsky et al., 2015), а при прочих равных условиях может обеспечить лучшую точность определения. Например, в работе (Hasekamp et al., 2011) продемонстрировано, что точность восстановления показателя Ангстрема с помощью поляризационных измерений была выше по сравнению с результатами использования только интенсивностей излучения. Кроме этого, многоугловые поляризационные измерения дают дополнительные возможности по расчёту таких величин, как оптическая толщина поглощения аэрозоля, альбедо однократного рассеяния, спектральная аэрозольная оптическая толщина мелко- и крупнодисперсной фракций, спектральный показатель Ангстрема (Chen et al., 2020).

Всё перечисленное выше, включая планы мировых космических агентств по запуску спутниковых поляризационных радиометров, говорит об актуальности и востребованности подобных подходов, а также о необходимости развития методов обработки и анализа многоугловых поляризационных измерений и расширения сферы их применения.

Цель данной работы состоит в анализе особенностей использования многоугловых поляризационных измерений PARASOL для изучения характеристик атмосферного аэрозоля над оптически сложными водами Бохайского залива.

Район исследований

Бохайский залив (*puc. 1*, см. с. 257) находится на пути главных траекторий распространения Азиатских пылевых бурь из Монголии через Китай на акватории Восточно-Китайского и Японского морей, при этом залив оказывается основным местом разгрузки пылевых аэрозолей (Kai, Gao, 2007; Yan et al., 2014). Кроме того, исследуемая акватория находится рядом с индустриальными районами Китая, из которых идёт поставка антропогенного аэрозоля (Xin et al., 2011; Zhang et al., 2012). Это говорит о важности изучения данного района как с точки зрения понимания региональных климатообразующих процессов, так и для экологического мониторинга. Воды Бохайского залива испытывают сильное влияние стоков рек Хуанхе и Хайхе, которые поставляют огромное количество взвешенных частиц в Жёлтое море (Fan, Huang, 2008; Qiao et al., 2010). Это обуславливает «оптическую сложность» вод залива, в которых первичные гидрооптические характеристики определяются речными выносами, интенсивными цветениями фитопланктона (Jo et al., 2007), периодическими выпадениями пылевого аэрозоля (Tan, Wang, 2014).



Набор различных типов атмосферного аэрозоля над Бохайским заливом и одновременная оптическая сложность подстилающих морских вод создают трудности для анализа любых спутниковых измерений над этим районом (Shi, Wang, 2012; Zhang et al., 2016).

Методы и инструменты

В настоящей работе проанализирован ряд многоугловых поляризационных измерений спутникового радиометра PARASOL во временной период ± 6 дней около пылевой бури, распространяющейся над Жёлтым морем 1–2 марта 2008 г. (Tu et al., 2015).

Использовались данные PARASOL первого уровня L1B (https://web-backend.icare.univlille.fr), из которых рассчитывались степени поляризации (*P*) на трёх длинах волн: 490, 670 и 865 нм (P_{490} , P_{670} , P_{865}) — для 16 направлений детектора:

$$P_{\lambda} = \frac{\left(Q_{\lambda}^2 + U_{\lambda}^2\right)^{1/2}}{I_{\lambda}} \times 100\%,$$

где P_{λ} и U_{λ} — компоненты вектора Стокса, характеризующие линейную поляризацию; I_{λ} — интенсивность оптического излучения на заданной длине волны λ . А также рассчитывались фазовые углы между падающим излучением Солнца и направлением регистрируемого излучения.

Дополнительно для визуализации состояния атмосферы и водной поверхности использовались RGB-изображения (R – *англ*. red, красный; G – *англ*. green, зелёный; B – *англ*. blue, синий) MODIS-Aqua (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), полученные с интернет-портала Worldview (https://worldview.earthdata.nasa.gov).

