

Russian State Hydrometeorological University

Manuscript copy

Ibrahem Mohamed Abd Allah Mohamed Abd Elmoaty

**SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY IN OIL SPILL TRAJECTORIES AND
COMPOSITION IN THE GULF OF SUEZ**

Scientific specialization: 1.6.17. Oceanology

Dissertation is submitted for the degree of
Candidate of Geographical Science (PhD)

Scientific supervisor:
Candidate of geographical sciences
Valery. Yu. Chantsev

Saint-Petersburg
2023

Table of content

Introduction	5
Chapter 1. Overview of the behavior of marine oil spills.....	12
1.1. Marine oil spills.....	12
1.2. Main causes of marine oil spills.....	14
1.3. Oil spill accidents	15
1.4. Marine oil spill impacts.....	17
1.5. The behavior of spilled oil in the Marine Environment.....	19
1.5.1. Spreading	20
1.5.2. Drifting (horizontal movement of Oil Slicks)	21
1.5.3. Evaporation.....	22
1.5.4. Emulsification.....	23
1.5.5. Natural dispersion.....	24
1.5.6. Dissolution.....	24
1.5.7. Photo-oxidation	25
1.5.8. Sedimentation	25
1.5.9. Biodegradation.....	26
1.6. Overview of oil spill modeling.....	27
1.6.1. Definition and purpose	27
1.6.2. The importance of marine oil spill modeling	28
1.6.3. Examples of oil spill modeling software	29
1.6.4. Previous studies	30
Chapter 2. Methodology and data used	37
2.1. The Gulf of Suez	37
2.2. GNOME oil spill model	42
2.2.1. Model overview and description	42

2.2.2. Movers	43
2.2.3. Sea current mover	44
2.2.4. Diffusion	45
2.2.5. Beaching	46
2.2.6. Oil spill trajectories	47
2.3. ADIOS2 Oil spill weathering model	47
2.3.1. Oil evaporation	48
2.3.2. Oil emulsification	49
2.3.3. Oil dispersion.....	49
2.4. Model formulation and Data input	51
2.4.1. Coastline data and sea surface temperature.....	51
2.4.2. Wind data.....	52
2.4.3. Sea current data	53
2.4.4. Spill volume and oil type.....	53
Chapter 3. Modeling oil spill trajectory and fate off Hurghada city	54
3.1. Research region	54
3.2. Model formulation and assumptions	56
3.3. Results	58
3.3.1. Scenario #1 trajectory and weathering	58
3.3.2. Scenario #2 trajectory and weathering	61
3.4. Discussion	64
3.5. Summary	67
Chapter 4. Simulation of oil spill movement and fate off Ain Sukhna port	68
4.1. Research region	68
4.2. Model formulation and assumptions	69
4.3. Results	70

4.3.1. Scenario #1 trajectory and weathering	70
4.3.2. Scenario #2	72
4.4. Discussion	76
4.5. Summary	78
Chapter 5. Modeling the path and behavior of oil spill at the southern entrance of the	
Suez Canal.....	79
5.1. Research region	79
5.2. Model formulation and assumptions	81
5.3. Results	82
5.3.1. Scenario #1 trajectory and weathering	82
5.3.2. Scenario #2 trajectory and weathering	84
5.3.3. Scenario #3 trajectory and weathering	86
5.3.4. Scenario #4 trajectory and weathering	88
5.4. Discussion	90
5.5. Summary	92
Conclusion.....	94
List of figures	97
List of tables.....	101
Acknowledgements.....	102
References	103

Introduction

The relevance of the research topic

Worldwide demand for crude oil continues to increase, despite the current attempts to convert to sustainable energy sources and renewable fuels [1,2]. Recently, this demand has increased because of sanctions imposed by Western countries on Russia. According to Robert Perkins [3], the world's oil demand surged by 3.3 million barrels per day in 2022. Hence, the significant increase in oil production and transportation of crude oil leads to the continuation of leakage or spillage incidents [4]. An oil spill is the accidental discharge of crude oil and petroleum products into the natural environment [5,6]. Tanker crashes, ship collisions, ruptured or leaking pipelines, blasted wells, deep sea drilling explosions, and refining activities are the most common causes of oil spills into the marine environment [7–9].

Several major and minor marine oil spill accidents have occurred worldwide in the past few decades (e.g., Exxon Valdez 1989, Gulf War 1991, Prestige 2002, Hebei Spirit 2007, Deepwater Horizon 2010, MV MSC Chitra 2010, Sanchi 2018) [10]. Oil spills into the marine environment can cause adverse impacts and damage to the marine biological system [11,12]. In specific cases, problems may arise for coastal infrastructure (touristic resorts, ports, and marinas) and industries that rely on the intake of seawater (marine salt production, coastal power stations, and desalinization plants) [13].

When oil leaks into the seawater, it undergoes a range of chemical and physical transformations, collectively known as weathering [14–16]. The most prominent oil spill weathering processes are evaporation, natural dispersion, and emulsification [17]. In recent years, societal demands for a sustainable ecological status of the marine environment have forced governments to establish appropriate and effective oil spill contingency plans [18]. Assessing the impact of oil spills on vulnerable areas is necessary to develop effective oil spill contingency plans. These plans could be implemented using predictive mathematical models to simulate the oil slicks' trajectory and behavior [19].

Numerical models predict the movement of the spilled oil, which is governed by external forces such as currents, waves, and winds considering oil's physical and chemical processes (weathering processes) [20–22]. These models can be used to develop emergency response planning and operational forecasting systems, as they provide information for determining potential regions affected by oil spills. Various efforts have been made worldwide to simulate the oil spill movement in real and hypothetical situations. Some of the most widely used oil spill models capable of forecasting the trajectory and fate of oil spills are General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) [23], Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) [24,25], Delft3D-PART [22], Comprehensive Deepwater Oil and Gas model (CDOG) [26,27], Oil Spill Contingency and Response model (OSCAR) [28,29], OILMAP [30], deepwater oil spill model and analysis system (OILMAPDEEP) [31–33], integrated oil spill impact oil system (SIMAP) [34–36], Texas A&M oil spill calculator (TAMOC) [37,38], particle transport model (OILTRANS) [39], MEDSLIK-II [40], and OpenOil [41,42].

The present study utilized two of the most widely used models: The General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Oil Modeling Environment (GNOME) and The Automated Data Inquiry for Oil Spills ADIOS2. GNOME model was developed by NOAA's Hazardous Materials Response (HAZMAT) and debuted on March 16th, 1999 [43]. The GNOME model is two-dimensional and more generalizable than other models and requires fewer parameters as input [44]. This two-dimensional model is frequently used in marine, coastal, and riverine environments to predict the movement of spilled oil [44,45]. We selected the GNOME modeling tool due to its history of operational implementation and validation against real-world environmental catastrophes and its broad usage among organizations [1,46]. In addition, the model provides georeferenced trajectory output that may be used as an input to GIS (geographic information system) tools [47]. Furthermore, GNOME results for many situations demonstrated a significant degree of concordance between model simulation, satellite data, and experimental observations, as verified by several studies [45,48]. As a result, the Marine Emergency Mutual Aid Centre has recommended using the GNOME model to simulate oil spills in the Arabian Gulf [49]. The Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) is an oil spill model developed by NOAA. It stimulates the processes involved in oil weathering, including evaporation, natural dispersion, and

emulsification [50]. We selected the ADIOS2 modeling tool because it blends a library of around 1,000 oils with a short-term oil fate and cleaning model to assist in estimating how long spilled oil will persist in the marine environment and developing cleanup techniques. In addition, Computed ADIOS2 data combines real-time weather data (wind speed) with chemical and physical property data from its oil library [51]. Furthermore, ADIOS2 codes are available for many water areas, such as open sea, nearshore waters, semi-confined coastal waters, estuaries, rivers, lakes, and reservoirs [52].

Shipping is the most common method for transporting crude oil globally, which has economic and environmental benefits [53,54]. Because of the increased number of ships, the intensity of traffic, and port operations have increased, the possibility of accidents resulting in oil spills will increase [54,55]. Several major and minor oil spill accidents from tankers have occurred worldwide [10]. The largest spill from an oil tanker was the ABT Summer off the coast of Angola in West Africa, which occurred in May 1991. As a result, about 2 million barrels of heavy oil were released into the sea, covering an area of about 80 square miles [56]. The most recent oil spill during the writing of this study occurred from a tanker carrying 750 tons of diesel fuel from Egypt to Malta, which sank in the Gulf of Gabes off the southeastern coast of Tunisia due to bad weather in April 2022 [57]. According to the International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) [58], the total crude oil spilled into the marine environment due to tanker incidents in 2021 was approximately 10,000 tons.

The Gulf of Suez (GOS) and Suez Canal are crucial shipping routes for Egypt and the globe. Approximately 15% of all global maritime trade and 10% of seaborne oil pass annually through the GOS and Suez Canal. In the wake of Europe's insistence on moving away from Russian oil [59], the demand from Qatar and Saudi Arabia has risen, increasing the number of ships transporting oil across the Red Sea and through the Suez Canal. Hence, the possibility of accidents resulting in oil spills will increase [54,55]. Several oil spill accidents in the Gulf of Suez have occurred since the 1970s, causing considerable damage to the shoreline and coral reefs. The worst oil spill accident occurred in 1982, while loading a tanker in Ras Shukeir territory, about 110 kilometers north of Hurghada, tens of thousands of tons of crude oil leaked into the water [60,61].

Oil spills in the Red Sea can have a number of different impacts, depending on the size and location of the spill. Some of the potential impacts include:

- Damage to coral reefs and other marine habitats, which can have a long-term impact on the biodiversity of the region.
- Harm to marine mammals, fish, and birds, which can result in population declines or even extinction.
- Contamination of beaches and shorelines, which can have a negative impact on tourism and recreation.
- Disruption of fishing and other coastal industries, which can have a significant economic impact on local communities.
- Obstruction of the maritime route via the Suez Canal.

The oil spills directly impact the national economy because of the potential environmental damage and the corresponding negative effect on tourism [62]. Despite the high shipping activities and the potential of being exposed to oil spills in Egypt's waters, only a few published research papers have predicted the trajectory of spills [61–65]. Thus, the lack of reliable historical records for oil spills and weak monitoring, and minimal responses to spills increase this threat. Because the protection of the coastal area from oil spills is a high priority for Egypt, Egypt must have an effective oil spill response strategy to fight contamination from coastal and marine oil spills. Simulating oil spill movement and behavior is essential before beginning any response strategy [66].

Aim of the Work

The aim of this work is to model oil spill incidents caused by oil tankers along the maritime route in the Gulf of Suez, particularly in three crucial areas: Hurghada, Ain Sukhna port, and the southern entrance to the Suez Canal. To study the effects of wind and water currents on the movement and fate of spilled oil and predict its trajectory in the Gulf of Suez. Additionally, to Estimate the duration it takes for the spilled oil to reach the shore, the amount of oil that reaches the shore versus how much remains afloat, and weathering processes such as evaporation, emulsification, and natural dispersion. Finally, to define potential areas that will be affected by oil spill accidents in the Gulf of Suez in the future.

To achieve the goal, the following tasks were formulated

1. Gathering the baseline data needed to model the spread and fate of the spill.
2. Assessing the spread and fate of oil spills in the Gulf of Suez in front of three critical areas: Hurghada, the port of Ain Sukhna and the southern entrance to the Suez Canal.
3. Estimating the amount of oil that reaches the shore and how much remains afloat in the water after an oil spill.
4. Identifying potential areas most affected by oil spills in the Gulf of Suez.

The statements to be defended:

1. Assessment of coastal vulnerability in the Hurghada region, including the northern Red Sea islands (Ashrafi, Small Gubal, Geisum, Tawila, Shadwan and Gifton) due to accidental oil spills.
2. The result of an analysis of the possible effects of oil spills on the shipping lane five kilometers from the port of Ain Sukhna, arising in a region where many tourist resorts and various coral reefs are located.
3. Assessment of the possible spread of oil towards economic structures and tourist resorts in different regions of the Gulf of Suez spilled at the southern entrance of the Suez Canal.
4. The result of calculations of the volume of likely oil releases ashore and the length of shoreline exposed to contamination.

The scientific novelty of the results

1. For the first time, the possible spread and fate of oil slicks near the southern entrance to the Suez Canal and the port of Ain Sukhna was assessed based on the combined work of the GNOME and ADIOS2 models.
2. For the first time, regions most susceptible to oil pollution in the event of an oil spill accident along the shoreline of Hurghada have been identified.
3. The GNOME model was used for the first time to calculate beaching processes of the Light Crude Oil in the Gulf of Suez.

The practical significance of the work

Modeling oil spill movement and behavior in the Gulf of Suez using mathematical oil spill models holds practical significance in several domains. Firstly, the study can aid in improving response planning by offering insights on the potential movement and spreading of oil in the event of a spill, allowing for better preparedness and response planning to minimize spillage impact. Secondly, it can be used to evaluate the risk of oil spills in the Gulf of Suez, enabling stakeholders to assess the probability and severity of an oil spill and take measures to reduce risks. Thirdly, the study can provide crucial information for policymakers to make informed decisions regarding oil spill prevention and response regulations and policies, thereby protecting the environment and local livelihoods. Finally, the research can contribute to environmental impact assessment of prospective oil and gas projects in the Gulf of Suez by simulating oil spills under various conditions, enabling the assessment of potential environmental impact of a spill and informed decisions about project feasibility in the area. Hence, the practical significance of this study is significant and can have broad implications for improving response planning, risk assessment, policymaking, and environmental impact assessment.

List of Publications

The results were published in the following peer-reviewed scientific journals indexed in the Scopus and Web of Science databases:

1. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Simulating oil spill movement and behavior: a case study from the Gulf of Suez, Egypt // *Model. Earth Syst. Environ.* Springer, 2022, 8, p: 4553–4562. [67]
<https://doi.org/10.1007/s40808-022-01449-9>
2. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Modeling marine oil spill trajectory and fate off Hurgada, Red Sea coast, Egypt // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish.* Elsevier, 2022. 26(6), p: 41-61. [68]
<https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.269676>

3. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Simulation of Oil Spill Trajectory and Fate at the Southern Entrance of the Suez Canal, Red Sea, Egypt. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 1, 63–79. [69] <https://doi.org/10.48612/fpg/hg4a-1ht8-db7d>

List of Conferences

The results of the work were reported at the following scientific conferences:

- 1) The 2ND International Conference of Geo-Sciences & Environment (2nd ICGSE2022) September 17 and 18, 2022 Mascara, Algeri. Oral communication (Modeling oil spill trajectory and fate using GNOME and ADIOS models in the Gulf of Suez, Egypt) (https://www.univ-mascara.dz/evenementscientifique/pages/pres_evenement_en.php?q3=26)
- 2) XXVII International Scientific and Practical Conference, 20 September 2022, Penza. Modern scientific research: current issues, achievements and innovations. (Modelling of oil spill and oil movement as a result of tanker accident near Hurghada, Red Sea, Egypt. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49438301>)

The personal contribution of the author

The author set up all the oil spill scenarios, chose spill locations, gathered the required data for the models, ran the models, and obtained the results. Then, presented these results for scientific analysis; together with the scientific supervisor, they prepared and published articles.

Dissertation Structure

The dissertation consists of an introduction and five chapters, a conclusion, a list of figures, tables, and references. The total volume of the thesis is 124 pages with 40 figures and 14 tables. The list of references contains 245 items.

Chapter 1. Overview of the behavior of marine oil spills

1.1. Marine oil spills

Crude oil is a natural and non-renewable energy resource. Globally, oil is a major fuel source and has historically provided more than a third of the world's energy consumption. Throughout history, with the evolution of civilizations, human need for energy has been steadily increasing [70]. The global demand for crude oil and petroleum derivatives continues to increase, despite current attempts to convert to sustainable energy sources and renewable fuels [1,2]. Due to the worldwide increase in oil demand and the dwindling of onshore reserves, offshore oil production has significantly increased its potential since the 1990s [58]. Global oil production rose from 73 million barrels per day in 1998 to over 89 million barrels per day in 2021. The level of oil production reached an all-time high in 2019, at nearly 95 million barrels. However, the coronavirus pandemic and its impact on transportation fuel demand led to a notable decline in the following year [71] (**Figure 1.1**). According to oil and gas operations reports submitted by offshore operators to the Office of Natural Resources Revenue, the total amount of offshore oil production in Alaska, the Pacific, and the Arabian Gulf has increased from about 483 million barrels in 2012 to more than 600 million barrels in 2021 [72] (**Table 1-1**).

Oil transportation technology evolved at the same pace as the oil production industry, with supertankers and crude and product oil pipelines crossing the oceans. However, despite continuous improvement in the safety of maritime transportation, the tankers industry, and port facilities, marine oil spill incidents continue to occur [1]. Marine oil spills often refer to releases of liquid petroleum hydrocarbons into the ocean or coastal areas due to human activities or natural disasters [73].

The era of spill response and spotlight on the resulting ecological impacts began after the Oil spill from the supertanker “Torrey Canyon” in 1967 off the southwestern coast of the United Kingdom [74]. This accident led to significant changes in oil spill responses. Also, in

the past 50 years, with the increasing importance attached to oil spill accidents by maritime agencies and countries around the world [75]. As a result, research efforts dedicated to developing complete oil spill modeling environments continue to be an active area of research. When these efforts combined with short- and long-term spill observation, the development of oil spill risk and impact modeling suites designed for increasing response efficiency, and mitigating risk have produced a relatively large system of computational tools for exploring the potential impacts of oil spills in space and time [76].

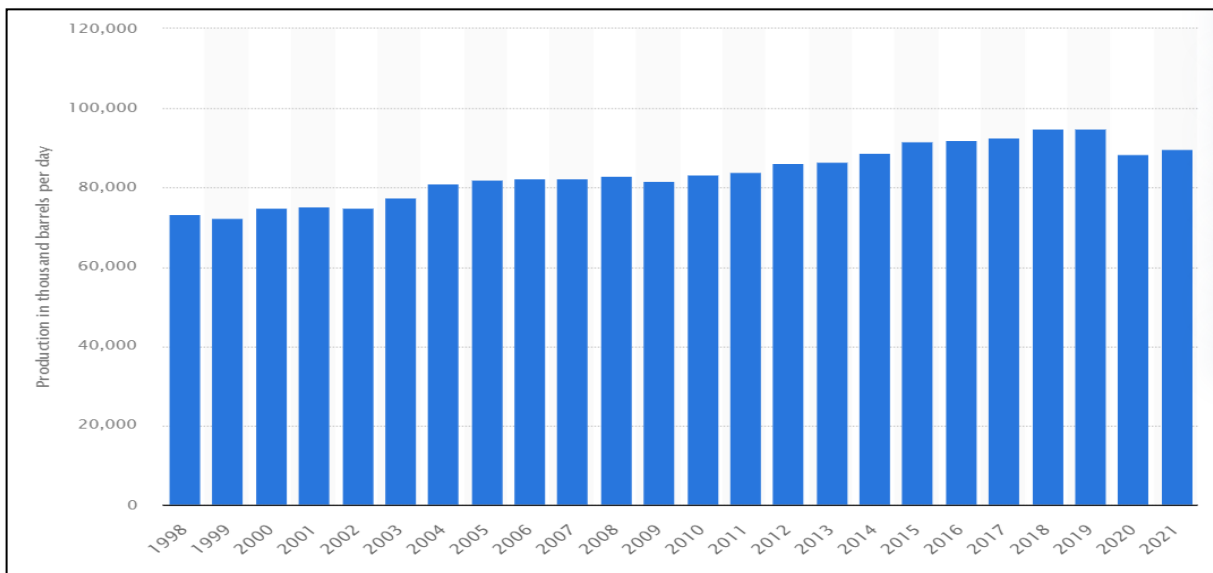


Figure 1.1 Global oil production from 1998 to 2021 per day [71]

Table 1-1 Crude oil offshore production from 2012 to 2021 per year [72]

Year	Alaska	Pacific Ocean	Arabian Gulf	Total
2012	627,108	17,678,493	464,786,485	483,092,086
2013	669,148	18,565,833	459,046,740	478,281,721
2014	625,303	18,506,540	510,467,459	529,599,302
2015	609,912	11,451,040	553,007,049	565,068,001
2016	548,343	6,142,614	585,712,140	592,403,097
2017	513,420	5,714,391	613,670,834	619,898,645
2018	491,616	4,873,812	642,064,616	647,430,044
2019	479,711	4,448,922	692,744,886	697,673,519
2020	458,067	4,568,527	609,733,770	614,760,364
2021	449,679	3,991,793	622,841,833	627,283,305

1.2. Main causes of marine oil spills

Oil Spills usually happen due to bad weather (hurricanes, storms, and earthquakes), intentional acts of violence (like war, vandals, or dumping), and human errors [8]. According to Kachel [9], the most common causes of oil spills into the marine environment are; ship accidents, tanker crashes, pipelines breaking or leaking, wells blowing up, deep-water drilling explosions, natural seepage (this is when crude oil found in the ground leaks up into the water naturally) and refinery operations.

Chilvers et al. [77] studied 1702 oil spills from publicly available sources. They found that about 47% of all reports were from general shipping (including cargo, bulk carriers, cruise ships, military, and fishing vessels), 23% from oil tankers and barges, and 12% from pipelines (**Figure 1.2**). Nowadays, more than 90% of the world's oil transportation is by oil tankers [78]. Consequently, there is a high probability of oil leak incidents involving oil tankers. About 13% of oil spill accidents and pollution worldwide are caused during the transportation phase [79]. According to the International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), tanker collision and grounding are the main causes of the minor (<700 tons) and major (>700 tons) spill accidents (**Figure 1.3**). In 2021, eight oil spill accidents of varying magnitudes resulted in the loss of 10,000 tons of oil into the marine environment [58].

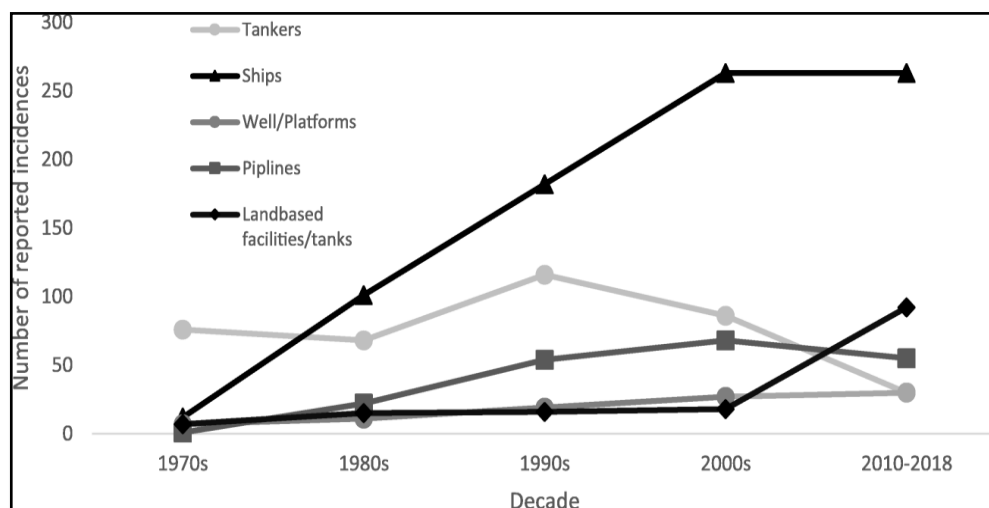


Figure 1.2 Numbers of reported oil spills summed by decade, by spill source, across almost five decades, from 1970 to 2010–2018 [77].

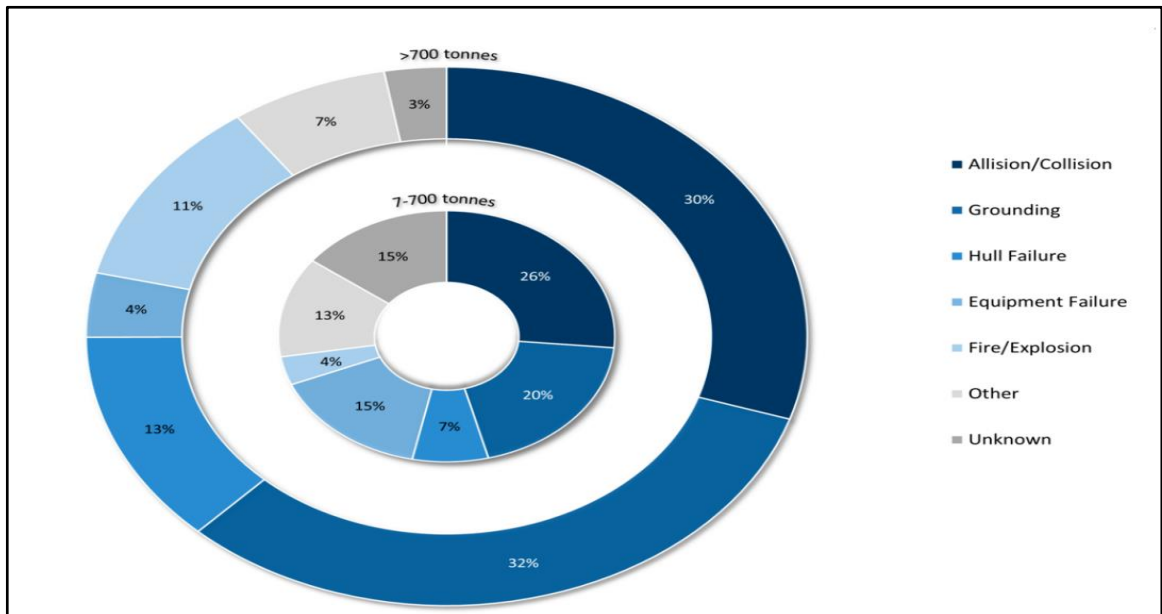


Figure 1.3 The main causes of tankers' major and minor spill incidents

1.3. Oil spill accidents

Worldwide oil spillage rates have decreased dramatically since the 1960s and 1970s, from about 635,000 tons annually to about 300,000 tons per year from all sources, not counting the anomalous intentional spillage associated with the 1991 Gulf War, which amounted to over 82 million tons on land and at sea [74]. As we mentioned before, the largest sources of oil spills in the last two decades have been related to oil transportation by tankers. Following data from the European Space Agency (ESA), approximate losses of 250,000 tons of oil per year are estimated due to the operating procedures of ships [1].

Several major and minor oil spill accidents from tankers have occurred worldwide [10]. **Figure 1.4** shows the distribution of major and minor oil spills from 1970 to 2020. Major oil spills attract the attention of both the public and the media. In past years, this attention created a global awareness of the risks of oil spills and their environmental damage. Minor oil spills are frequent worldwide, mainly because of the heavy use of oil and petroleum products in our daily lives [7].

As shown in **Table 1-2**, the world's first major oil tanker disaster was the grounding of *Torrey Canyon* in the United Kingdom on 18 March 1967 [80]. As a result of this disaster, about 119,000 tons of crude oil were released into the marine environment. While the largest

ship-source spill ever recorded was the *Atlantic Empress* and the *Aegean Captain* incident. During a tropical downpour in 1979, the two fully-laden tankers collided. After the accident, both tankers started spilling oil. As a result, it is estimated that 287,000 tons of oil were released into the Caribbean Sea by the *Atlantic Empress* [75]. The latest major oil spill in the marine environment was the *Sanchi* oil tanker accident in 2018. The tanker exploded and then sank after burning for eight consecutive days, resulting in the spilling of 113,000 tons Off Shanghai, China [81].

In conclusion, it is essential to study previous oil spill incidents to learn how the oil has affected the environment, what cleanup techniques work, and what improvements can be made, as well as to identify the gaps in technology [74].

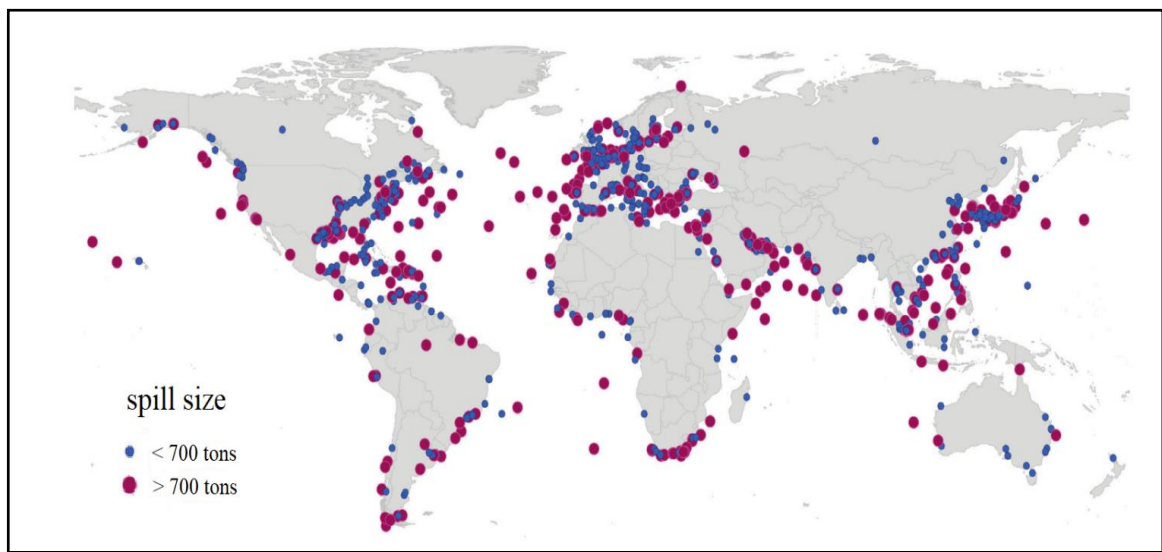


Figure 1.4 Map of major and minor oil spills worldwide from 1970 to 2020 [58].

Table 1-2 Major tanker spills since 1967 (arranged according to spill amount) [58].

Ship name	Year	Location	Spill size (tons)
ATLANTIC EMPRESS	1979	Off Tobago, West Indies	287,000
ABT SUMMER	1991	700 nautical miles off Angola	260,000
CASTILLO DE BELLVER	1983	Off Saldanha Bay, South Africa	252,000
AMOCO CADIZ	1978	Off Brittany, France	223,000
HAVEN	1991	Genoa, Italy	144,000

Continuation of the table 1-2

ODYSSEY	1988	700 nautical miles off Nova Scotia, Canada	132,000
TORREY CANYON	1967	Scilly Isles, UK	119,000
SEA STAR	1972	Gulf of Oman	115,000
SANCHI	2018	Off Shanghai, China	113,000
IRENES SERENADE	1980	Navarino Bay, Greece	100,000
URQUIOLA	1976	La Coruna, Spain	100,000
HAWAIIAN PATRIOT	1977	300 nautical miles off Honolulu	95,000
INDEPENDENTA	1979	Bosphorus, Turkey	95,000
JAKOB MAERSK	1975	Oporto, Portugal	88,000
BRAER	1993	Shetland Islands, UK	85,000
AEGEAN SEA	1992	La Coruna, Spain	74,000
SEA EMPRESS	1996	Milford Haven, UK	72,000
KHARK 5	1989	120 nautical miles off the Atlantic coast of Morocco	70,000
NOVA	1985	Off Kharg Island, Gulf of Iran	70,000
KATINA P	1992	Off Maputo, Mozambique	67,000
PRESTIGE	2002	Off Galicia, Spain	63,000
EXXON VALDES	1989	Prince William Sound, Alaska, USA	37,000
HEBEI SPIRIT	2007	South Korea	11,000

1.4. Marine oil spill impacts

Marine oil spills cause environmental disruption and may have varied short- and long-term impacts on marine ecosystems and the economies of coastal populations [11,12,22,82,83]. Major oil spill accidents may leak a large amount of oil, therefore, are highly hazardous. Apart from economic losses, large areas of oil pollution into the sea can affect the exchange of materials and energy between the air and sea systems [84], leading to the mass mortality of marine life and birds. It not only causes catastrophic disasters to marine life but also significantly impacts the ecology, tourism, and environment of coastal areas. Besides, the pollution is also prolonged and persistent [85]. Due to the physicochemical properties of crude oil and its interactions with the marine environment, even minor oil spills can have serious consequences [86]. The presence of oil in water can hinder marine phytoplankton from

photosynthesis, thereby reducing the dissolved oxygen content and changing the water temperature and other constituent particles [87,88]. Hence, oil's physical and chemical disturbance in seas pollutes the ecosystem and contaminates the marine food chain in the euphotic zone [89].

The severity of the impact of an oil spill depends on many factors, including the quantity of oil spilled, the oil's initial physico-chemical characteristics, and meteorological and sea state conditions. Even spills of refined petroleum products, such as gasoline, evaporate quickly and cause only short-term environmental effects. On the other hand, crude oils, heavy fuel oil, and water-in-oil mixtures may cause widespread and long-lasting physical contamination of shorelines [8]. The situation is compounded and worse if spilled oil reaches the shoreline or coast as biological productivity is higher at these sites, and oil stranded on shorelines may persist for extended periods [90]. The oil dissipates more slowly and can persist for several years in sediments even after cleanup processes [91]. Therefore, these oil-contaminated sediments may increase the exposure risk to aquatic ecosystems and human health [92]. Also, oil spilled on shorelines can cause significant habitat damage and pose severe threats to all living organisms on and within shorelines [93].

The potential effects of oil contamination on biota can vary from species to species [94]. For instance, the oil comes into contact with coral reefs in the shallow water column and can impede their reproduction, behavior, and growth. It can even lead to the death of coral organisms. Coral reefs, being the habitat of associated marine organisms such as fish, seagrasses, algae, crabs, etc., when contaminated due to oil spills, can lead to the loss of biodiversity [95]. Several studies presented the impact of oil on coral physiology have confirmed the detrimental effect of oil on corals and hence oil pollution is a threatening factor for coral reefs [96–99]

Coastal areas are usually thickly populated and attract many recreational activities and facilities developed for fishing, boating, diving, swimming, and other resident and tourist attractions. Oil spills that invade and pollute these areas and negatively affect human activities can have devastating and long-term effects on the local economy and society. Property values for housing tend to decrease, regional business activity declines, and future investment is risky

[100]. In specific cases, problems can be caused for industries that rely on an intake of seawater (such as marine salt production, desalinization plants, and coastal power stations) and coastal installations (such as marinas, ports, and harbors) [13].

1.5. The behavior of spilled oil in the Marine Environment

When oil is spilled, several transformation processes occur; many of these processes are referred to as the behavior of the spilled oil. The first group of the process is weathering, a series of processes whereby the physical and chemical properties of the oil change after the spill [14–16,101,102]. The second group of processes is related to the physical transport processes like oil slick spreading and movement [1,74]. **Figure 1.5** illustrates the main marine oil spill processes after spillage. Weathering and physical transport processes can overlap; the timescales of processes that occur after spillage are shown in **Figure 1.6**. All processes depend on the type of oil spilled and the weather conditions during and after the spill [103]. The specific behavior processes after an oil spill determine how the oil should be cleaned up and its effect on the environment. Spill responders need to know the ultimate fate of the oil to take measures to minimize the overall impact of the spill [104].

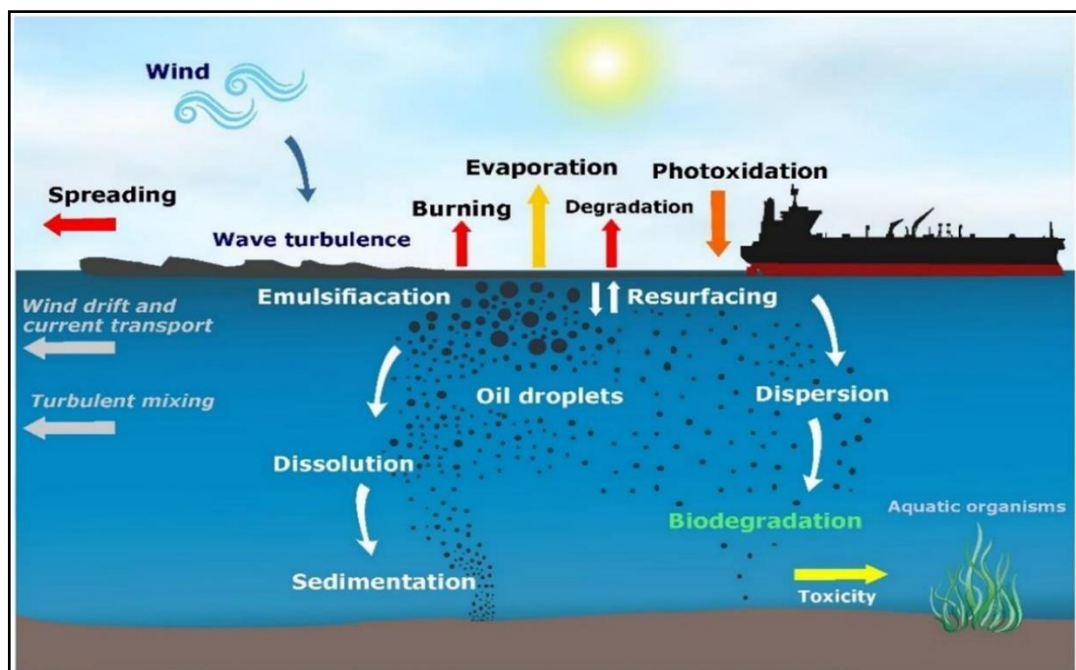


Figure 1.5 Main marine oil spill processes after spillage [1]

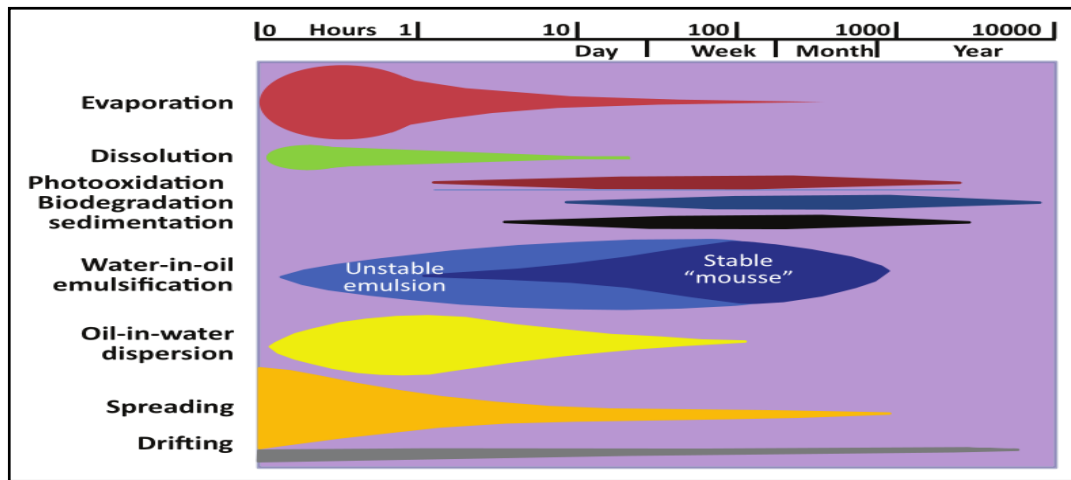


Figure 1.6 Relative timescales of weathering and fate processes. The thickness of the bars represents the relative importance of each process at a given time after the initial spill [105].