Благодаря различным направлениям детектора радиометра PARASOL над каждым пикселем возможен расчёт *P* при различных фазовых углах. И над отдельными районами можно выделять необходимый фиксированный диапазон углов для анализа распределений *P*. В работе проанализированы распределения P_{λ} при фазовых углах в диапазоне $80-90^{\circ}$ ($P_{\lambda}(90^{\circ})$), что обычно соответствует максимуму поляризации света, а значения обратно пропорциональны коэффициенту рассеяния в воде (Ivanoff et al., 1961). В исследованиях (Zubko et al., 2017, 2021) показано, что эффект Умова, заключающийся в обратной линейной зависимости между максимумом поляризации света и логарифмом геометрического альбедо, применим для изучения атмосферных пылевых частиц. В настоящей работе проанализированы диаграммы рассеяния $P_{\lambda}(90^{\circ})$ для всех сочетаний длин волн 490, 670 и 865 нм при различных состояниях атмосферы и различном оптическом типе морских вод с целью оценки вклада компонентов атмосферы и водной толщи в регистрируемые поляризационные сигналы со спутника.

Результаты и обсуждение

На *рис. 2* (см. с. 259) представлены результаты спутниковых измерений степени поляризации $P_{\lambda}(90^{\circ})$ на длинах волн 490, 670 и 865 нм для различных состояний атмосферы. Строка 1 — RGB-изображения с радиометра MODIS-Aqua; строки 2–4 — диаграммы рассеяния между разными комбинациями длин волн, на которых измерялись $P_{\lambda}(90^{\circ})$. Точки оранжевого цвета соответствуют измерениям над водами, подверженными сильному влиянию речного стока. Точки зелёного цвета — измерения на акватории, где прямое влияние стока рек отсутствует.

Первый столбец *рис. 2* (см. *рис. 2а–г*): данные, полученные при наличии облачности. Видно, что степень поляризации зарегистрированного излучения близка к нулю и не превышает 15 %, что типично для облачных условий. Кластеры с зелёными и оранжевыми точками практически совпадают; это связано с тем, что все получаемые сигналы формируются похожими по характеристикам слоями облаков, а влияние водной поверхности отсутствует. Небольшие различия могут быть вызваны тем, что в зелёном полигоне облачность не такая плотная и присутствуют небольшие просветы по сравнению с оранжевым районом.

Второй столбец *рис. 2* (см. *рис. 2д–з*): оранжевые точки измерены над пылевой бурей, зелёные точки — над водяным облаком, включающим атмосферную пыль. Положение двух кластеров близко, но наблюдается небольшое разделение точек, в том числе по наклону. Для измерений над оранжевым полигоном по сравнению с зелёным полигоном увеличены значения $P_{865}(90^\circ)$ при значениях больше 20-25% (смещение вверх оранжевых точек на *рис. 2ж* и з). А также увеличены значения $P_{490}(90^\circ)$ при значениях менее 25% (смещение оранжевых точек вправо от зелёных на *рис. 2е* и *ж* при отсутствии смещения оранжевых точек влево и вниз на *рис. 23*). Атмосферная пыль — это обычно крупнодисперсные несферические частицы, которые имеют низкую степень поляризации (Waquet et al., 2013), что подтверждается приведёнными данными. В целом значения степени поляризации выше, чем для частиц в облаке. На диаграммах рассеяния, включающих измерения на 490 нм, происходит разделение на два кластера по углу наклона.

Третий столбец *puc.* 2 (см. *puc.* 2u-m): измерения при чистой атмосфере. Видны явные различия между оранжевыми и зелёными точками, что свидетельствует о значительном влиянии в регистрируемых сигналах взвешенных частиц, выносимых речным стоком в морскую воду. Значения $P_{670}(90^\circ)$ и $P_{865}(90^\circ)$ существенно снизились при наличии речного выноса — примерно на 10 % в обоих случаях (смещение оранжевого кластера влево и вниз на *puc.* 2m). Это связано с тем, что увеличение количества взвешенных частиц в морской воде приводит к усилению процессов многократного рассеяния света и, таким образом, к снижению степени поляризации (Loisel et al., 2008). Кроме этого, важен тот факт, что в случае чистой атмосферы в выделенных кластерах уменьшается близкая к линейной взаимосвязь.



Рис. 2. Результаты спутниковых измерений радиометром PARASOL над Бохайским заливом при различных состояниях атомсферы: *a*, *d*, *н*, *u* — RGB-измерения MODIS-Aqua; *б*-*г*, *e*-*з*, *κ*-*м*, *o*-*p* — диаграммы рассеяния степени поляризации P_λ(90°) при фазовых углах, близких к 90°, на длинах волн 490, 670 и 865 нм. Оранжевые точки — над акваторией, подверженной влиянию речного стока; зелёные точки — над акваторией без прямого воздействия речного стока

Четвёртый столбец на *рис. 2* (см. *рис. 2н*–*p*): измерения при атмосферной дымке, которую видно по синему оттенку на соответствующем RGB-изображении. Значения степени поляризации очень высоки и лежат в диапазоне 30–80 %, что говорит о наличии мелкодисперсных аэрозольных частиц. Полученные кластеры точек переходят из одного в другой, но не совпадают по диапазонам измеряемых значений, что может быть связано с разной долей мелкодисперсных и крупнодисперсных фракций аэрозоля в составе атмосферы. При этом влияние водной поверхности не должно быть значительным, поскольку более 90 % сигнала, регистрируемого на спутнике, формируется в атмосфере и в случае наличия рассеивающих частиц в атмосфере именно они дадут основной вклад в $P_{\lambda}(90^{\circ})$. Полученный результат подтверждает, что измерения степени поляризации под фазовыми углами, близкими к 60–90°, высокочувствительны к наличию мелкодисперсного аэрозоля (Waquet et al., 2013).

На *рис. 3* все рассмотренные случаи сведены на одни оси на диаграммах рассеяния степени поляризации $P_{\lambda}(90^{\circ})$ при трёх комбинациях длин волн: 490, 670 и 865 нм. Видна общая тенденция увеличения степени поляризации $P_{\lambda}(90^{\circ})$ при уменьшении размера частиц в атмосфере (от частиц в водяном облаке к частицам в пылевой буре и водяной дымке). В случае чистой атмосферы наблюдается значительное влияние подстилающей морской поверхности с речным выносом, что приводит к уменьшению линейной зависимости между анализируемыми параметрами и существенному смещению кластера с синими точками.



Рис. 3. Единые диаграммы рассеяния степени поляризации *P*_λ(90°) для трёх комбинаций длин волн (490, 670 и 865 нм) при различных состояниях атмосферы и для различного оптического типа морской толщи Бохайского залива: серый цвет — сплошная облачность; жёлтый — пыль и водяные облака с пылью; синий — чистая атмосфера над морской поверхностью с речным выносом и без влияния реки; голубой — атмосферная водяная дымка

Частицы в облаке имеют наименьшую степень поляризации и полностью перекрывают влияние водной поверхности. При взаимодействии пыли и облака изменяются стандартные характеристики частиц в облаке — результирующее «запылённое облако» имеет меньшие размеры частиц и меньшую оптическую толщину по сравнению с чистым облаком. Это может быть связано с процессами нагрева и испарения облаков при наличии в них пылевых частиц (Wang et al., 2010). Если сравнивать значения P в зелёных кластерах для столбцов 1 и 2 *рис. 2*, а также серые и жёлтые кластеры на *рис. 3*, то видно, что в случае попадания пыли в облако увеличивается степень поляризации. Пыль, состоящая из крупных частиц, также обладает низкой поляризационной способностью, тем не менее значения P в проанализированной пылевой буре выше по сравнению со значениями P для чистых облаков. Наибольшие значения P при фазовых углах около 90° зафиксированы при наличии мелкодисперсных аэрозольных частиц, входящих в состав водяной дымки. Во всех перечисленных случаях влияния

подстилающей морской поверхности на получаемый результат практически не наблюдалось. Однако в случае чистой атмосферы влияние моря с большим количеством взвешенных частиц становится значительным, что говорит о необходимости использования комплексных подходов анализа многоугловых поляризационных измерений, учитывающих вклад как компонентов атмосферы, так и водной поверхности (Gilerson et al., 2020; Jamet et al., 2019).

В целом полученный результат не противоречит опыту использования эффекта Умова для изучения пылевого аэрозоля (Zubko et al., 2017, 2021) и открывает перспективы применения данного подхода по отношению к спутниковым измерениям при использовании предварительной классификации данных и таблиц сравнения, полученных методами прямого численного моделирования.