1.5.1. Spreading

Spreading refers to creating a thin film expanding over the sea surface as soon as the oil is released [106]. After an oil spill on water, the oil tends to spread into a slick over the water's surface, and this is especially true of lighter products such as gasoline, diesel fuel, and light crude oils, which form skinny slicks. While heavier crude oil initially spreads to slicks several millimeters thick and may also form tar balls and thus may not go through progressive stages of thinning [74].

Gravity and surface tension are the main forces acting in favor of spreading, while inertial and viscous forces work against it. Therefore, oil slick spreading occurs even in the absence of sea currents or deformations caused by wind. The spreading rate depends on the sea surface temperature, oil viscosity, and density [107]. A low-viscosity oil will spread much quicker than a highly viscous oil, which may remain as a series of patches rather than creating a continuous film [108].

Winds and sea currents also affect the spread the oil and speed up the process. Oil slicks will elongate in the direction of the wind and sea currents and, as the spreading continues, take on many shapes depending on the driving forces. Oil sheens often precede heavier or thicker oil concentrations. If the winds are high (more than 20 km/h), the sheen may separate from thicker slicks and move downwind [103]. Although the spreading of oil on the sea surface does

not change any physical or chemical properties of the oil, any change in oil spill thickness and the area-to-volume ratio due to oil spill spreading affects the rate of all the other weathering processes, as well as the ability to recover and treat the oil spill. Therefore, accurate oil spill-spreading modeling is essential [109].

The most used models for oil spill spreading are based on the work by Fay [110,111]. Fay suggested that spreading is best described in three phases; inertial, viscous, and surface tension. The inertial phase is dominated by gravity forces, the viscous phase by gravity and viscosity forces, and the surface tension phase by surface tension spreading. Generally, spreading is a process with specific model limitations, as it depends on oil characteristics and ocean state. Existing algorithms only partially approximate the actual surface area of real spills. A rigorous solution to the problem requires sea state and oil data that might not be available in the initial stage of an operational spill response. Another source of uncertainty is that, for computational purposes, oil spill models divide the slick into Lagrangian Elements (LEs) or particles and track their movement, which does not directly provide an oil concentration or thickness at specific locations [1].

1.5.2. Drifting (horizontal movement of Oil Slicks)

In addition to their natural tendency to spread, oil slicks on the water are moved along the water surface, primarily by sea currents and winds [41]. The movement resulting from wind and sea current inputs is illustrated in **Figure 1.7**.

When attempting to determine the movement of an oil slick, two factors affect accuracy. The more significant factor is the inability to obtain accurate wind and sea current speeds at the time of a spill. The other, very minor factor is a phenomenon commonly known as the Coriolis effect, whereby the earth's rotation deflects a moving object slightly [103]. The common modeling technique employed by nearly all oil spill models to account for the effect of wind on the oil slick floating on the sea surface is to use a "wind factor" approach, i.e., the impact of wind will move oil at a certain fraction of the wind speed at a certain angle to the wind direction [112]. In addition, most oil spill models use the Lagrangian method (e.g., GNOME, MEDSLIK, and OpenOil), so oil particles are assigned an advective displacement

according to sea currents, wind, and Stokes drift, and a diffusive displacement given by a random walk model [1].

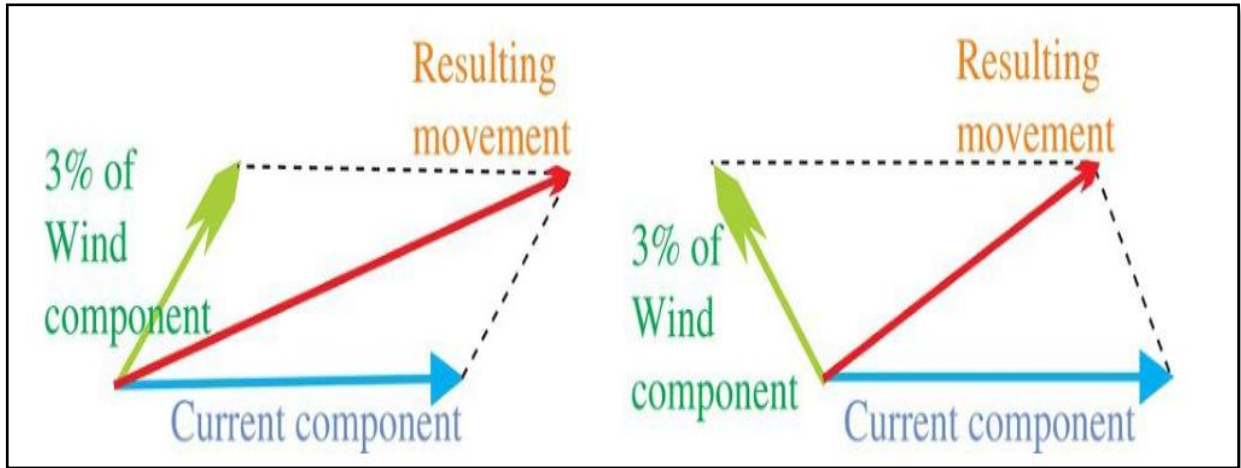


Figure 1.7 The effect of different wind and current directions on the resulting movement of an oil slick [113].

1.5.3. Evaporation

Evaporation occurs when the oil's volatile elements diffuse from the oil and entrain the gaseous stage while the heavier oil components remain at sea [114]. According to Fingas [115,116], evaporation is the first and the most crucial weathering process that oils undergo after spillage and the dominant weathering process during the initial stages of an oil spill.

Light compounds with lower boiling points can vaporize at lower temperatures, and as the temperature of the oil increases, heavier compounds may also evaporate. The primary source of heat to vaporize the oil is from the sun [56]. Within a few days following a spill, light crude oils can lose up to 75% of their initial volume, and medium crudes up to 40%. In contrast, heavy or residual oils will lose no more than 10% of their volume in the first few days following a spill [117]. The properties of the oil can change significantly with the extent of evaporation. According to Mishra and Kumar [19], the density and viscosity of the oil slick are modified considerably by evaporation. If about 40% (by weight) of the oil evaporates, its viscosity could increase by as much as 1000-fold. Its density could rise by as much as 10%. The extent of evaporation can be the most essential factor in determining the properties of oil at a given time after the spill and in changing the behavior of the oil [7].

1.5.4. Emulsification

Emulsification is the process by which one liquid is dispersed into another in the form of tiny droplets [113]. When oil leaks into water, oil emulsification is the process by which water is mixed into the oil [1]. Water droplets can persist in an oil layer in a stable state, resulting in an entirely different material. Two types of emulsions exist water-in-oil and oil-in-water. Water-in-oil emulsions, or “chocolate mousse,” are formed when strong sea currents or wave action cause water to become trapped inside viscous oil. Chocolate mousse emulsions may linger in the environment for months or even years. Oil and water emulsions cause oil to sink and disappear from the surface, which give the false impression that it is gone and the threat to the environment has ended [19].

Emulsification is influenced by turbulence, oil composition, and temperature. However, other factors affecting it include advection, diffusion, spreading, evaporation, and dissolution [118]. Emulsification can increase the volume of an oil spill by a factor of three, while it can also increase its viscosity by multiple orders of magnitude. These changes can make the chemical treatment and mechanical recovery of an oil spill challenging, so the oil spill response authorities need to be able to predict the behavior of the specific oil [109]. As oil viscosity increases, a more significant portion of oil emulsifies. Oil emulsifies, which also disrupts the evaporation rate. In parallel, the rate of emulsification expands with increasing wind speed and turbulence at the sea surface [119].

The main effect of emulsification is that it creates an emulsion with different physical and chemical properties compared to the oil initially spilled, resulting in serious implications for treatment methods. Another significant negative effect of emulsification is that it increases the volume of the slick; this means that the cleanup costs will significantly increase. Emulsions that contain about 70% water triple the volume of the oil spill. Even more significantly, the viscosity of the oil increases by as much as 1000 times, depending on the type of emulsion formed [19]. Thus, emulsification is a process with specific model limitations and has a crucial role in the impact assessment and response in oil spill modeling [1].

1.5.5. Natural dispersion

While the molecular solubility of oil in water is relatively small, breaking waves will drive tiny droplets of oil into the water column. If the droplets are tiny enough, natural turbulence in the water will prevent the oil from resurfacing, just as turbulence in the air keeps small dust particles afloat. This process is called natural dispersion [50]. Hence, natural dispersion occurs when fine oil droplets are transferred into the water column by wave action or turbulence. Tiny droplets spread and diffuse into the water column, while larger ones tend to rise and form a thin film known as sheen [104,120]. An oil sheen is a thin oil film, usually with a thickness of 0.003 mm or less [56]. The rate of natural dispersion is influenced by environmental frameworks (i.e., the sea state), oil properties, and spill characteristics (oil-film thickness, density, viscosity, and oil/water surface tension). Heavy crude oil will not disperse naturally to any significant extent. In contrast, light crudes can disperse significantly. In addition, considerable wave action is needed to disperse the oil [121]. The long-term fate of dispersed oil is unknown, although it may degrade to some extent as it consists primarily of saturated components [74,104].

1.5.6. Dissolution

Dissolution is a physical process by which, when oil is in contact with water, some soluble components are lost to the water under the slick [122]. Dissolution is a slower process in comparison with the processes mentioned above. Oil can dissolve in the water column from the surface slick or dispersed oil droplets [123]. Dissolution occurs immediately after the spill, and the dissolution rate decreases rapidly as soluble substances are quickly depleted. Some of the soluble compounds also evaporate rapidly [124]. Thus, dissolution and evaporation are two competitive processes, although evaporation exhibits faster rates and affects more significant parts of the spill. Light crude oil is highly soluble in seawater and relatively more volatile [125].

The dissolution rate is mainly affected by the water solubility of the oil compounds, the contact area with the water, the water temperature, the oil composition, the sea conditions, and the dissolution transfer coefficient across the boundary layer at the water-oil interface

[56,109]. Smaller and lighter components have a higher solubility than larger and heavier molecules. In surface oil spills, dissolution has a small contribution to the overall weathering of the oil because the very light and aromatic components are a small proportion of the whole oil. They are also volatile and tend to evaporate faster than they dissolve [109,117].

1.5.7. Photo-oxidation

Crude oils are generally dark-colored and can absorb ultra-violet radiation (UV) from the sun; this can change the composition of the oil [126,127]. The extent of photo-oxidation depends on the surface area of exposed oil on the water surface, dissolved oxygen concentration, sunlight availability, water clarity, and oil composition [128,129]. The sun's action on an oil slick allows oxygen and carbon to combine and form new products that may be resins. The resins may be somewhat soluble and dissolve into the water or form water-in-oil emulsions. For most oils, photo-oxidation is not essential in changing their immediate fate or mass balance after a spill [74]. Generally, photo-oxidation has long been considered a relatively slow process, with thin oil films dissolving, even in bright sunlight, at rates lower than 0.1% per day [2]. Therefore, photo-oxidation is not contained in modern oil spill response models since limited knowledge exists on this process, and the importance and rates of the process have not yet been thoroughly studied [1].

1.5.8. Sedimentation

Sedimentation is the process by which oil is deposited on the bottom of the sea or other water bodies [104]. Sedimentation of oil droplets occurs as a result of stranding on coastlines. When spilled oil reaches shores, a large portion of oil remains adsorbed onto the sediment surface; increased density of the entrained oil and surface slicks due to weathering processes; incorporation of fecal pellets by means of zooplankton or benthic organisms' ingestion; and oil adherence or flocculation and agglomeration with suspended particulate matter aggregates [123,130,131]. Studies have shown that interactions between oil and sediments play an essential role in the dispersion and degradation of spilled oil [132]. In nearshore waters, naturally dispersed oil droplets may aggregate readily with suspended particulate material

(SPM) such as clay minerals or organic matter to form oil– suspended particulate material aggregates. Several laboratory and field studies have documented interactions between oil and suspended particulate material. Poirier and Thiel [133] reported that oil dispersed in a mixture of sediments and seawater settled and was trapped on the bottom by the sediments.

When the spilled oil reaches shorelines sometimes interacts with mineral fines suspended in the water column, and the oil is transferred to the water column [134]. Particles of mineral with oil attached may be heavier than water and sink to the bottom as sediment, or the oil may detach and refloat. Oil–fines interaction does not generally play a significant role in the fate of most oil spills in their early stages but can impact the rejuvenation of an oiled shoreline over the long term [113]. Some response options, such as in-situ burning of the oil spill, also leave a denser residue that may sink [109]. In a few well-studied oil spills, a significant amount (about 10%) of the oil was sedimented on the seafloor. Such amounts can be very harmful to biota that inevitably come in contact with the oil on the sea bottom. Because of the difficulty in studying sedimentation, data are limited [113].

1.5.9. Biodegradation

A large number of microorganisms are capable of degrading petroleum hydrocarbons. Many species of bacteria, fungi, and yeasts metabolize petroleum hydrocarbons as a food energy source [135]. Biodegradation of oil by native microorganisms is one of the most effective natural processes that can attenuate the environmental effects of marine oil spills in the long term. Several in-depth reviews of this process are cited in the literature [136–138]. The biodegradation rate of the oil depends on the type of petroleum hydrocarbons, temperature, species of microorganisms, and the availability of oxygen and nutrients [136,139].

The rate of oil biodegradation increases with the available water-oil interface, which for dispersed oil droplets increases as the size of droplets decreases [140]. However, biodegradation can be a relatively slow process for some oils. For example, it may take weeks for 50% of diesel fuel to biodegrade under optimal conditions and years for 10% of crude oil

to biodegrade under similar conditions. For this reason, biodegradation is not considered a vital weathering process in the short term [104].

1.6. Overview of oil spill modeling

1.6.1. Definition and purpose

To begin, consider the challenge associated with defining “oil spill modeling.” Although the specific definition can vary, a general definition of oil spill modeling is: modeling the spatial and temporal dynamics of spilled oil, its composition, weathering, and transport in the environment, as well as the estimation of risk, vulnerability, and potential impacts to ecosystems, stakeholders, and communities in the path of a spill [141,142].

Oil spill models are numerical tools that can anticipate a spill's trajectory, estimate the time it will take for the oil to reach certain regions of interest, and assess the spill's status once it gets to the modeled sites [10,143]. These models can predict the possible movement of the actual or hypothetical oil spill [114]. Oil spill models may be categorized into two types: Eulerian and Lagrangian. The first approach deals with the mass and momentum conservation equations applied to the oil slick or with a convection-diffusion equation. In this latter, the diffusive part of the equation illustrates oil spreading, and the convective terms describe the advection of oil through currents and wind [144].

On the other hand, the Lagrangian models discretize oil slicks as a large number of particles advected by the merged result of winds, waves, and currents, but also being transported via dispersion [64]. Authorities may use oil spill models for contingency planning and emergency response to a crisis occurring due to accidental oil releases. Such planning, in conjunction with an oil spill model, may lead to a deeper understanding of the effects of oil weathering processes on oil spillage, at the surface and within the water column, and thus to improved methods to monitor and clean it up [19,145].

The challenges faced in this field. There are several challenges faced in the field of oil spill mathematical modelling. One of the main challenges is the complexity of the physical processes involved in an oil spill. Oil can move in many different ways, depending on factors

such as wind, waves, and water currents, and these movements can be difficult to predict. Additionally, the behavior of oil can be affected by a wide range of environmental factors, such as the temperature and salinity of the water, the presence of other chemicals, and the topography of the coastal area. Another challenge is the lack of data on the behavior of oil in the environment. Many oil spills occur in remote locations, and it can be difficult to collect accurate data on the movement and dispersion of the oil. Additionally, the conditions in an oil spill can change rapidly, making it difficult to collect data in real-time. Finally, the complexity of the computer simulations used to model oil spills can also be a challenge. These simulations require a large amount of computational power and can take a long time to run. Additionally, the mathematical equations used in the simulations can be difficult to solve, requiring the use of advanced mathematical techniques.

1.6.2. The importance of marine oil spill modeling

Oil spill mathematical modelling is important for several reasons. Firstly, it can be used to predict the movement and dispersion of an oil spill, which can help to improve response efforts and minimize the environmental impact of the spill. This can include identifying areas that are at high risk of oil impact, such as sensitive habitats or breeding grounds for wildlife. Secondly, oil spill mathematical modelling can also be used to evaluate different response strategies, such as the use of chemical dispersants or the deployment of booms and skimmers. This can help to determine the most effective and efficient response options. Thirdly, oil spill mathematical modelling can also help to improve our understanding of the environmental impacts of oil spills. This can include identifying the factors that contribute to the persistence of oil in the environment and the potential long-term effects on wildlife and coastal habitats. Finally, Oil spill mathematical modelling also has important implications for the oil industry and policymakers. It can be used to evaluate the environmental risks associated with different types of oil development, and to inform regulations and guidelines for the management of oil spills. Overall, oil spill mathematical modelling plays a critical role in minimizing the environmental impact of oil spills and ensuring the protection of our oceans and coastal habitats.

1.6.3. Examples of oil spill modeling software

Various models in the literature aim to predict the trajectory and fate of hydrocarbon spills occurring at the sea surface and the water column. The main inputs in each case are not only oil spill data, such as the type of oil and the initial location of spillage, but also Metocean variables, such as the three-dimensional flow field, sea temperature, salinity and density profiles, atmospheric winds, and bathymetry. These latter data may be obtained from different operational oceanographic forecasting systems, such as CMEMS (Copernicus Marine Environmental Monitoring Service) and NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [1]. Several oil spill mathematical models have been developed worldwide to predict the trajectory and fate of oil spills on the sea surface and in the water column; some of these models are free to use, while others have commercial licenses that must be purchased. The following are some of the most widely used oil spill models for predicting the direction and fate of oil spills:

The General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Modelling Environment (GNOME) is an open-source oil spill model developed to serve as a response tool for Lagrangian oil trajectory modeling in two dimensions [23]. MOTHY (modèle océanique de transport d'hydrocarbures), developed by Météo- France [146], is a 3D Lagrangian pollutant drift model predicting the fate and transport of oil slicks on the ocean surface. The MOHID (Modelo Hidrodinâmico) Lagrangian oil spill model was developed by the Technical University of Lisbon [147]. The Spill Impact Model Application Package (SIMAP) designed by Applied Science Associates is a commercial oil spill model that produces a three-dimensional trajectory, degradation processes, oil-sediment interactions, biological effects, and other impacts of spilled oil and fuels [33,148,149]. Applied Science Associates also developed the deep water oil spill model and analysis system (OILMAPDEEP) to estimate the fate and transport of subsea releases, the near-field plume characteristics, and oil droplet size distributions for a specified release [32,150]. The comprehensive deepwater oil and gas model (CDOG) is a three-dimensional model developed by Yapa and Li [151], simulating oil and gas released from deep water accidents. The oil spill contingency and response model (OSCAR) is an advanced, three-dimensional model for planning and response

to oil spills developed by SINTEF in Norway [152], calculates the fate and effects of surface releases or blowout/buoyant plumes of oil or gas [29]. OILMAP is a three-dimensional oil spill response and contingency planning model developed by Applied Science Associates. It deals with surface and subsurface hydrocarbon releases and provides algorithms for oil spreading, evaporation, emulsification, entrainment, oil-shoreline, oil bed, and oil-ice interaction [30,153,154]. Delft3D-PART, developed by Deltares, is a module of the Delft3D modeling suite that estimates the transport and simple water quality processes via a particle tracking method, implementing the 2D or 3D flow data by the Delft3D-FLOW (hydrodynamic module) [22,91]. MEDSLIK-II is an open-source oil spill model for surface oil spills in the marine environment, designed to forecast the transport and weathering of an oil slick and to express the displacement of floating particles using a Lagrangian formalism, in conjunction with an Eulerian ocean circulation model [40]. Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) is an oil spill model developed by NOAA. It simulates the processes involved in oil weathering, including evaporation, natural dispersion, and emulsification [50]. SL Ross oil spill fate and behavior predicts oil fate and transport using the basic oil characterization technique (American Society for Testing and Materials procedures) that involves weathering processes [62,63,155].

1.6.4. Previous studies

Numerical modeling has become an essential tool for oil spill forecasting, which allows for real-time effective clean-up operations immediately after the occurrence of oil spill accidents. Therefore, various mathematical models have rapidly developed in recent years for simulating and predicting oil spills. However, the movement and variation of the oil spill in the sea is a complex process, influenced by physical, chemical, and biological processes, and is related to the marine hydrodynamic, meteorological conditions, and oil properties [156]. Before the 1960s, finding a mathematical model that predicted the movement of oil spilled on the water was difficult. However, several events led to rapid progress in oil spill modeling and research. There were a series of “super” spills from tankers in 1967 and 1968, with the Torrey Canyon casualty being the most notable [157]. Up to now, many scholars in the world have

established and perfected lots of oil spill models. In the last five and six decades, many researchers have studied the processes of oil spills, and various oil spill models have been proposed [158]. Fay [111] divided the oil film expansion into three stages: inertial expansion, viscous expansion, and surface tension expansion, but did not consider the influence of wind on horizontal diffusion. Lehr [159] considered the influence of wind and established a modified Fay-type spreading equation. Elliott [160] proposed the oil particle method for the first time, which regards the oil spill as a large number of oil particles and does not need to solve the diffusion equation. More and more oil spill models have begun to use the Lagrange oil particle algorithm, which has become the mainstream method of oil spill trajectory prediction [156]. Many researchers have developed and simulated the movement and fate of oil spills incidents in the marine environment in the past two decades.

Beegle-Krause 1999 [161], established a new spill trajectory model, The General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME), a standard Eulerian/Lagrangian spill-trajectory model designed to meet the needs of planners and expert responders. **Buranapratheprat 2000** [162], utilized an oil spill trajectory model for the South China Sea and applied it in the upper Gulf of Thailand. He assumed that spilled oil would act as a floating object on the sea surface moving in the direction of net forcing composed of Ekman current, Stoke drift motion, residual current, and tidal current. **Chao et al. 2001** [163], established two-dimensional and three-dimensional oil spill models in Singapore coastal waters using an oil particle algorithm. In the two-dimensional model, the oil slick was divided into a number of small grids, and the properties of each grid due to spreading, advection, turbulent diffusion, evaporation, and dissolution were studied. A three-dimensional oil fate model is developed based on the mass transport equation, and the concentration distribution of oil particles can be solved, to simulate the distribution of oil particles in the water column. This model can predict the oil slick movement on the water's surface. **Etkin et al. 2002** [149], used the SIMAP modeling software for a hypothetical oil spill in San Francisco Bay to determine the spilled oil's impact and the relative spill mitigation costs. Oil spill trajectory and fate and effects modeling were coupled with modeling of response operation strategies (conventional mechanical containment and recovery operations; dispersant application with concurrent mechanical containment and

recovery; and in-situ burning with concurrent mechanical containment and recovery). **Lima et al. 2003** [154], applied the OILMAP model to simulate oil spill incidents along the Brazilian coast. The model implementation involved a detailed meteorological and oceanographic characterization of each study area with a review of existing data and hydrodynamic modeling covering more than 9,000 km of the Brazilian coastline. **Bergueiro et al. 2006** [164], simulated an oil spill at the Casablanca oil platform (Tarragona, Spain) under different environmental conditions utilizing EUROSPILL, OILMAP, GNOME, and ADIOS models. They identified the most probable trajectory of the spill according to oceanographical and meteorological conditions present during the spill. **Papadimitrakis et al. 2006** [165], presented a mathematical model that simulates an oil spill's time-dependent behavior near coastal zones. The model solved the full set of partial-differential equations that govern transient, two-phase, turbulent flow, and heat/mass transfer phenomena. The model was used for predicting the consequences of hypothetical oil spills that could occur near a coastal area of great natural beauty and tourist attraction off the island of Lesbos in Greece. **Vethamony et al. 2007** [166], used the MIKE 21 Spill Analysis model to simulate a real oil spill that had occurred in the coastal waters of India. They generated trajectory maps of the spilled oil and validated the hydrodynamics and spill trajectory with field measurements and observations. **Elhakeem et al. 2007** [167], presented a simulation of oil spillage trajectory in the Arabian (Persian) Gulf using 3-D rectilinear hydrodynamic and MIKE3 oil spill models. Typical representative environmental conditions of the Arabian Gulf were the first setup into a hydrodynamic circulation model using data from various sources. The spill analysis model was set up using the flow field produced from the hydrodynamic simulation. Its performance was further tested against the recorded occurrences of the historical Al-Ahmadi Gulf oil spill catastrophe. **Díaz et al. 2008** [168], used the probabilistic particle tracking model to simulate the oil diffusion after the oil spill from the Prestige wreckage in Galicia, Spain. **Guo and Wang 2009** [169], based on an oil particle algorithm, combined with the 3-D free-surface hydrodynamics model and the third-generation wave model, simulated the oil release in Dalian coastal waters. **Liao and Li 2010** [170], used the Lagrangian oil particle tracking algorithm to predict the trajectory of spilled oil, and the oil spill fate processes and applied to simulate the “Hyundai Advance”

oil spill incident that occurred in the Pearl River estuary, China. **Liu et al. 2011** [171], implemented a Lagrangian trajectory modeling system immediately upon spill onset in the Gulf of Mexico by using a numerical model and satellite remote sensing resources available from existing coastal ocean-observing activities. **Mariano et al. 2011** [172], developed two oil particle trajectory models and applied them to the 2010 Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico. Both models used sea current fields from a high-resolution numerical ocean circulation model (HYCOM) simulation. The models used the Lagrangian technique to advect oil particles and Monte-Carlo based schemes for representing uncertain biochemical and physical processes. **Cucco et al. 2012** [173], used operational finite element numerical models with high spatial resolution nested within a coarse open ocean operational model based on the finite differences method to reproduce the hydrodynamics and the transport processes occurring in coastal areas characterized by a complicated geometry. **Quang et al. 2013** [174], Simulated an oil spill transport off Lach Huyen port in the Northeast of Vietnam due to a vessel collision, using MIKE 21 SA. Simulation results showed that spill trajectory and slick area depend on analysis hydraulic regime, wind direction and wave in the study area. **Prabhu and Kankara 2014** [175], developed a MATLAB based system to simulate oil spill trajectory using GNOME model for the Indian coast. The system generates the current data processed by various models such as MIKE-21, ADCIRC and also accepts currents in a number of file formats (ASCII, netCDF) from different types of models. the developed system helps in selecting the optimum data needed for GNOME model. **Liu et al. 2015** [176], developed an oil particle trajectory model then applied to the 2011 Penglai subsurface oil spill in the Chinese Bohai Sea. The three-dimensional model simulated ocean currents fields and utilized meteorology data from the local measurement station to drift spilled oil. **Mishra and Kumar 2015** [19], modeled and analyzed effects of initial oil properties on its behavior, immediately after the spill. They selected three different crude oils: heavy, intermediate and light and used fourth order Runge-Kutta method to solve spreading, evaporation, dissolution and emulsification processes simultaneously. They found that light and intermediate oil uptakes more water than heavy crude oil with time. **Toz et al. 2016** [177], investigated the oil spill and predict the future accidents likely to be encountered around the Bay of New York, America.

ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills), has been conducted for natural degradation calculations, and, GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), has been conducted for surface spread simulation. **Yu et al. 2016** [178], proposed a random walk parameterization hindcast method and combined with remote sensing data and oil-spill models for the Bohai Sea, China. **Toz 2017** [52], investigated the oil spill and predicted the future accidents likely to be encountered around the Bay of Samsun, Black Sea. They used ADIOS and OILMAP to simulate the movement and fate of the spilled oil. **Lu et al. 2017** [179], modeled the transport and fate of oil after a proposed oil spill incident in the Barents Sea using the OSCAR model. They calculated the possibility of spilled oil reaching the open sea and the strand area. The influence area of the incident was calculated by combining the results from many simulations. **Li et al. 2017** [180], developed a 3D mathematical model to estimate the oil release rate and simulate the oil dispersion behavior. The Eulerian-Lagrangian method is employed to track the migration trajectory of oil droplets. **Qiao et al. 2019** [181], established a coupled 3D model to provide short- and long-term simulations and projections for the Sanchi oil spill about 300 km off Shanghai, China. The model has two parts: (1) a coupled 3D operational ocean forecast system to simulate ocean environments and (2) a 3D oil spill model to simulate the trajectories of oil particles based on their properties. **Soussi et al. 2019** [182], developed a model to simulate the oil spill trajectories on the sea based on the Lagrangian approach, to define the behavior of oil slicks on the water surface in space and time. The dynamics of oil spreading on the sea surface were modeled, taking into account actual values for wind speed and surface current intensity. The model has been applied to simulate the oil spill propagation in the real case of the collision off the coast of Saint-Tropez, France. **Zhen et al. 2020** [183], established an oil particle drift model and oil spill weathering model and used to simulate the oil spill accidents on the sea area by inputting the terrain data, environmental conditions and oil spill information into the hydrodynamic model and oil spill model. They applied the model to Daya Bay, South China Sea. **Prasad et al. 2020** [184], simulated oil spill trajectory resulted from the sank of Merchant Vessel (MV) using GNOME model. GNOME was forced with winds from European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) and ocean currents from Indian Ocean Forecasting System, and High-

resolution Operational Ocean Forecasting and reanalysis System. **Lawan 2020** [185], simulated oil spill trajectory and fate at the Bahamas Caribbean using GNOME, and ADIOS model. **Hosseinpour et al. 2020** [186], carried out three-day simulation of oil leakage and its distribution in different volumes for five oil operating areas in Siri oil region, which located in the north-western part of the Danish sector of the North Sea, using GNOME model in order to track oil spill. **Balogun et al. 2021** [187], Used GNOME model to develop an oil spill environmental vulnerability model for predicting and mapping the oil slick trajectory pattern in Kota Tinggi, Malaysia. The output was integrated with coastal resources, comprising biological, socio-economic and physical shoreline features. The impact of seasonal variations on the vulnerability of the coastal resources to oil spill was modelled by estimating the quantity of coastal resources affected across three climatic seasons. **Naz et al. 2021** [188], simulated four oil spill events in the Indian Ocean. They utilized the General National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Operational Modeling Environment (GNOME) and Automated Data Inquiry for Oil Spill (ADIOS) to simulate oil spill movement and calculate weathering processes after spillage. **Gurumoorthi et al. 2021** [10], assessed the fate of the MV Wakashio oil spill after the Japanese bulk carrier *Wakashio* ran aground on a coral reef in south Mauritius and the driving forces responsible for possible environmental consequences of the polluted coastal region. They used the GNOME model considering various meteo-oceanographic forcings such as (i) winds and sea currents, (ii) only winds, and (iii) only winds with different diffusion coefficients and then validated the results with the satellite images. **Pradhan et al. 2022** [189], studied the impact of hypothetical oil spills in Odisha Offshore, a coastal state on India's eastern coast, using the GNOME model. They simulated 10,000 barrels of medium crude oil in different locations of Odisha offshore for various weather conditions. **Prasad et al. 2022** [95], used the General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Modeling Environment (GNOME) to simulate the drift pattern of Heavy Fuel Oil (HFO) due to vessel collision in the Bay of Bengal. They obtained wind velocity fields from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), while the modeled ocean currents were from High-resolution Operational Ocean Forecasting and reanalysis System (HOOFS). **Grubestic and Nelson 2022** [190], evaluated the potential spatial vulnerability of

coastlines of oil spill from the Nabarima, which is a floating storage facility and offloading vessel in the Gulf of Paria, between Venezuela and the island of Trinidad. They simulate the trajectory and fate of the spilled oil using the Blowout and Spill Occurrence Model (BLOSOM). **Akinbamini et al. 2022** [191], used GNOME and ADIOS to predict the trajectory and fate behaviors of a heavy oil spill from the floating storage unit platform in an oil field in the United Kingdom continental shelf for 5 days in October under the forcing of two different ocean models, namely Real-Time Ocean Forecasting system (RTOFS) and Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM).

Chapter 2. Methodology and data used

The Gulf of Suez (GOS) is one of the world's busiest shipping lanes and Egypt's primary source of crude oil. Therefore, the gulf is highly vulnerable to oil spill incidents, which might threaten the coastal ecosystem and touristic resorts. This study aims to forecast an oil spill trajectory and fate using the General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) and the Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) models to predict the impacted regions, determine when the oil will reach the shoreline and compute the most crucial weathering processes of the spilled oil (evaporation, emulsification, and dispersion).

2.1. The Gulf of Suez

The Gulf of Suez (GOS), which stretches 300 km from Port Suez to Shadwan Island, is connected to the northern Red Sea by the Straits of Gubal and the Mediterranean Sea via the Suez Canal [192] (**Figure 2.1**). Eladawy et al. [193] described the GOS as a semi-enclosed shallow basin with an average depth of 40 m, a maximum width of 19–32 km, and a total surface area of approximately 10,510 km². The GOS boasts abundant coral reefs and marine life, increasing its economic significance [194]. The GOS is also Egypt's primary crude oil source. According to Hussein [61], the GOS oil production accounts for 85% of Egypt's crude oil production with 26 offshore fields, including 136 production platforms and 570 oil wells, linked by a 450 nautical mile submerged pipeline network established more than 20 years ago (**Figure 2.2**). Following the completion of the new Suez Canal project in 2015, the GOS's importance to the Egyptian economy grew significantly. This project improved the Suez Canal region's status in worldwide trade. Hence, daily canal traffic increased by more than 56 vessels, from 18,830 in 2020 to 20,694 in 2021 [195] (**Figure 2.3**).

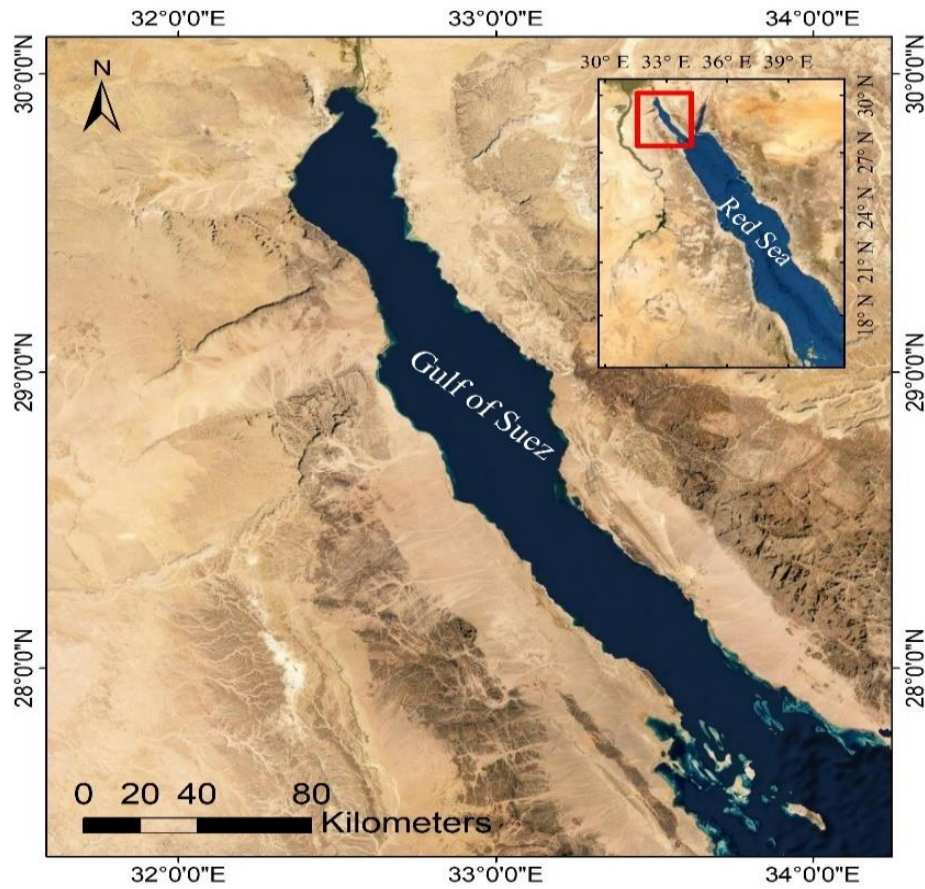


Figure 2.1 The Gulf of Suez topographic map

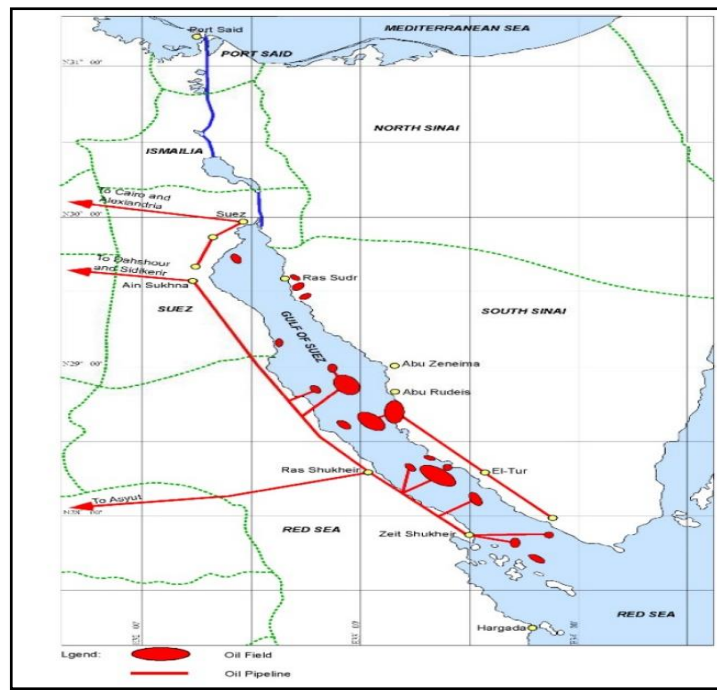


Figure 2.2 Locations of Oil Fields and Pipelines in the Gulf of Suez [200]

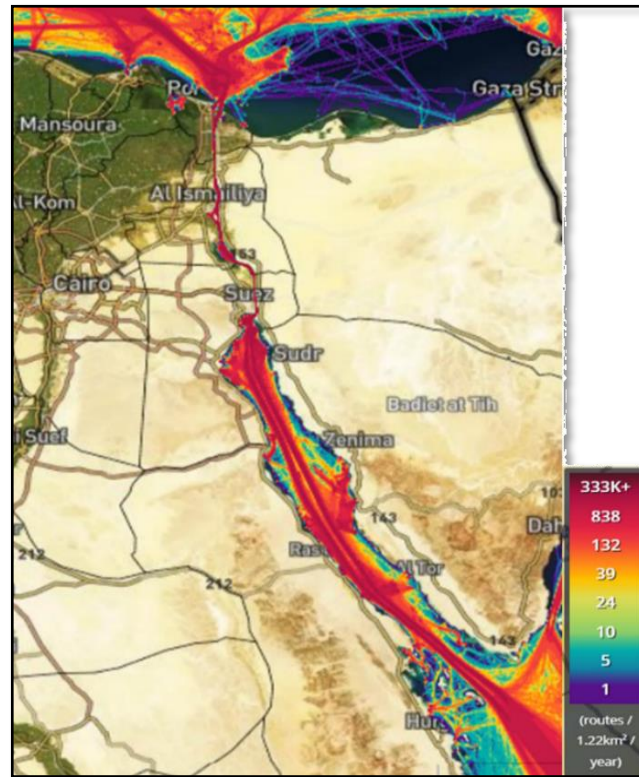


Figure 2.3 Contours depicting the marine traffic density in the Gulf of Suez for all ship types in 2021 [201].