Выводы

Полученные результаты показали широкие возможности многоугловых многоволновых поляризационных спутниковых измерений PARASOL для классификации состояния атмосферы и подстилающей поверхности в районе Бохайского залива. Измерения PARASOL позволяют восстановить степени поляризации излучения при фазовых углах около 90° на трёх длинах волн: 490, 670 и 865 нм. Соответствующие значения степени поляризации увеличиваются по мере уменьшения размера атмосферных частиц при переходе от состояния сплошной облачности к пылевой буре и атмосферной дымке. В случае чистой атмосферы существенное влияние на получаемые результаты оказывает речной сток, который уменьшает степень поляризации излучения за счёт многократного рассеяния на взвешенных частицах. Наличие многоволновых поляризационных измерений позволяет анализировать такие сложные для интерпретации ситуации, как пыль в облаках или детектирование пылевых бурь над речным выносом.

Исследования влияния различных состояний атмосферы и морской поверхности на спутниковые измерения степени поляризации оптического излучения выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-10022; обработка и анализ спутниковых данных проведены в рамках госбюджетной темы № 0211-2021-0007 «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере» (рег. номер 121021500054-3).

Литература

- Chen C., Dubovik O., Fuertes D., Litvinov P., Lapyonok T., Lopatin A., Ducos F., Derimian Y., Herman M., Tanré D., Remer L.A., Lyapustin A., Sayer A.M., Levy R.C., Hsu N.C., Descloitres J., Li L., Torres B., Karol Y., Herrera M., Herreras M., Aspetsberger M., Wanzenboeck M., Bindreiter L., Marth D., Hangler A., Federspiel C. Validation of GRASP algorithm product from POLDER/PARASOL data and assessment of multi-angular polarimetry potential for aerosol monitoring // Earth System Science Data. 2020. V. 12. P. 3573–3620.
- Diner D. J., Boland S. W., Brauer M., Bruegge C., Burke K.A., Chipman R., Girolamo L. D., Garay M.J., Hasheminassab S., Hyer E., Jerrett M., Jovanovic V., Kalashnikova O. V., Liu Y., Lyapustin A., Martin R., Nastan A., Ostro B., Ritz B., Schwartz J., Wang J., Xu F. Advances in multiangle satellite remote sensing of speciated airborne particulate matter and association with adverse health effects: from MISR to MAIA // J. Applied Remote Sensing. 2018. V. 12. No. 4. P. 042603.
- 3. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanré D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. P. 975–1018.
- 4. Dubovik O., Li Z., Mishchenko M., Tanré D., Karol Y., Bojkov B., Cairns B., Diner D., Espinosa W., Goloub P., Gu X., Hasekamp O., Hong J., Hou W., Knobelspiesse K., Landgraf J., Li L., Litvinov P., Liu Y., Lopatin A., Marbach T., Maring H., Martins V., Meijer Y., Milinevsky G., Mukai S., Parol F., Qiao Y., Remer L., Rietjens J., Sano I., Stammes P., Stamnes S., Sun X., Tabary P., Travis L., Waquet F., Xu F., Yan C., Yin D. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2019. V. 224. P. 474–511.