Considering the massive transport of oil along its main axis, the GOS is consistently at risk of accidental oil spills, the worst of which occurred in 1982 [196]. Within 4–6 h, a considerable amount of crude oil was released into the sea while loading a tanker at Ras Shukheir [197]. In June 2010, an oil spill in the northern Red Sea polluted around 160 km of coastline, including tourist beach resorts in Egypt and the Jebel al-Zayt coast [198]. Hence, Ship-borne transportation and the size of tankers are increasing by the day, and this trend is likely to persist [199].

The Coastal and Marine Zone Management Division of the Environmental Management Sector in the Egyptian Environmental Affairs Agency (EEAA) has data on oil spill incidents from 1998 to 2005. Of 122 oil spill incidents, the spots of 85 incidents have been identified. **Figure 2.4** shows the zones having suffered from oil spill incidents from 1998 to 2005. This figure also shows that the Gulf of Suez has possible oil spills in the whole area. However, the following zones have suffered from frequent incidents:

- 1) Hurghada (15 incidents)

- 2) Ain Sukhna port (15 incidents)
- 3) The southern entrance of the Suez Canal (12 incidents)

Because of its strategic position between the Mediterranean Sea and the Indian Ocean, the Red Sea is subject to considerable shipping activity, particularly oil tanker traffic. Therefore, it is a potentially vulnerable location to oil spills caused by inadvertent discharges that could harm the environment. Consequently, it is advantageous to possess knowledge of the transport mechanisms that occur in the Red Sea and prediction technologies that could aid in decision-making during an unintentional oil spill. Unfortunately, few oil spill models for the Red Sea are described in the literature.

Nasr and Smith 2006 [62] performed a computer simulation of oil spills for four environmentally sensitive areas along Egyptian coasts using the S.L. ROSS model oil spill model that incorporates the essential variables and processes affecting oil transport in seawater. They do not provide details on how water circulation (the essential transport driving mechanism) is obtained: only that a water current map was constructed integrating data from different sources, including observations by sea captains. **Shehadeh et al. 2012** [202] simulated an oil spill from an oil blowout on a drilling rig in the Gulf of Suez, Red Sea Region, using the Canadian oil spill predictive model S.L. ROSS. The model describes the trajectory and behavior of oil spills as a function of type, size, oil properties and prevailing environmental conditions. The spill trajectory component relies of the entry of best available wind and current data. Also, the model simulates the results of the weathering spill processes of spreading, evaporation, natural dispersion and emulsification at regular intervals. **Perianez 2020** [64] devolved an oil spill model for the Red Sea. It uses detailed data on water circulation: instantaneous tidal currents, tidal residuals (both from a tidal model specifically applied to the Red Sea), and baroclinic circulation derived from the HYCOM ocean model. The model can also incorporate forecasts of local (in the spill area) winds. The Lagrangian transport model includes advection/diffusion plus specific processes for oil, such as buoyancy, decomposition, and evaporation. **Omar et al. 2021** [65] simulated the trajectory and fate of twenty-four scenarios (12 Regular and 12 Worst Cases Scenarios) using the Canadian S.L. Ross predictive mathematical oil spill model from an expected oil drilling rig source near Ras

Gharib area in the Red Sea Region. **Mona 2021** [61] simulated a hypothetical crude oil spill, using the GNOME model and Geographical Information Systems (GIS) to assess the vulnerability of environmentally sensitive coasts to a large oil spill in the northern part of the Gulf of Suez. She did not investigate how oil is affected by weathering following a spill or determine how much oil reached the shoreline. **Huynh et al. 2021** [46] simulated oil spill fate and trajectory using the GNOME and ADIOS models and then modeled the immediate public health impacts of the Safer tanker. The Safer is a deteriorating oil tanker containing 1.1 million barrels of oil that have been deserted near the coast of Yemen since 2015 and threatens environmental catastrophe to a country presently in a humanitarian crisis.

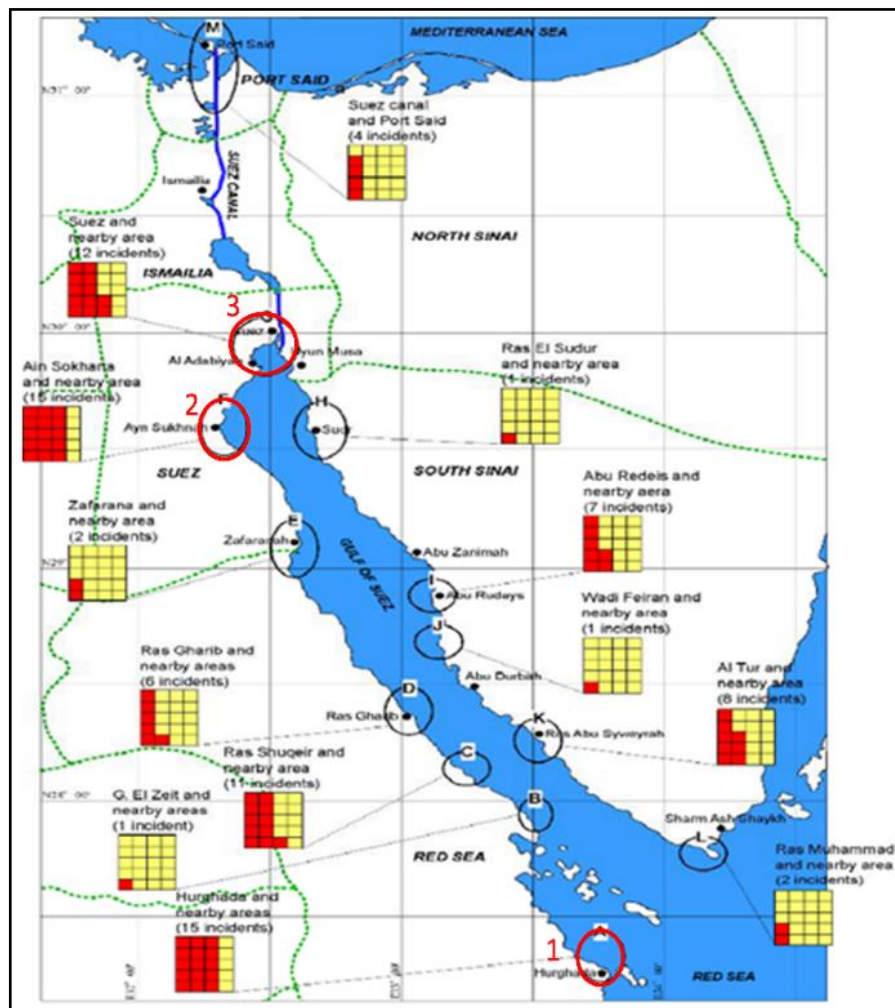


Figure 2.4 Zonal distribution of oil spill incidents from 1998 to 2005 in the Gulf of Suez, the most frequent oil spill zones circled by red; 1) Hurgahada 2) Ain Sukhna 3) The southern entrance of the Suez Canal. (Every red cubic represent one incident)

2.2. GNOME oil spill model

2.2.1. Model overview and description

General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Oil Modeling Environment (GNOME) model was developed by NOAA's Hazardous Materials Response (HAZMAT) and debuted on March 16th, 1999 [43]. GNOME is written in C++, carefully exploiting the language's classes and objects, making the model easier to update, expand, and improve. The model also contains a graphical user interface tested for clarity and ease of use. The GNOME model is two-dimensional and frequently used in marine, coastal, and riverine environments to predict the movement of oil slicks [44,45]. The GNOME model uses the Euler-Lagrange particle tracking method to monitor oil spill drift [203]. The oil slick is considered a set of particles. As each particle moves through the water, the route taken by that particle is calculated. Each particle's velocity and direction, which vary over time, may also be calculated. Due to diffusion, real-time oil status can be tracked [25,204].

GNOME's input data set contains; coastline data, the direction and magnitude of wind and sea currents, spill location, oil type, and spill volume. In addition, the model provides georeferenced trajectory output that may be used as an input to GIS (geographic information system) tools [47]. We selected the GNOME modeling tool due to its history of operational implementation and validation against real-world environmental catastrophes and its broad usage among organizations [1,46]. Also, it is more generalizable than other models and requires fewer parameters as input [44]. Furthermore, GNOME results for many situations demonstrated a significant degree of concordance between model simulation, satellite data, and experimental observations, as verified by several studies [45,48]. As a result, the Marine Emergency Mutual Aid Centre has recommended using the GNOME model to simulate oil spills in the Arabian Gulf [49]. In summary the advantages of using GNOME include:

- It is free and open-source, which makes it accessible to a wide range of users.
- It is widely used and well-established, with a large user community that can provide support and share expertise.

- It can incorporate real-time weather and oceanographic data, which allows for more accurate predictions of oil movement and dispersion.
- It allows users to incorporate GIS data, like shoreline, habitat, and bathymetry, which can be used to identify areas of high ecological sensitivity.
- It can simulate the behavior of oil in the water column and on the surface, taking into account factors such as wind, waves, tides, and ocean currents.
- It can also model the effects of chemical dispersants and physical recovery methods, such as the use of booms and skimmers.

Overall, GNOME is a powerful and widely used oil spill modeling software that can provide valuable information for oil spill response and management.

2.2.2. Movers

Movers are any physics that cause movement of the pollutant (such as oil) parcel in the water – generally currents, winds, and diffusion. Movers fall into two categories. Universal movers apply everywhere and usually consist of wind and diffusion. All other movers apply only to the map to which they are attached. The use of multiple maps is really a legacy from a previous incarnation of the model, written at a time when computers lacked sufficient memory to read-in a single map for an entire coastal region. For the most part, a single map is now sufficient, and all movers can be placed on that map. In order to get the overall movement, the u (east-west) and v (north-south) velocity components from currents, wind, diffusion, and any other movers are added together at each time-step i , using a forward Euler scheme (1st-order Runge-Kutta method). The movers are given a point (x, y, z, t) and return a displacement $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ at t **Equation (2.1)**. Calculation of zonal, meridional, and vertical displacement by movers.

$$\Delta x = \frac{u}{\cos(y)} * \Delta t, \Delta y = \frac{v}{111,120.00024} * \Delta t, \text{ and } \Delta z = 0 \quad (2.1)$$

Where $\Delta t = t - t_1$ is the time elapsed between time-steps i ; y is the latitude in radians; 111,120.00024 is the number of meters per degree of latitude (assumes 1' latitude = 1 nautical mile everywhere); and $(\Delta x, \Delta y)$ are the 2-D longitude and latitude displacement, respectively,

u and v are sea current projections on x axis and y axis respectively, at the given depth layer z . At present, movement in GNOME cannot occur between depth layers (thus, the vertical displacement, Δz , is held at zero).

The calculation of total movement is a simple vector addition of the displacement of a given pollutant particle by each mover over the time-step. There is typically significant uncertainty in the accuracy of the input forecast and/or measured data. Also, in general, these inputs to the model are gridded data which result in non-smooth velocity fields – limiting the utility of employing higher-order Runge-Kutta methods (if additional accuracy is desired, decreasing the model time-step often produces much the same improvement as would using a more complex higher-order method). Each mover present in the model setup may be active or inactive at any given time. Only movers marked active will be used in the model calculation [23].

2.2.3. Sea current mover

GNOME accepts various grid types and formats for current data. A selection of recent measured and forecast currents compatible with GNOME are available for download from different sources. GNOME accepts either time-dependent or steady-state current patterns. GNOME accepts model data on rectangular, curvilinear, and triangular grids from various models to use as currents.

For rectangular grids, GNOME allows the velocities to be at the center of grid boxes or at the nodes, but in either case, it uses the same value throughout a grid box and does not interpolate. The rectangular grids must be loaded onto a map.

For curvilinear and triangular grids, GNOME will create a map from the boundary of the grid if there is no (bna) map available. When loading curvilinear grids, GNOME divides each grid box into two triangles and assumes the velocity for both triangles is at the lower-left corner of the grid box. GNOME also extrapolates the grid to the top and right and applies the velocity values for the first row and last column there. The boundary type at the extended row and column is assumed to be whatever it was at the first row and last column.

2.2.4. Diffusion

Random spreading, i.e., diffusion, is done by a simple random walk with a square unit probability. The random walk is based on the diffusion value, D , set in the model, which represents the horizontal eddy diffusivity in the water. A low value would be $1,000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, and a high value would be between $100,000$ to $1,000,000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. The model default is $100,000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. In GNOME, diffusion and spreading are treated as stochastic processes. Gravitational and surface tension effects are ignored, as these are only important during the first moments of a spill. Complex representation of sub-grid diffusion and spreading effects are ignored. GNOME uses classical diffusion as given in **Equation (2.2)**. (The classical diffusion equation is used by GNOME) and **Equation (2.3)**.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (2.2)$$

Where C is the concentration of material and D is the aforementioned diffusion coefficient.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y * \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

Where D_x and D_y are the scalar diffusion coefficients in the x and y directions.

The mean position remains zero, but the variance grows linearly with time. It can be shown that a long series of random steps will converge to a Gaussian distribution with variance growing linearly with time. The precise form of the transition probability distribution is irrelevant as long as its second moment is $2D \Delta t$. The transition probability distribution is the distribution of displacements at each random walk step, and D is the diffusion coefficient in the diffusion equation. So, diffusion can be simulated with a random walk with any distribution, with the resulting diffusion coefficient being one-half the variance of the distribution of each step divided by the time-step, **Equation (2.4)**.

$$D_x = \frac{1}{2} * \frac{\sigma_x^2}{\Delta t} \quad (2.4)$$

In GNOME, we compute $(\Delta x, \Delta y)$ from the input diffusion coefficient D , and at each diffusion time-step, a dx and dy are chosen randomly from a uniform distribution (of floating-

point numbers) between -1 and 1 such that $-\Delta x \leq dx \leq \Delta x$, $-\Delta y \leq dy \leq \Delta y$, and $\Delta x = \Delta y$. This results in a distribution of points spread throughout the square. The variance of this distribution is given by **Equation (2.5)**. (The variance of the distribution of diffused points), and similarly, for σ_y^2 . Hence the Calculation of zonal and meridional displacement by diffusion is given by **Equation (2.6)**.

$$\sigma_x^2 = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} \frac{x^2}{2 * \Delta x} dx = \frac{\Delta x^2}{3} \quad (2.5)$$

$$\Delta x = \frac{dx * \sqrt{\frac{6 * \frac{D}{10,000} * \Delta t}{111,120.00024}}}{\cos(y)}, \quad \Delta y = dy * \sqrt{\frac{6 * \frac{D}{10,000} * \Delta t}{111,120.00024}} \quad (2.6)$$

Where $\Delta t = t - t_1$ is the time elapsed between time-steps i ; y is the latitude in radians; 111,120.00024 is the number of meters per degree of latitude (assumes 1' latitude = 1 nautical mile everywhere); and $(\Delta x, \Delta y)$ are the 2-D longitude and latitude displacement due to diffusion, respectively. GNOME also has a depth (z) dependent diffusion algorithm, **Equation (2.7)**, (Depth-dependent diffusion equation), but at the moment, it is only available for Location Files or command line-driven scenarios [23].

$$D = 10^{1+e^{(1-\frac{10}{z})}} \quad (2.7)$$

2.2.5. Beaching

After the Lagrangian Elements LE have been moved at each time-step, GNOME checks the map (i.e., as a bitmap image) to see whether the new LE positions are on land or in the water. The beaching algorithm checks the entire line on the bitmap between the old point and the new point to make sure the LE didn't jump over land and beaches the LE at the first land box it hits. The location in the water right before the land is reached is also stored to use as a starting point when a particle is re-floated. If the "prevent land jumping" box is not checked, a simplified algorithm looks at whether the new point is in water or on land and ignores the

path the LE took. The default is to have the “prevent land jumping” option on. The interaction of the pollutant with sediment and biota is not modeled.

2.2.6. Oil spill trajectories

Once the map, movers, and spills are set, the model is run, and the solution is produced in the form of trajectories. GNOME provides two solutions to an oil spill scenario:

1. a “best estimate solutions” black dots
2. a “minimum regret solutions” or uncertainty trajectory.

The “best estimate” solution shows the model result with all of the input data assumed to be correct. However, models, observations, and forecasts are rarely perfect. Consequently, we have incorporated in GNOME our understanding of the uncertainties (such as variations in the wind or currents) that can occur. This second solution allows the model to predict other possible trajectories that are less likely to occur but which may have higher associated risks. We call the trajectory that incorporates these uncertainties the “minimum regret solution” because it gives you information about areas that could be impacted if, for example, the wind blows from a somewhat different direction than you have specified or if the currents in the area flow somewhat faster or slower than expected. In some cases, the areas within the minimum regret solutions might be especially valuable or sensitive to oil pollution. Both trajectories are represented by LEs, which are statistically independent pieces of the modeled pollutant. They appear as small “pollutant particles” on a map when you run your spill. The “best guess” trajectory is represented by black “spots”; the “minimum regret” trajectory is represented by red “spots” [23].