- 5. *Fan H., Huang H.* Response of coastal marine eco-environment to river fluxes into the sea: A case study of the Huanghe (Yellow) River mouth and adjacent waters // Marine Environmental Research. 2008. V. 65. P. 378–387.
- 6. *Fougnie B.*, *Marbach T.*, *Lacan A.*, *Lang R.*, *Schlüssel P.*, *Poli G.*, *Munro R.*, *Couto A.* The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager: Overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2018. V. 219. P. 23–32.
- Fréville H., Chami M., Mallet M. Analysis of the Transport of Aerosols over the North Tropical Atlantic Ocean Using Time Series of POLDER/PARASOL Satellite Data // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 757.
- 8. *Gilerson A.*, *Carrizo C.*, *Ibrahim A.*, *Foster R.*, *Harmel T.*, *El-Habashi A.*, *Lee Z.*, *Yu X.*, *Ladner S.*, *Ondrusek M.* Hyperspectral polarimetric imaging of the water surface and retrieval of water optical parameters from multi-angular polarimetric data // Applied Optics. 2020. V. 59. P. C8–C20.
- 9. *Hasekamp O. P., Litvinov P., Butz A.* Aerosol properties over the ocean from PARASOL multiangle photopolarimetric measurements // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2011. V. 116. Art. No. D14204.
- 10. *Ivanoff A., Jerlov N., Waterman T. H.* A comparative study of irradiance, beam transmittance and scattering in the sea near Bermuda // Limnology and Oceanography. 1961. V. 6. P. 129–148.
- Jamet C., Ibrahim A., Ahmad Z., Angelini F., Babin M., Behrenfeld M., Boss E., Cairns B., Churnside J., Chowdhary J., Davis A., Dionisi D., Duforêt-Gaurier L., Franz B., Frouin R., Gao M., Gray D., Hasekamp O., He X., Hostetler C., Kalashnikova O., Knobelspiesse K., Lacour L., Loisel H., Martins V., Rehm E., Remer L., Sanhaj I., Stamnes K., Stamnes S., Victori S., Werdell J., Zhai P. Going Beyond Standard Ocean Color Observations: Lidar and Polarimetry // Frontiers in Marine Science. 2019. V. 6. Art. No. 251.
- 12. Jo O. C., Lee J., Park K., Kim Y., Kim K. Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. Art. No. L05602.
- 13. *Kai Z.*, *Gao H*. The characteristics of Asian-dust storms during 2000–2002: From the source to the sea // Atmospheric Environment. 2007. V. 41. No. 39. P. 9136–9145.
- Kokhanovsky A., Davis A., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O., Sano I., Mukai S., Rozanov P., Litvinov P., Kolomiets I., Oberemok Y., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Di Noia A., Stap F., Rietjens J., Xu F., Natrag V., Duan M., Cheng T., Munro R. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multiangle spectro-polarimetric frontier // Earth-Science Reviews. 2015. V. 145. P. 85–116.
- Li L. Che H., Derimian Y., Dubovik O., Luan Q., Li Q., Huang X., Zhao H., Gui K., Zheng Y., An L., Sun T., Liang Y. Climatology of fine and coarse mode aerosol optical thickness over East and South Asia derived from POLDER/PARASOL satellite // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. Art. No. e2020JD032665.
- Loisel H., Duforet L., Dessailly D., Chami M., Dubuisson P. Investigation of the variations in the water leaving polarized reflectance from the POLDER satellite data over two biogeochemical contrasted oceanic areas // Optics Express. 2008. V. 16. No. 17. P. 12905–12918.
- Pavlov A. N., Zubko E., Konstantinov O. G., Shmirko K., Mayor A. Yu., Videen G. Vertical profile of polarization over Vladivostok using horizon shadowing: Clues to understanding the altitude variation of reflectance of aerosol particles // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 2014. P. 94–102.
- 18. Peralta R. J., Nardell C., Cairns B., Russell E. E., Travis L. D., Mishchenko M. I., Fafaul B. A., Hooker R. J. Aerosol Polarimetry Sensor for the Glory Mission // Proc. SPIE. 2007. V. 6786. Art. No. 67865L-2.
- Qiao Sh., Shi X., Zhu A., Liu Y., Bi N., Fang X., Yang G. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2010. V. 86. P. 337–344.
- 20. *Shi W., Wang M.* Satellite views of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea // Progress in Oceanography. 2012. V. 104. P. 30–45.
- 21. *Tan S.-C., Wang H.* The transport and deposition of dust and its impact on phytoplankton growth in the Yellow Sea // Atmospheric Environment. 2014. V. 99. P. 491–499.
- 22. *Tsikerdekis A., Schutgens N., Hasekamp O.* Assimilating aerosol optical properties related to size and absorption from POLDER/PARASOL with an ensemble data assimilation system // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021. V. 21. P. 2637–2674.
- 23. *Tu Q.*, *Hao Z.*, *Pan D.* Mass Deposition Fluxes of Asian Dust to the Bohai Sea and Yellow Sea from Geostationary Satellite MTSAT: A Case Study // Atmosphere. 2015. V. 6. P. 1771–1784.
- 24. Waquet F., Cornet C., Deuzé J.-L., Dubovik O., Ducos F., Goloub P., Herman M., Lapyonok T., Labonnote L., Riedi J., Tanre D., Thieuleux F., Vanbauce C. Retrieval of aerosol microphysical and optical properties above liquid clouds from POLDER/PARASOL polarization measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. V. 6. No. 4. P. 991–1016.
- 25. Xin J., Wang L., Wang Y., Li Z., Wang P. Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 // Atmospheric Environment. 2011. V. 45. P. 6317–6325.
- 26. *Yan H., Liu X., Qi J., Gao H.* Dry deposition of PM10 over the Yellow Sea during Asian dust events from 2001 to 2007 // J. Environmental Sciences. 2014. V. 26. No. 1. P. 54–64.