2.3. ADIOS2 Oil spill weathering model

Oil weathering is a set of processes that affect spilled oil's chemical and physical properties, the most significant of which are evaporation, emulsification, and natural dispersion [101,102,104,205]. The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) developed the (ADIOS2) model to calculate the processes of oil weathering [50]. In

its computations, the ADIOS2 model uses real-time environmental data, such as wind speed, along with the physical and chemical properties of the spilled oil from its oil library. It blends a library of about 1,000 oils with a short-term oil fate and cleaning model to evaluate the persistence of spilled oil in the marine environment and propose cleanup strategies [51]. The model can compute the weathering processes of oil spilled in different aquatic environments such as nearshore, open sea, semi-confined coastal waters, and rivers [52]. Several studies have used the ADIOS2 model to simulate the behavior of oil when spilled into the marine environment [24,25,46,52,67,191]. **Figure 2.5** illustrates the program structure.

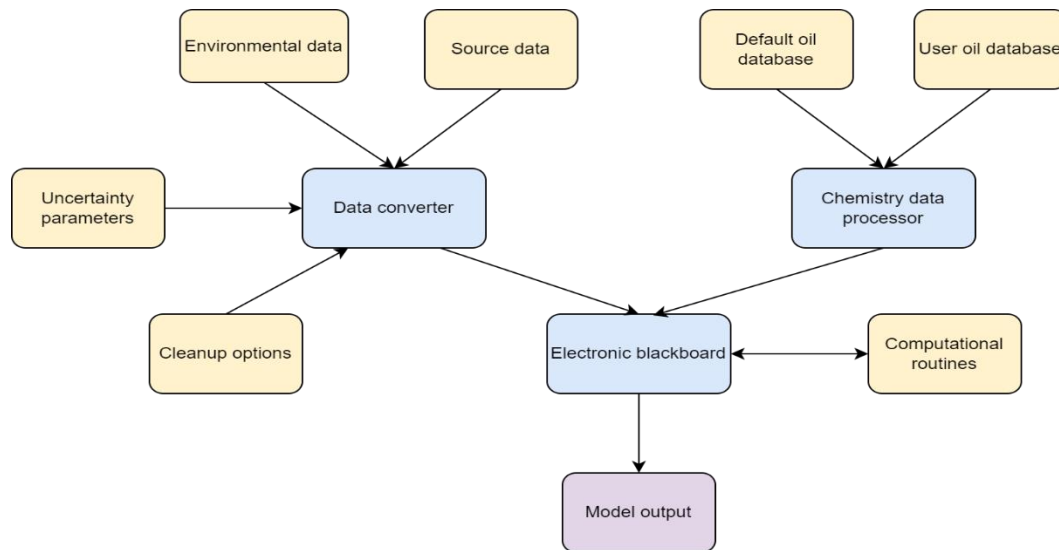


Figure 2.5 ADIOS2 program structure [50]

2.3.1. Oil evaporation

ADIOS2 contains a pseudo-component evaporation model [206]. In the pseudo-component approach, crude oils and refined products are modeled as a relatively small number of discrete, non-interacting components. Each pseudo component is treated as a single substance with associated vapor pressure and relative mole fraction. The total evaporation rate of the slick is the sum of the individual rates. However, the individual rate for a particular component is coupled to the other pseudo components by the relative mole fraction. The distillation cuts from the oil database are used to generate the pseudo components. The volumetric evaporation rate for a single pseudo component can be written as a function of the volume of the oil, and the mole fraction and molar volume of the component **Equation (2.8)**.

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_j \propto \frac{U^{7/9} V (P_v v f_m)_j}{d} \quad (2.8)$$

where j specifies the particular pseudo component, f_m the time-varying molar fraction of the pseudo component, V is the oil volume, U is the wind speed, and d is the slick thickness. The relative molar volume, v , is estimated by treating the pseudo component as if it were a collection of alkanes and using an empirical correlation of the alkanes' molar volume to their boiling point. The vapor pressure of each pseudo component, P_v , is based on Antoine's equation, as discussed in [207]. The set of coupled (by molar fraction) differential **Equation (2.8)** is solved approximately using an extension of the MacKay evaporative exposure method [208] to multiple components.

2.3.2. Oil emulsification

In a series of laboratory experiments with crude oils, Eley et al. 1988 [209] found that the rate of emulsion formation was best described by a first-order rate law in interfacial area, rather than water content. Their formulation was used in ADIOS2 to describe how water content and the droplet size distribution change with time **Equation (2.9)**:

$$\frac{dS}{dt} = K_s \left(1 - \frac{S}{S_{max}}\right) \quad (2.9)$$

where the interfacial parameter, K_s , is sensitive to wave energy. Here, S and S_{max} are the oil-water interfacial area and maximum interfacial area, respectively. Water fraction of the oil-water emulsion Y is related to interfacial area and average water droplet diameter, d_w , by the **Equation (2.10)**:

$$Y = \frac{S d_w}{6 + S d_w} \quad (2.10)$$

2.3.3. Oil dispersion

In ADIOS2, oil dispersion into the water column is estimated using a hydraulic model developed by Delvigne and Sweeney 1988 [120]. They measured the number and size

distribution of oil droplets driven into the water column by breaking waves. The vertical entrainment of oil is directly proportional to the dissipation of energy of a single breaking wave, the total dissipation rate for a given wave spectrum, and the volume of oil injected into the surface layer each time a wave breaks. The Delvigne-Sweeney formula for volume entrainment of oil, Q , is given by **Equation (2.11)**:

$$Q = C_{disp} D_e^{0.57} f_{bw} V_{disp} \quad (2.11)$$

Here, C_{disp} is an experimentally determined parameter, f_{bw} is a fraction of breaking waves per wave period per unit area, and V_{disp} is volume of oil entrained per unit volume of water. It is obtained (to within a constant) by integrating the product of the droplet volume and the frequency distribution of droplets over the volume of oil. The dissipation of wave energy per unit surface area, D_e , is estimated by **Equation (2.12)**:

$$D_e = 0.0034 P_w g H_{rms}^2 \quad (2.12)$$

where H_{rms} is the root-mean-square wave height in meters, and P_w is the water density in kilograms per cubic meter. The determination of f_{bw} is difficult and subject to large uncertainty [210]. Delvigne and Sweeney (1988) [120] used the field observations of Holthuijsen and Herbers (1986) [211] and Toba et al. (1971) [212] to estimate the fraction of sea surface covered by whitecaps as a function of the wind speed at ten meter elevations. ADIOS2 assumes that whitecap formation begins at 3 m/sec and increases linearly to 5% coverage at 4 m/sec, where a second linear relationship, utilizing the more recent observations of Ding and Farmer (1994) [213], is applied in **Equation (2.13)**.

$$f_w = 0.01 U + 0.01 \quad (2.13)$$

Here f_w is whitecap fraction. Alternative formulations are under consideration, particularly for high energy conditions where the whitecap increase may be more rapid than described by **Equation (2.13)**. The fraction of breaking waves per unit time is then computed

by dividing the whitecap fraction (as defined in terms of the active acoustic coverage definition given by Ding and Farmer) by the appropriate time constant for whitecap formation [214].

2.4. Model formulation and Data input

In order to simulate the distribution and fate of oil spills in the Gulf of Suez we used both GNOME and ADIOS2 models together. Input data sets contain coastline data, wind data, sea currents data, oil spill location, oil type, oil amount, and seawater temperature. The flowchart of the model's input and output data is summarized in **Figure 2.6**.

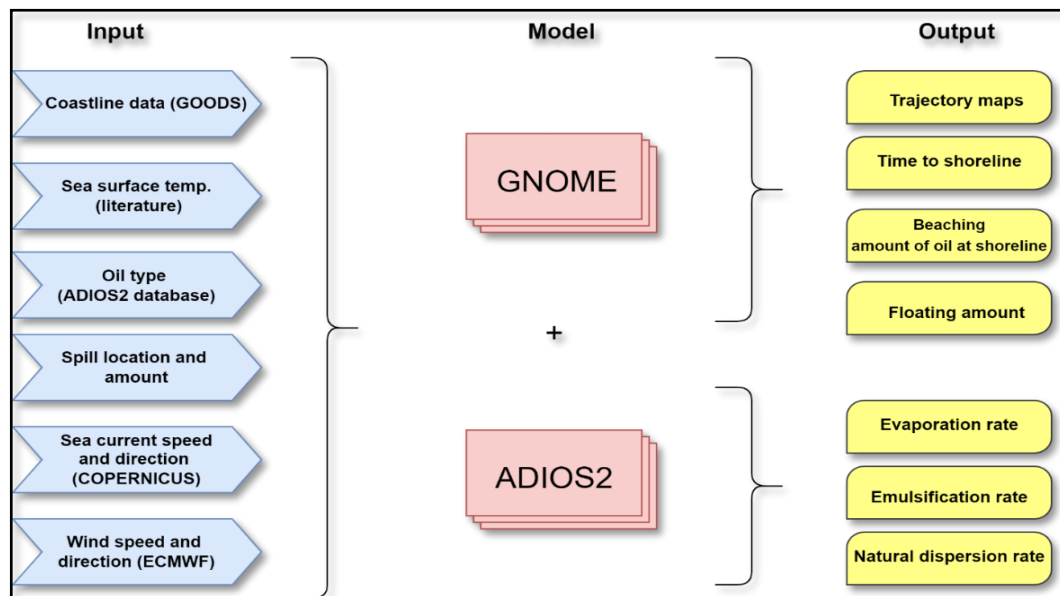


Figure 2.6 A diagram framework of the GNOME and ADIOS2 models' input and output data

2.4.1. Coastline data and sea surface temperature

The GNOME model only works with coastline data in (bna) format, which could be obtained from the Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline (GSHHS) database and then converted to (bna) format using the GNOME Online Oceanographic Data server (GOODS) (https://gnome.orr.noaa.gov/goods/tools/GSHHS/coast_subset) (**Figure 2.7**). Due to the comprehensive processing of the GSHHG data set, any errors or outliers should be removed. The shorelines consist of hierarchically closed polygons [17,215]. The coastline data for the simulation model in our study extends from 32° E to 35.5° E and from 26.5° N to 31°

N, covering the northern portion of the Red Sea, including the gulfs of Suez and Aqaba. The seawater temperature used in this study was extracted from previous studies for each location.

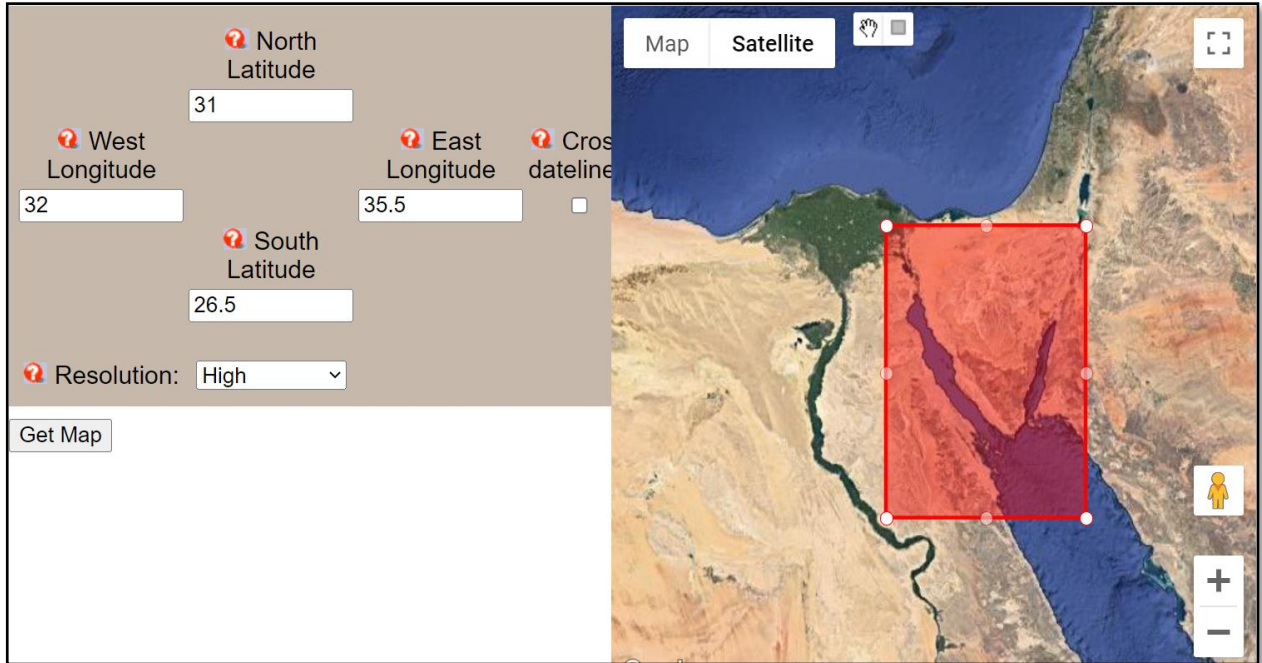


Figure 2.7 Extracting coastline data of the study area from GOODS website

2.4.2. Wind data

Winds may be entered as a constant time series or as a regular grid time-dependent model $\vec{U}_{wind}(x, y, t)$. NetCDF and ASCII formats are supported for wind model data [23]. Hourly wind data was extracted from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF) Reanalysis (ERA5) (<https://www.ecmwf.int/>) as a Network Common Data Form (NetCDF) file format. The simulation model's domain is set from 32° E to 35.5° E and 31° N to 26.5° N, covering the Gulf of Suez and Aqaba. Windage is the movement of oil-induced by the wind, which usually is around 3% of the wind speed at the surface [10]. The GNOME model proposes a wind factor of between 1% and 4% as the default value, along with winds and currents.

2.4.3. Sea current data

Unfortunately, the area under investigation has no marine currents data throughout the simulation period. Therefore, sea currents data were gathered from the Operational Mercator global ocean analysis and forecast system (<https://doi.org/10.48670/moi-00016>) in a NetCDF format. It is an ocean-atmosphere data assimilation and prediction model that offers daily 1/12° three-dimensional global ocean predictions. The data assimilation scheme used for the ocean is the Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO) variational data assimilation scheme. The technique assimilates in situ and satellite SST data, satellite altimeter of sea level anomalies (SLA), and in situ temperature and salinity profiles from various sources [216].

2.4.4. Spill volume and oil type

In this study, we assumed the spillage of about 1000 metric tons of **Arabian light crude oil** caused by a tanker accident. The Arabian Light crude oil selection was based on the frequency with which tankers carry it via the Suez Canal and the Sumed pipeline [62]. Additionally, the ADIOS2 Model library includes a parameter database for this oil type and the characteristic constants necessary to solve the constitutive equations (**Table 2-1**).

Table 2-1 Arabian light crude oil characteristics (ADIOS2 oil library database)

API (degree)	33.4
Density	0.878 g/cm ³ at 0 C°
Viscosity	12 cSt at 0 C°
Pour point	- 53 C°
Adhesion	0.14 g/m ²
Aromatic	39 weight%

(API) American Petroleum Institute gravity, (cSt) centistokes

Chapter 3. Modeling oil spill trajectory and fate off Hurghada city

3.1. Research region

Hurghada is one of the most beautiful tourist cities on the Red Sea coast. It covers about a 40 km stretch along the western shore of the Red Sea on a longitude of $33^{\circ} 48'$ E and latitude of $27^{\circ} 15'$ N. Hurghada's seafront are characterized by parallel coral reefs and is one of the most influential tourism regions on national income. In addition to coral reef habitats, the Hurghada shelf contains diverse marine habitats, including sheltered shallow lagoons, mangroves, seagrass, and open deep-water habitats [217,218].

Hurghada city is bordered to the north by Ras Shukeir, on the south by Safaga, on the east by the Red Sea coast, and on the west by the Red Sea Mountains. In front of the beaches of Hurghada are several significant islands, which joined the protected islands of the Red Sea, such as Shadwan, Abu Ramada, Small and Great Giftuns, and Abu Minqar. Northern of Hurghada at Gubal striate (at the northern entrance of the Red Sea), the islands of; Tawila, Ashrafi, Ghanim, Small Gubal, North Geisum, South Geisum, North Um Elhimat, and South Um Elhimat were found [219] (**Figure 3.1**). Annually, around 15% of worldwide maritime commerce and 10% of global seaborne oil travel through the Gulf of Suez *via* the Suez Canal, and after 2015 rebuilding of the new Suez Canal led to an increase in ship traffic [196]. **Figure 3.2** shows the ship traffic going along the coasts and marine resorts of Hurghada and the northern islands. As the number of ships increases, so does the risk of oil spills, putting more stress on Egyptian Red Sea coastlines and the touristic cities like Hurghada that provide a significant portion of the country's foreign currency. According to Egypt Independent [220], the beaches of Hurghada have been constantly exposed to oil spill accidents.

Interestingly enough, despite the region's importance, the occurrence of several oil spills, and the probability of potential accidents, there is no existing reference for predicting oil spill trajectory in the area under investigation (Hurghada), making this the first research of its sort.

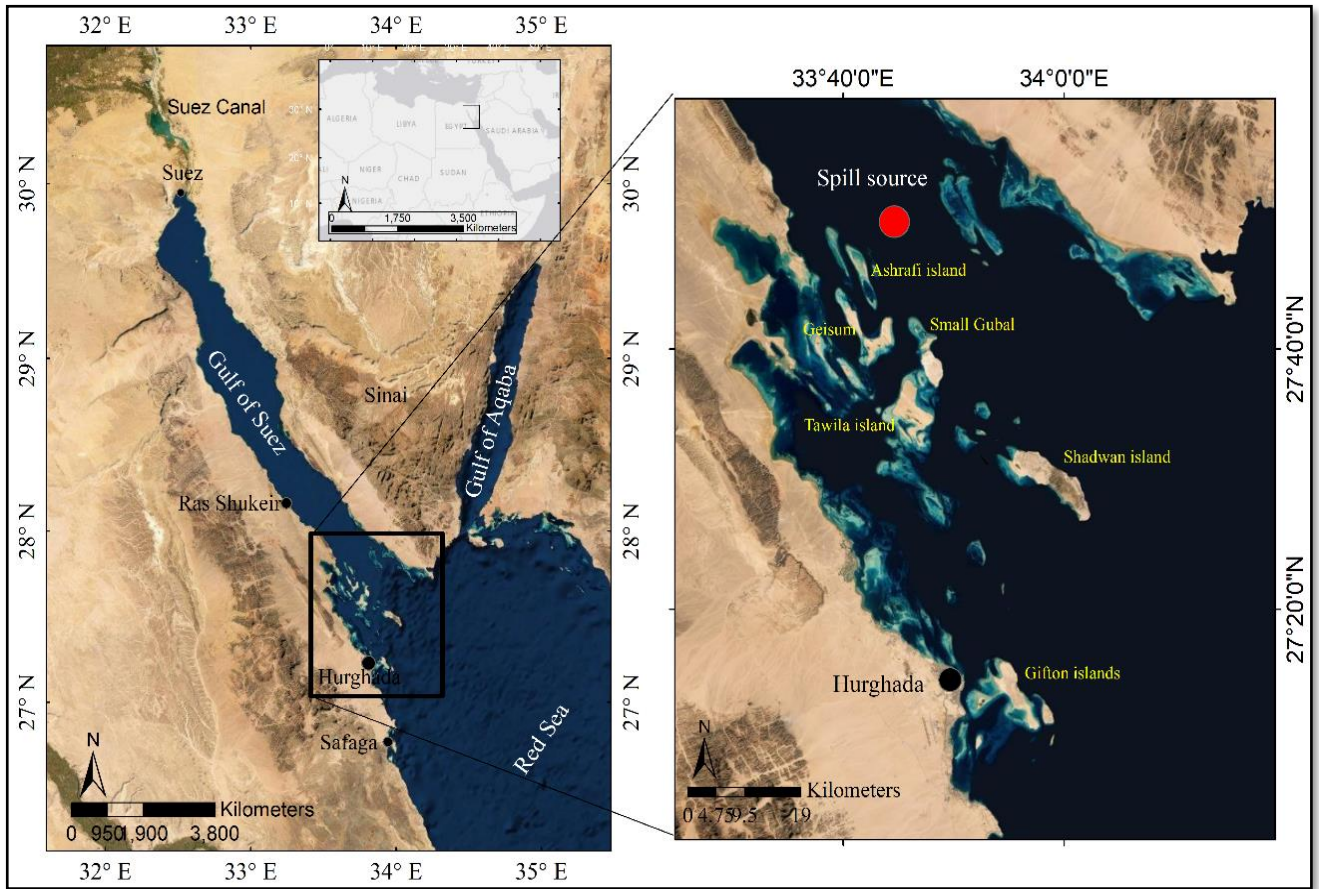


Figure 3.1 General map of Egypt's Red Sea showing Hurghada beaches, islands, and the source of the spilled oil symbolized by a red dot

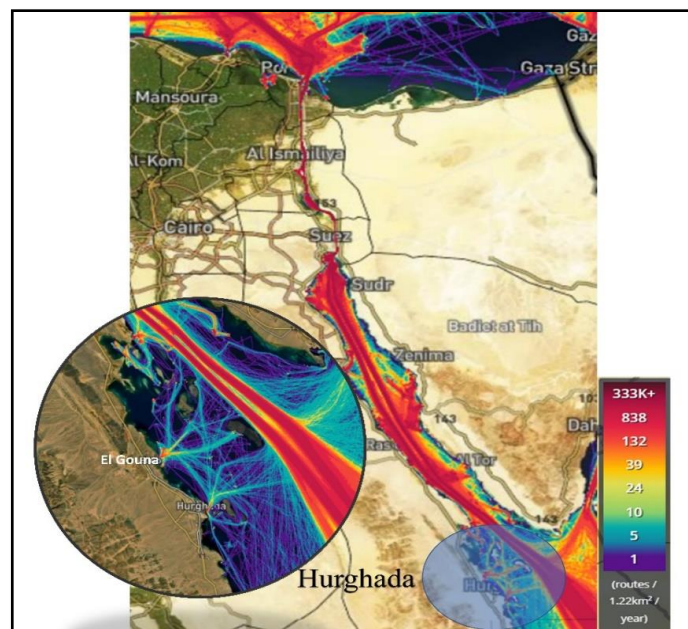


Figure 3.2 The ship traffic density between the Gulf of Suez and the Mediterranean Sea through the Suez Canal. The circle depicts the ship's activity off the coast of Hurghada [201]

3.2. Model formulation and assumptions

In this Case study, we simulate a possible instantaneous oil spill from a tanker incident at the strait of Gubal (27°48'55.10" N 33°44'11.85" E). As depicted in **Figure 3.1**, the oil spill source is located on the main shipping lane, approximately 50 km northern of Hurghada. Two scenarios were simulated in February and August 2021 for 108 h at a step of 0.25 hours. Using a computation step of 0.25 h improves the model's accuracy [23]. The coastline data for the simulation model extends from 30° E to 36° E and from 27° N to 31° N, covering the northern portion of the Red Sea. The seawater temperature used in this study was extracted from previous studies, which found that the average seawater temperature around the coastlines of Hurghada is 20.20 °C (68.36°F) in February and 29.20 °C (84.56 °F) in August [221,222].

The European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF) Reanalysis (ERA5) (<https://www.ecmwf.int/>) was used to extract hourly wind data as a Network Common Data Form (NetCDF) file format. The GNOME model suggested a wind factor between 1 and 4% as the default value and windage, which is the wind-driven movement of the oil, approximately 3% of the surface wind speed [10]. **Figure 3.3** shows wind data from 2011 to 2020 in Hurghada. The wind was moving mainly in the NW, N, and NNE directions, and the average wind speed reached 5.4 miles per hour. Sea currents data were gathered from the Operational Mercator global ocean analysis and forecast system (<https://doi.org/10.48670/moi-00016>) in a NetCDF format. It is an ocean-atmosphere data assimilation and prediction model that offers daily 1/12° three-dimensional global ocean predictions. The spill parameters provided for this study case are depicted in **Table 3-1**.

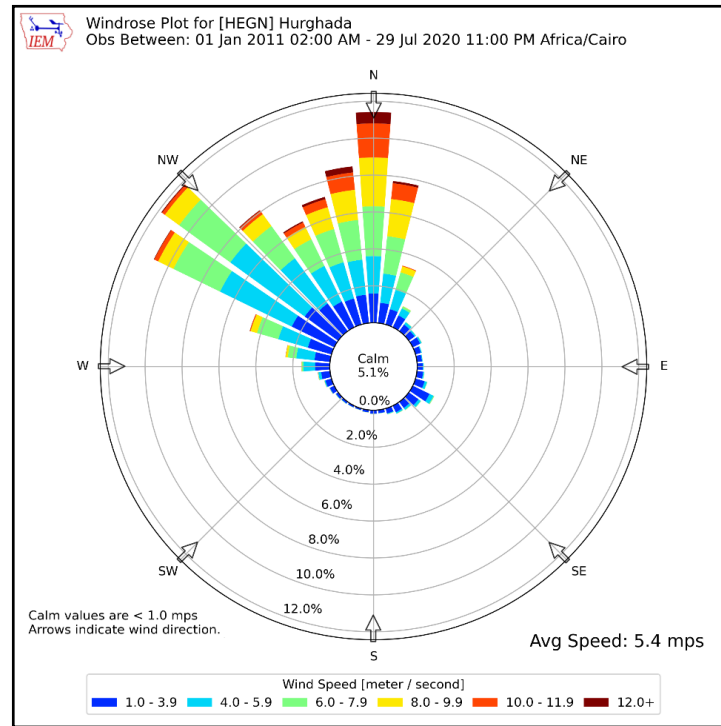


Figure 3.3 Wind rose diagram at Hurghada city from 2011 to 2020

Table 3-1 Oil spill parameters of the study case

Variables	Values
Spill location	27°48'55.10" N 33°44'11.85" E
Oil released	1000 metric tons (mt.)
Release type	Instantaneous
Oil type	Arabian light crude oil
Start time	Scenario 1: 09-02-2021 /12 PM Scenario 2: 09-08-2021 /12 PM
Seawater temperature	Scenario 1: 20.20 °C Scenario 2: 29.20 °C
Duration	108 h
Timestep	0.25 h
Number of oil particles	1000
Along-current uncertainty	10%
Cross-current uncertainty	10%

3.3. Results

3.3.1. Scenario #1 trajectory and weathering

In this scenario, we assumed that a tanker accident had leaked 1,000 metric tons of Arabian crude oil near the strait of Gubal. The model started at 12:00 pm on February 09, 2021, and lasted 108 hours to 12:00 am on February 14, 2021. The spill is shown as a collection of black and red dots. The black dots show the best-guess solution, assuming there is no certainty about the input parameters. The red dots, in contrast, represent the minimum regret solution that accounts for wind and wave uncertainty. In **Figure 3.4**, maps depicting the results of spill movement simulations at 12-hour intervals.

When the simulation began, the oil slick moved southeast with black and red dots. Forty-two hours after the simulation began at 6:00 pm on February 11, less than one ton of the spilled oil reached Small Jubal Island ($33^{\circ}47'51.05''\text{E } 27^{\circ}40'45.01''\text{N}$), which is about 16 kilometers south of the main spill location. Then, the oil traveled a distance of 20 kilometers from Small Jubal Island to Shadwan Island, about 36 kilometers from the spill source, in approximately 72 hours at 12:00 pm on February 13. During the following 30 hours until the simulation ended, a total of 434 mt of oil accumulated on the eastern shore of Shadwan Island, covering the whole eastern shoreline of the island about 17 kilometers from $33^{\circ}55'26.39''\text{E } 27^{\circ}31'40.06''\text{N}$ to $34^{\circ} 2'23.23''\text{E } 27^{\circ}27'27.37''\text{N}$. After 108 hours, the simulation duration, a substantial quantity of oil, about 276 mt, was still floating in the sea and flowing toward south Hurghada city at the western shore of the Red Sea.

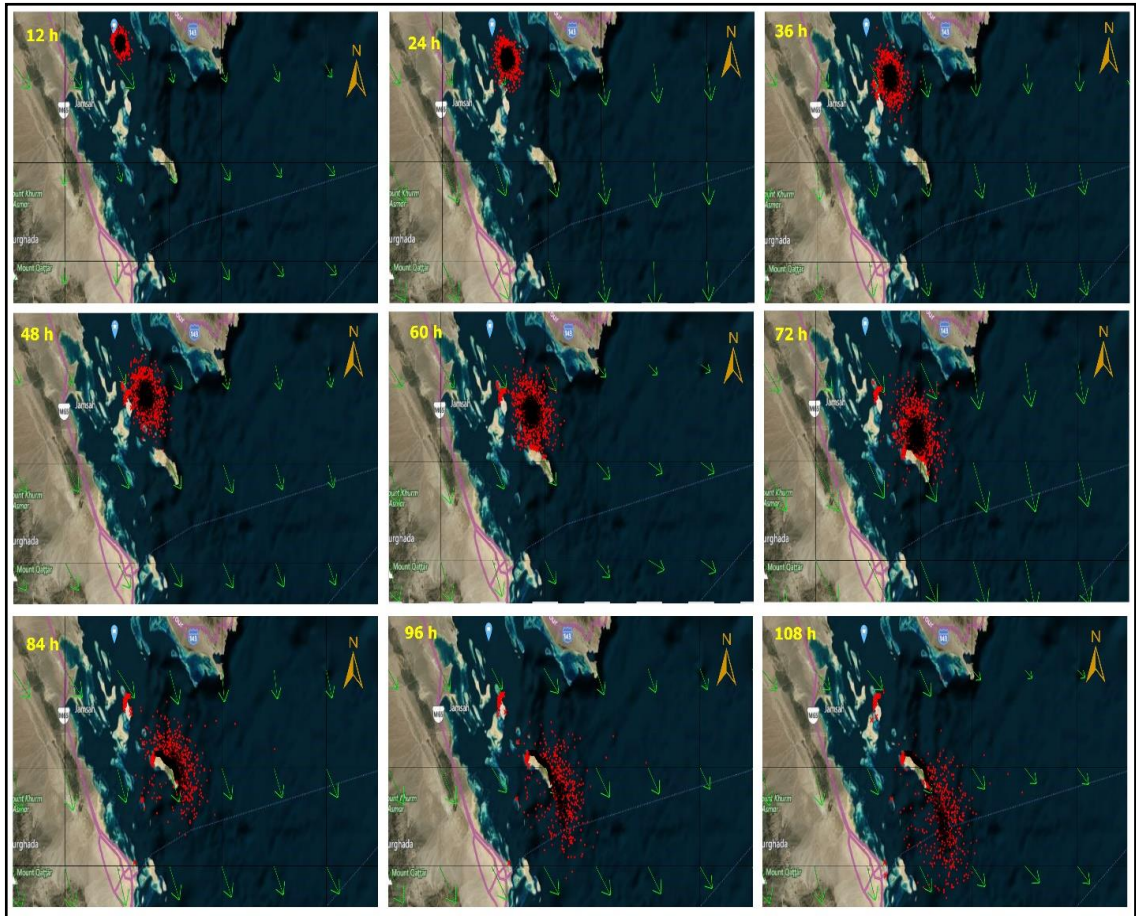


Figure 3.4 Scenario #1 trajectory modeling, the green arrows represent the wind direction, and the big blue dot represents the spill location.

Weathering processes (evaporation, natural dispersion, and emulsification) occur at varying rates following oil spills. The evaporation process began shortly after the oil was spilled into the water. Around 54 mt (5.4%) of oil evaporated in the first hour, and the evaporation rate continued to increase until approximately 277 mt (27.7%) after 108 h. Natural dispersion, on the other hand, began six hours after the spilling incident and reached 12.6 mt at the end of the scenario (**Figure 3.5**) (**Table 3-2**). As shown in **Figure 3.6**, in the first hour of the oil spill into the sea, the emulsion's water content increased rapidly and reached 90% after two days. This proportion persisted until the end of the simulation. The surface volume, including the emulsion, decreased during the first six hours from 1000 metric tons to less than 800 metric tons; after that, it increased until it reached more than 1350 metric tons on February 13, and then it began to decrease again until approximately 425 metric tons after 108 h.

Table 3-2 Scenario #1 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	dispersion	Beached	Floating
1	54.3	0	0	946
2	168	0.01	0	832
3	222	0.03	0	778
4	240	0.11	0	760
5	243	0.3	0	756
6	246	0.68	0	754
9	251	3.9	0	745
12	255	8.75	0	736
15	257	11.3	0	731
18	258	12	0	729
21	260	12.3	0	728
24	261	12.4	0	726
30	262	12.6	0	724
36	264	12.6	0	723
42	265	12.6	0.72	721
48	266	12.6	0	721
60	268	12.6	0	719
72	271	12.6	16.5	699
84	274	12.6	431	282
96	275	12.6	461	251
108	277	12.6	434	276

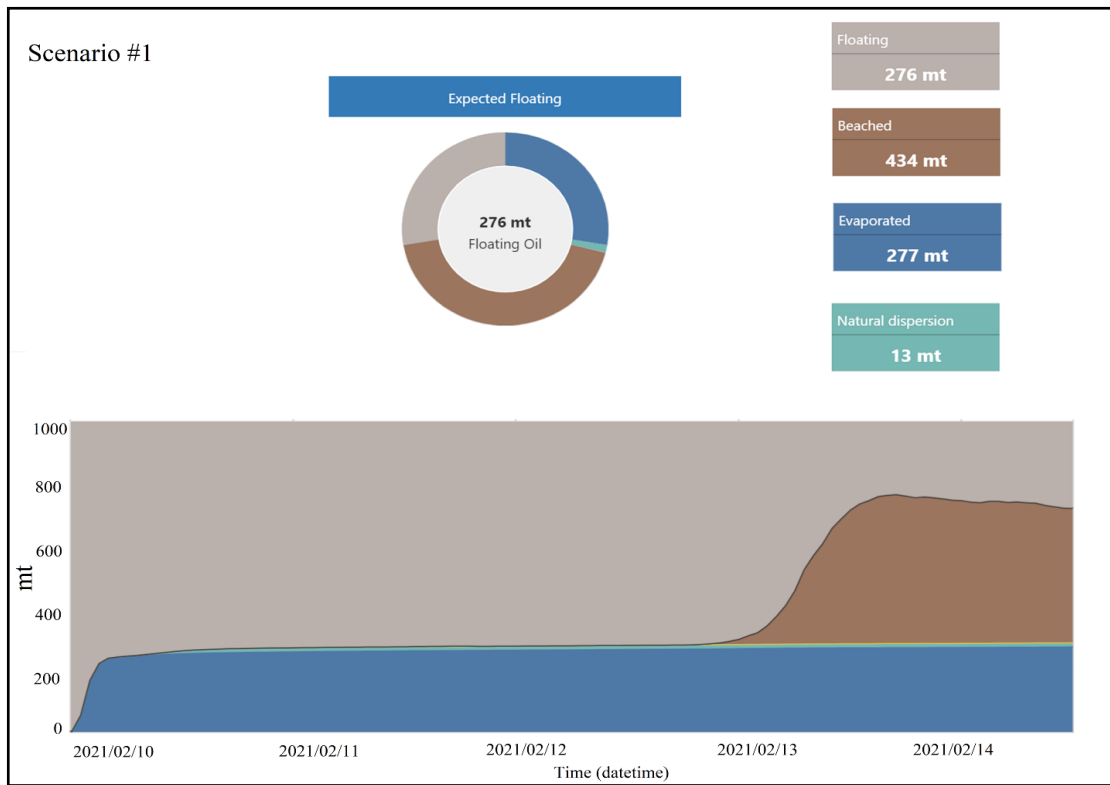


Figure 3.5 Arabian light crude oil budget in Scenario #1

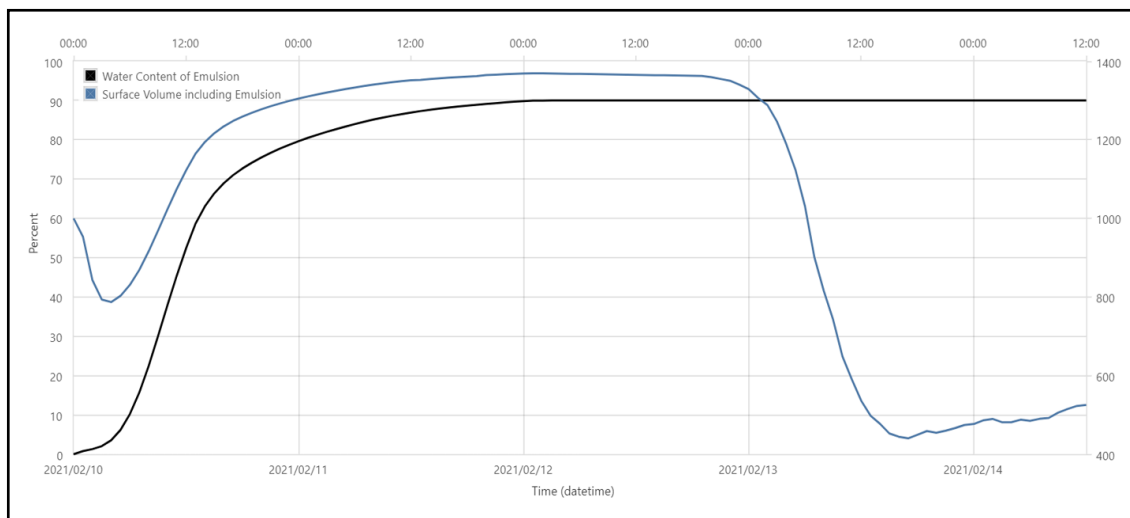


Figure 3.6 Emulsification rate of Scenario #1

3.3.2. Scenario #2 trajectory and weathering

Wind and marine current data for August 2021 were used in Scenario #2. The oil type, amount, and source are the same as in Scenario #1. The scenario began at 12:00 pm on August

09, 2021, and lasted 108 hours until 12:00 am on August 14, 2021. The floating oil initially drifted in the South-Southwest SSW direction, and about three metric tons reached Ashrafi Island ($33^{\circ}41'58.61''\text{E } 27^{\circ}46'19.62''\text{N}$), 6 kilometers from the initial spill location in 21 hours at 9:00 pm. After that, the oil particles drifted southward and accumulated on The Small Gubal, Geisum, and Tawila islands (**Figure 3.7**). In the next 87 hours until the end of the simulation, about 610 metric tons of oil flowed onto these islands. At the end of the simulation, around 96 metric tons of oil remained afloat in a south-southwesterly trajectory, moving toward Giftun Island and the beaches of Hurghada.