- 27. Zhang X. Y., Wang Y. Q., Niu T., Zhang X. C., Gong S. L., Zhang Y. M., Sun J. Y. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. V. 12. P. 779–799.
- Zhang J., Chen J., Xia X., Che H., Fan X., Xie Y., Han Z., Chen H., Lu D. Heavy aerosol loading over the Bohai Bay as revealed by ground and satellite remote sensing // Atmospheric Environment. 2016. V. 124. P. 252–261.
- 29. Zubko E., Weinberger A., Zubko N., Shkuratov Y., Videen G. Umov effect in single-scattering dust particles: effect of irregular shape // Optics Letters. 2017. V. 42. No. 10. P. 1962–1965.
- Zubko E., Shmirko K., Pavlov A., Sun W., Schuster G. L., Hu Y., Stamnes S., Omar A., Baize R. R., McCormick M. P., Loughman R., Arnold J. A., Videen G. Active Remote Sensing of Atmospheric Dust Using Relationships Between Their Depolarization Ratios and Reflectivity // Optics Letters. 2021. V. 46. No. 10. P. 2352–2355.

Analysis of multiple angular polarization measurements from the PARASOL satellite radiometer over optically complex waters of the Bohai Bay

P.A. Salyuk^{1,2}, I.E. Stepochkin^{1,2}, K.A. Shmirko^{1,3}, I.A. Golik¹

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok 690091, Russia E-mail: shmirko.ka@dvfu.ru

² V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: psalyuk@poi.dvo.ru

³ Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: kshmirko@gmail.com

The goal of the work is to analyze the features of using multi-angle polarizing measurements from the PARASOL satellite radiometer to study the characteristics of atmospheric aerosol over the optically complex waters of the Bohai Bay under different atmospheric conditions and with different optical types of the underlying sea layer. PARASOL measurements allow us to retrieve the degrees of polarization of the registered radiation at phase angles of about 90 degrees at three wavelengths of 490, 670, and 865 nm. The analysis of the scatter plots of these parameters was carried out, which made it possible to classify the state of the atmosphere and the underlying water surface in the area of Bohai Bay. The calculated values of the degrees of polarization at phase angles of about 90 degrees tend to increase as the size of atmospheric particles decreases during the transition from a state of continuous cloud cover to a dust storm and an atmospheric water haze. In the case of a clean atmosphere, river runoff has a significant effect on the results obtained, which reduces the degree of radiation polarization due to multiple scattering by suspended particles in the sea column. The use of multi-wave polarization measurements makes it possible to analyze situations that are difficult to interpret, such as dust in clouds or the detection of dust storms over a river outflow. In general, the results obtained do not contradict the experience of using the Umov effect for the study of dust aerosol, which consists in the inverse correlation between the maximum polarization of radiation and the geometric albedo. It opens up prospects for using this approach to satellite measurements using the preliminary classification of data and look-up tables obtained by direct numerical modeling.

Keywords: multi-angle measurements, satellite, polarization, dust, optically complex waters, Umov effect, PARASOL, POLDER, Bohai Bay

Accepted: 11.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-255-265

References

- Chen C., Dubovik O., Fuertes D., Litvinov P., Lapyonok T., Lopatin A., Ducos F., Derimian Y., Herman M., Tanré D., Remer L.A., Lyapustin A., Sayer A. M., Levy R. C., Hsu N. C., Descloitres J., Li L., Torres B., Karol Y., Herrera M., Herreras M., Aspetsberger M., Wanzenboeck M., Bindreiter L., Marth D., Hangler A., Federspiel C., Validation of GRASP algorithm product from POLDER/PARASOL data and assessment of multi-angular polarimetry potential for aerosol monitoring, *Earth System Science Data*, 2020, Vol. 12, pp. 3573–3620.
- Diner D. J., Boland S. W., Brauer M., Bruegge C., Burke K. A., Chipman R., Girolamo L. D., Garay M. J., Hasheminassab S., Hyer E., Jerrett M., Jovanovic V., Kalashnikova O. V., Liu Y., Lyapustin A., Martin R., Nastan A., Ostro B., Ritz B., Schwartz J., Wang J., Xu F., Advances in multiangle satellite remote sensing of speciated airborne particulate matter and association with adverse health effects: from MISR to MAIA, *J. Applied Remote Sensing*, 2018, Vol. 12, No. 4, Art. No. 042603.
- Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanré D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A., Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, Vol. 4, pp. 975–1018.
- 4. Dubovik O., Li Z., Mishchenko M., Tanré D., Karol Y., Bojkov B., Cairns B., Diner D., Espinosa W., Goloub P., Gu X., Hasekamp O., Hong J., Hou W., Knobelspiesse K., Landgraf J., Li L., Litvinov P., Liu Y., Lopatin A., Marbach T., Maring H., Martins V., Meijer Y., Milinevsky G., Mukai S., Parol F., Qiao Y., Remer L., Rietjens J., Sano I., Stammes P., Stamnes S., Sun X., Tabary P., Travis L., Waquet F., Xu F., Yan C., Yin D., Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, Vol. 224, pp. 474–511.
- 5. Fan H., Huang H., Response of coastal marine eco-environment to river fluxes into the sea: A case study of the Huanghe (Yellow) River mouth and adjacent waters, *Marine Environmental Research*, 2008, Vol. 65, pp. 378–387.
- 6. Fougnie B., Marbach T., Lacan A., Lang R., Schlüssel P., Poli G., Munro R., Couto A., The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager Overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018., Vol. 219, pp. 23–32.
- 7. Fréville H., Chami M., Mallet M., Analysis of the Transport of Aerosols over the North Tropical Atlantic Ocean Using Time Series of POLDER/PARASOL Satellite Data, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 757.
- 8. Gilerson A., Carrizo C., Ibrahim A., Foster R., Harmel T., El-Habashi A., Lee Z., Yu X., Ladner S., Ondrusek M., Hyperspectral polarimetric imaging of the water surface and retrieval of water optical parameters from multi-angular polarimetric data, *Applied Optics*, 2020, Vol. 59, pp. C8–C20.
- 9. Hasekamp O. P., Litvinov P., Butz A., Aerosol properties over the ocean from PARASOL multiangle photopolarimetric measurements, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, Vol. 116, Art. No. D14204.
- 10. Ivanoff A., Jerlov N., Waterman T. H., A comparative study of irradiance, beam transmittance and scattering in the sea near Bermuda, *Limnology Oceanography*, 1961, Vol. 6, pp. 129–148.
- Jamet C., Ibrahim A., Ahmad Z., Angelini F., Babin M., Behrenfeld M., Boss E., Cairns B., Churnside J., Chowdhary J., Davis A., Dionisi D., Duforêt-Gaurier L., Franz B., Frouin R., Gao M., Gray D., Hasekamp O., He X., Hostetler C., Kalashnikova O., Knobelspiesse K., Lacour L., Loisel H., Martins V., Rehm E., Remer L., Sanhaj I., Stamnes K., Stamnes S., Victori S., Werdell J., Zhai P., Going Beyond Standard Ocean Color Observations: Lidar and Polarimetry, *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6, Art. No. 251.
- 12. Jo O. C., Lee J., Park K., Kim Y., Kim K., Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/ Japan Sea, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, Art. No. L05602.
- 13. Kai Z., Gao H., The characteristics of Asian-dust storms during 2000–2002: From the source to the sea, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, No. 39, pp. 9136–9145.
- Kokhanovsky A., Davis A., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O., Sano I., Mukai S., Rozanov P., Litvinov P., Kolomiets I., Oberemok Y., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Di Noia A., Stap F., Rietjens J., Xu F., Natrag V., Duan M., Cheng T., Munro R., Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multi-angle spectro-polarimetric frontier, *Earth-Science Reviews*, 2015, Vol. 145, pp. 85–116.
- 15. Li L., Che H., Derimian Y., Dubovik O., Luan Q., Li Q., Huang X., Zhao H., Gui K., Zheng Y., An L., Sun T., Liang Y., Climatology of fine and coarse mode aerosol optical thickness over East and South Asia derived from POLDER/PARASOL satellite, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, Vol. 125, Art. No. e2020JD032665.
- Loisel H., Duforet L., Dessailly D., Chami M., Dubuisson P., Investigation of the variations in the water leaving polarized reflectance from the POLDER satellite data over two biogeochemical contrasted oceanic areas, *Optics Express*, 2008, Vol. 16, No. 17, pp. 12905–12918.

- 17. Pavlov A. N., Zubko E., Konstantinov O. G., Shmirko K., Mayor A. Yu., Videen G., Vertical profile of polarization over Vladivostok using horizon shadowing: Clues to understanding the altitude variation of reflectance of aerosol particles, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, Vol. 2014, pp. 94–102.
- 18. Peralta R. J., Nardell C., Cairns B., Russell E. E., Travis L. D., Mishchenko M. I., Fafaul B.A., Hooker R. J., Aerosol Polarimetry Sensor for the Glory Mission, *Proc. SPIE*, 2007, Vol. 6786, Art. No. 67865L-2.
- Qiao Sh., Shi X., Zhu A., Liu Y., Bi N., Fang X., Yang G., Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea, Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, 2010, Vol. 86, pp. 337–344.
- Shi W., Wang M., Satellite views of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea, *Progress in Oceanogra*phy, 2012, Vol. 104, pp. 30–45.
- 21. Tan S.-C., Wang H., The transport and deposition of dust and its impact on phytoplankton growth in the Yellow Sea, *Atmospheric Environment*, 2014, Vol. 99, pp. 491–499.
- 22. Tsikerdekis A., Schutgens N., Hasekamp O., Assimilating aerosol optical properties related to size and absorption from POLDER/PARASOL with an ensemble data assimilation system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, Vol. 21, pp. 2637–2674.
- 23. Tu Q., Hao Z., Pan D., Mass Deposition Fluxes of Asian Dust to the Bohai Sea and Yellow Sea from Geostationary Satellite MTSAT: A Case Study, *Atmosphere*, 2015, Vol. 6, pp. 1771–1784.
- Waquet F., Cornet C., Deuzé J.-L., Dubovik O., Ducos F., Goloub P., Herman M., Lapyonok T., Labonnote L., Riedi J., Tanre D., Thieuleux F., Vanbauce C., Retrieval of aerosol microphysical and optical properties above liquid clouds from POLDER/PARASOL polarization measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, Vol. 6, No. 4, pp. 991–1016.
- 25. Xin J., Wang L., Wang Y., Li Z., Wang P., Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010, *Atmospheric Environment*, 2011, Vol. 45, pp. 6317–6325.
- 26. Yan H., Liu X., Qi J., Gao H., Dry deposition of PM10 over the Yellow Sea during Asian dust events from 2001 to 2007, *J. Environmental Sciences*, 2014, Vol. 26, No. 1, pp. 54–64.
- Zhang X. Y., Wang Y. Q., Niu T., Zhang X. C., Gong S. L., Zhang Y. M., Sun J. Y., Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, Vol. 12, pp. 779–799.
- Zhang J., Chen J., Xia X., Che H., Fan X., Xie Y., Han Z., Chen H., Lu D., Heavy aerosol loading over the Bohai Bay as revealed by ground and satellite remote sensing, *Atmospheric Environment*, 2016, Vol. 124, pp. 252–261.
- 29. Zubko E., Weinberger A., Zubko N., Shkuratov Y., Videen G., Umov effect in single-scattering dust particles: effect of irregular shape, *Optics Letters*, 2017, Vol. 42, No. 10, pp. 1962–1965.
- Zubko E., Shmirko K., Pavlov A., Sun W., Schuster G. L., Hu Y., Stamnes S., Omar A., Baize R. R., McCormick M. P., Loughman R., Arnold J. A., Videen G., Active Remote Sensing of Atmospheric Dust Using Relationships Between Their Depolarization Ratios and Reflectivity, *Optics Letters*, 2021, Vol. 46, No. 10, pp. 2352–2355.