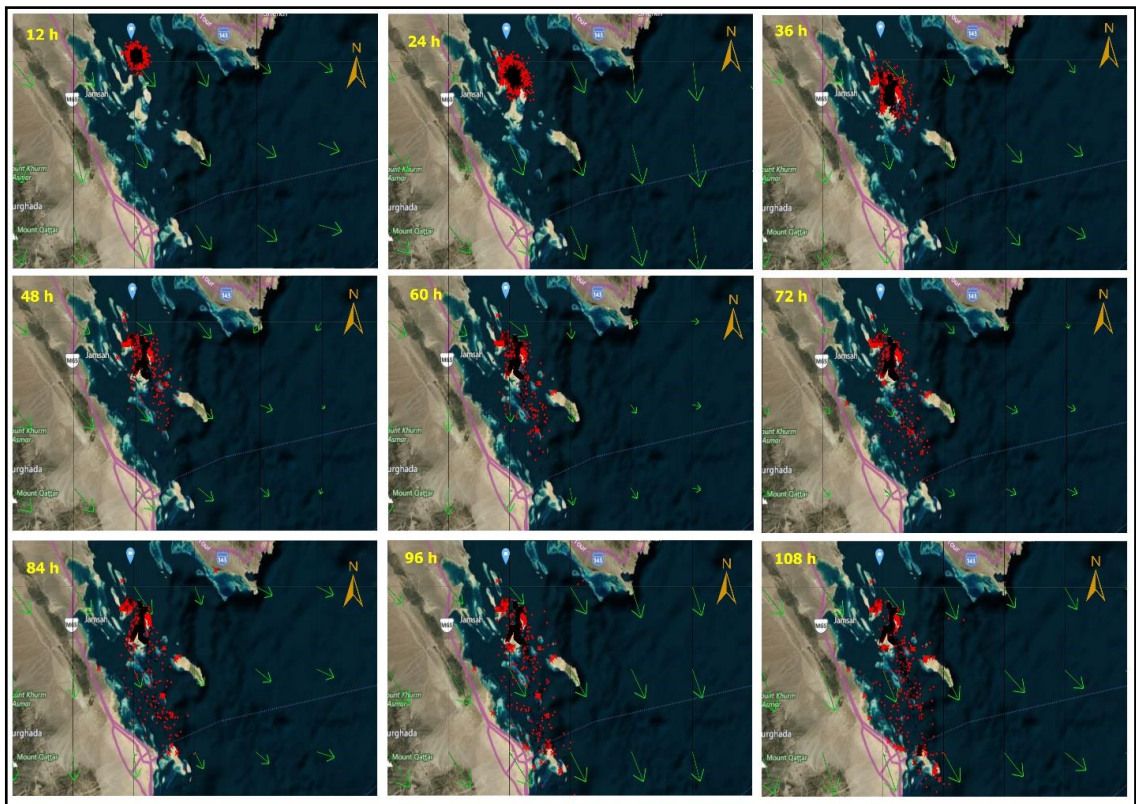


Figure 3.7 Scenario #2 trajectory modeling, the green arrows represent the wind direction, and the big blue dot represents the spill location.

As shown in **Table 3-3**, evaporation began immediately after the oil was spilled into the seawater. In the first hour of the spill, almost 100 mt (10%) of oil evaporated, and this rate doubled in the second hour. After that, the evaporation rate gradually increased until it reached 280 mt (28%) at 12:00 am on August 14, 2021. On the contrary, the natural dispersion rate was slow, starting with the first hour of the spill occurrence and reaching around 12.9 mt at the end of the simulation. **Figure 3.9** shows the emulsification rate during 10–24 August 2021.

It was observed that, in the first hour of the oil spill into the sea, the emulsion's water content increased gradually and reached 90% after 36 h, and this proportion persisted until the end of the simulation. The surface volume, including the emulsion, grew to more than 1300 on February 13, then decreased again until approximately 225 at the end of the scenario.

Table 3-3 Scenario #2 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	dispersion	Beached	Floating
1	101	0.36	0	899
2	222	2.09	0	776
3	242	3.58	0	755
4	245	4.97	0	750
5	248	6.27	0	746
6	250	7.47	0	742
9	255	10.3	0	735
12	258	12	0	729
15	260	12.6	0	726
18	262	12.7	0	725
21	264	12.8	2.89	720
24	265	12.8	52	670
30	267	12.8	212	507
36	269	12.8	401	317
42	270	12.9	578	139
48	270	12.9	618	98.3
60	272	12.9	643	71.4
72	274	12.9	596	117
84	276	12.9	623	87.4
96	278	12.9	613	96.1
108	280	12.9	610	96.5

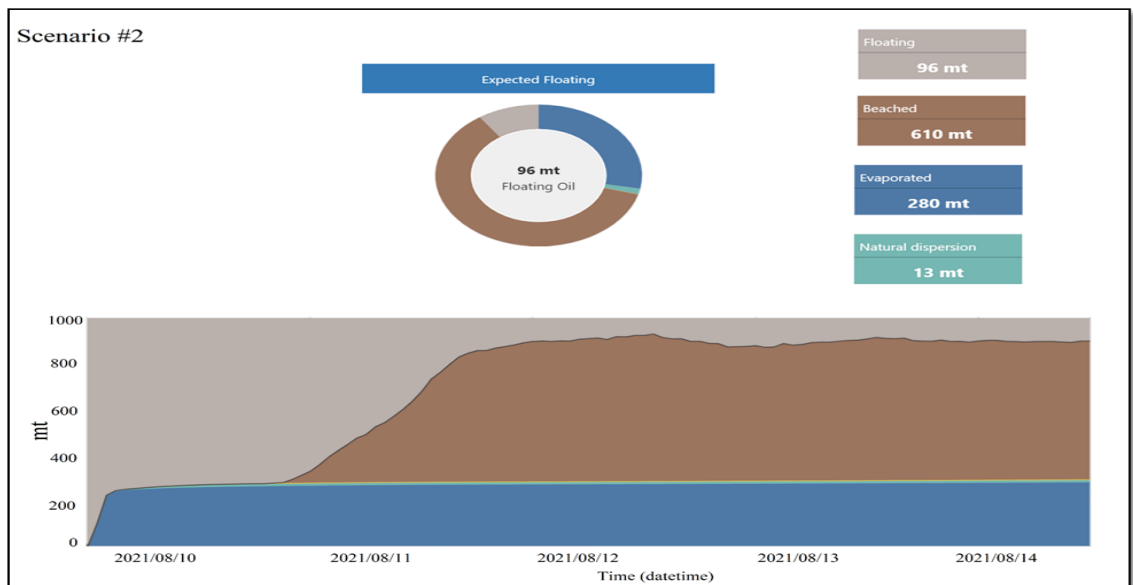


Figure 3.8 Arabian light crude oil budget in Scenario #2

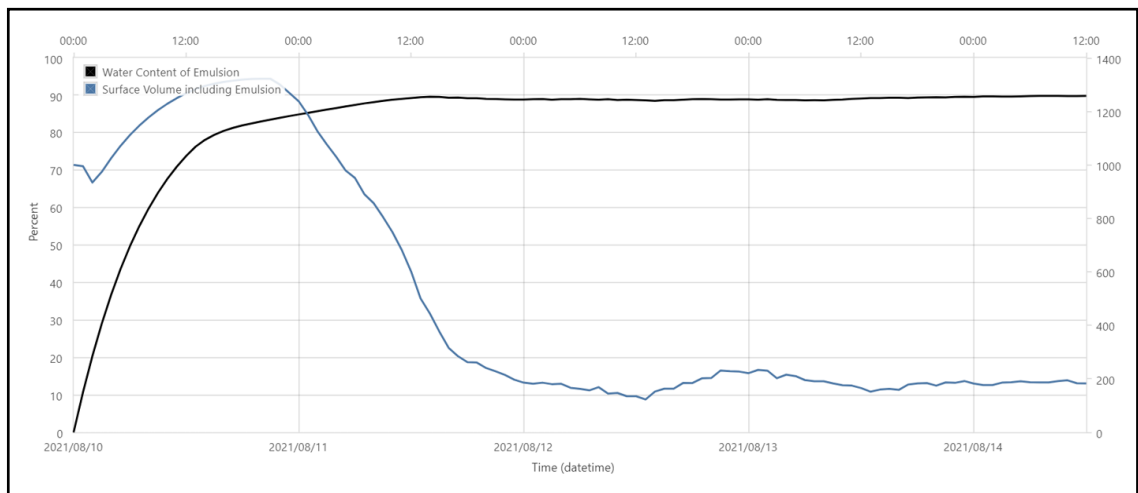


Figure 3.9 Emulsification rate of Scenario #2

3.4. Discussion

Oil spills into the seawater may have catastrophic effects on the marine ecosystem. It may take decades for the ecosystem to recover, and it will never be able to return to its original condition [223]. Globally, oil spill models have been used extensively to predict the fate and transport of oil spills. The results can serve as the foundation for assessing the environmental, economic, and health implications [224]. This study aims to identify the probable sites an oil spill would impact by simulating two scenarios resulting from a tanker accident off Hurghada.

The GNOME model's trajectory maps revealed that the oil spilled in Scenario #2 traveled in a southwesterly direction and took 21 hours to reach Ashrafi Island and after that to Small Gubal, Geisum, and Tawila islands, which is half the time it took in Scenario #1 moving in a southeast direction to reach the Small Gubal Island and then to Shadwan Island. This result may be explained by the fact that the prevailing wind direction in Scenario #2, which occurred in August, was northeast (NE), pushing oil toward Ashrafi Island. In contrast, the first scenario occurred in August; hence the predominant northwest winds (NW) this month caused the oil leak to move toward Small Gubal Island. Therefore, the wind speed and direction greatly influence the direction of the spilled oil in the region. This explanation is compatible with Eladawy et al. [193] data, which indicate that the predominant wind in the Gulf of Suez is the NW surface wind during winter, and according to Hussein [61], the other dominant wind in summer is the Northeast wind (NE).

The trajectory maps of the oil spilled in both scenarios show the movement of oil in general in the southern direction, which is the same direction as the movement of the sea currents in the Gulf of Suez [225]. Therefore, the winds and ocean currents affected the oil's trajectory. Numerous global studies have shown that wind and sea currents significantly affect the movement and direction of oil spilled into the marine environment [10,156,158,226,227]. The results highlight that, although the two scenarios were at different times (February and August), the spilled oil threatened the islands at the entrance of the Gulf of Suez. These islands are of enormous economic and strategic significance and have been declared a protected area by Egypt's Ministry of the Environment by Law 102/1983. (nature conservation sector) [228]. Therefore, this study warns that future leaks will harm these islands.

Immediately following an oil spill, weathering processes change the spilled oil into new compounds with distinct physical and chemical properties. The first process of oil weathering that happens is evaporation. During this process, most of the oil's volatile parts are removed within hours of a spill [16,74]. In this study, the results show that in the initial hours of the simulation, the percentage of evaporated oil in Scenario #2 was twice as high as in Scenario #1 because Scenario #2 occurred in August, and the temperature was higher than in February for Scenario #1. According to Omar et al. [65], high temperature tends to increase the

evaporation rate and the proportion of oil lost. Although the evaporation rate was expected to be significantly higher in Scenario #2 (August) than in Scenario #1 (February), at the end of the simulation, the percentage of oil evaporated in both scenarios was close (27.7% and 28%). It may be because the quantity of the oil that reached the islands in Scenario #2 was large (610 mt), and only a minimal amount of oil remained floating (96 mt) exposed to evaporation. While in Scenario #1, a large amount of oil remained floating in the water (276 mt) and was prone to evaporation. This explanation is compatible with Toz et al. [177] who concluded that the behavior of the oil spilt into seawater depends upon many factors, one of them is whether the oil remains at sea or is washed ashore.

Natural dispersion is the breakup of oil slicks by waves, currents, and wind energy, into microscopic, neutrally buoyant droplets and the distribution of these through the water column [105]. The results reveal that, although Scenario #1's natural dispersion process began after six hours of simulation, while Scenario #2's started in the first hour, the natural dispersion rate was low for both scenarios. Furthermore, the naturally dispersed oil quantity was 13 mt (1.3%) at the end of the simulation in both cases. These results are less than those of Nasr and Smith [62], who found that the rate of natural dispersion of the same oil was 8%. This divergence is due to their employment of a different mathematical model (SL Ross model).

Emulsification is a process that forms a liquid, known as an emulsion, containing tiny droplets of fat or oil suspended in a fluid, usually water [229,230]. The results demonstrated that in both scenarios, the percentage of water in the emulsion rose as soon as the oil entered the water within the first hour of the spill, reaching 90% by the end of the simulation. Furthermore, the surface volume, including the emulsion, increased with time until the beaching process started and decreased after the oil reached the shore. By the end of the simulation, the surface, including the emulsion, was twice as large in Scenario #1 as in Scenario #2 since the quantity of oil floating in Scenario #1 was more than in Scenario #2. The emulsification process increases the viscosity of the slick and its volume, making it difficult to remove, and induces the formation of mousse and tar balls, thus making cleaning difficult [223,231]. Therefore, The results of weathering processes for oil spills in the marine

environment are essential for response team members to establish the optimal method for oil removal and mitigation [7,66,232].

3.5. Summary

The GNOME and ADIOS2 models were utilized to simulate two potential oil spill scenarios in February and August 2021 due to a tanker incident in the Gubal Strait, approximately 50 km northern of Hurghada, to determine the probably affected regions, estimate when the oil would reach the shoreline, and compute the oil's weathering processes (evaporation, natural dispersion, and emulsification). The results highlighted that wind and sea currents significantly affect the movement and direction of oil spilled into the marine environment. The oil spill in Scenario #2 (August) moved southwesterly under the influence of northeast NE winds and arrived after 21 hours at Ashrafi Island and then at Jubal, Geisum, and Tawila Islands. While in Scenario #1 (February), the oil moved in the southeast direction under the influence of northwest NW winds, and it took 42 hours to reach Small Jubal Island and then Shadwan Island. Therefore, any oil seepage in this region, the northern Red Sea islands, which are of enormous strategic and economic importance, would be the most susceptible to contamination.

The results of modeling the spilled oil weathering processes show that about 27% of the Arabian Light oil had evaporated, and the natural dispersion rate was modest, about 1.3% in both scenarios at the end of the simulation. Furthermore, the amount of water in the emulsion rose as soon as the oil was introduced to the water, reaching 90% after 108 h. As a result, the oil's surface volume, including emulsion, grew until beaching began, then declined. This study's findings can serve as a reference for establishing an effective emergency plan to mitigate the impacts of future oil spill incidents in the strait of Gubal. The limitation of this study is that the current model version lacks a module for anticipating the slick's breakup owing to waves that may influence its lateral movement. However, the predicted overall trajectory of the leak should be sufficient to deploy emergency reaction measures immediately. Consequently, more research using various spill models should be done to compare the oil trajectories after a spill incident off Hurghada.

Chapter 4. Simulation of oil spill movement and fate off Ain Sukhna port

4.1. Research region

Ain Sukhna port is situated in Ain Sukhna city, a region of the Suez Governorate of Egypt. A major international gateway port for Egypt, the Persian Gulf, and Asia, Ain Sukhna Port is located on the western coast of the Gulf of Suez, 43 km south of the city of Suez (**Figure 4.1**). Covering an area of 22.3 km², it has a depth of 18 m. Due to abundant surrounding land, the port is fast becoming a major industrial hub serving international and domestic markets [233]. Ain Sukhna port can accommodate tankers up to 500,000 Deadweight tonnage (DWT) and handles over 80% of the oil exported from the Arabian Gulf to Europe, subsequently pumped from the storage tanks via a pair of 42-inch pipelines connecting the GOS to the Mediterranean [61]. The area with the highest risk of tanker accidents is the traffic intersection offshore the Sumed oil pipeline terminal near Ain Sukhna port.

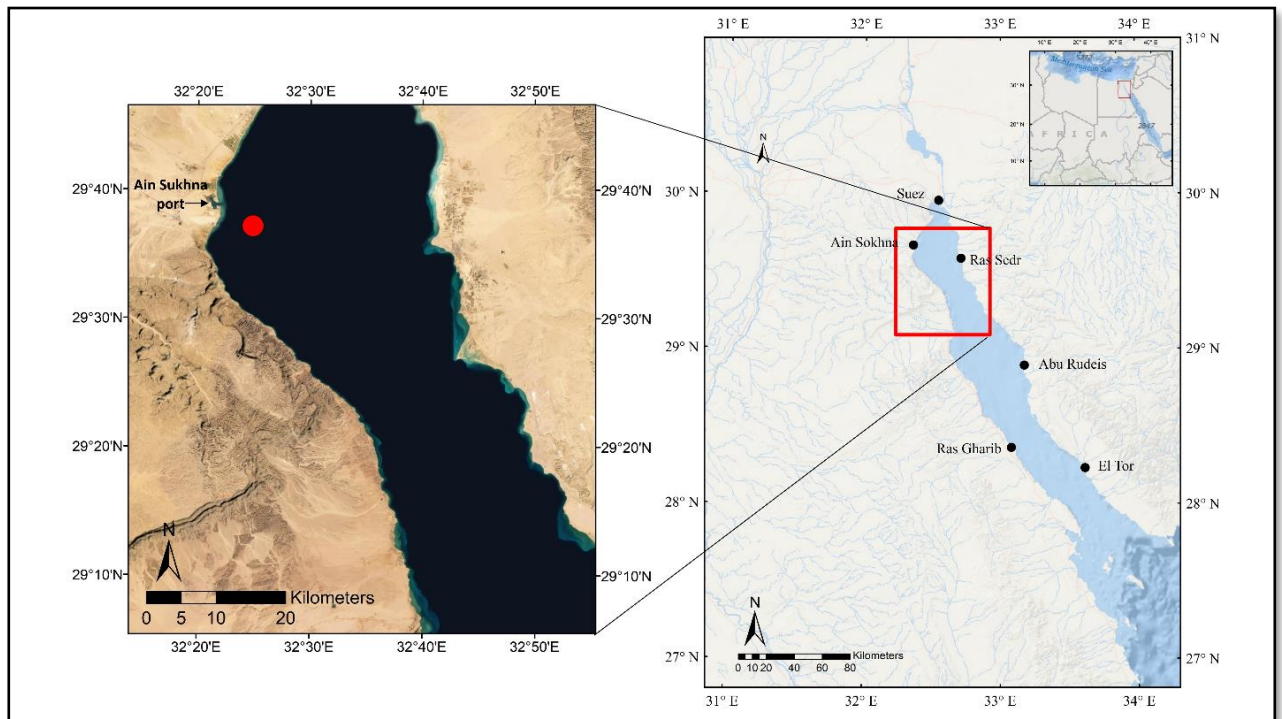


Figure 4.1 Gulf of Suez map showing the hypothetical oil spill location as a big red dot off Ain Sukhna port

4.2. Model formulation and assumptions

We considered a hypothetical oil spill caused by a tanker accident about 5 kilometers from the Ain Sukhna port, as shown in **Figure 4.1**. One thousand metric tons of Arabian light crude oil is estimated to have spilled on 10.02.2020 and 08.07.2020 at 12.00 am. The GNOME and ADIOS2 models are used to simulate the trajectory and behavior of the spill. As previously stated, the GNOME and ADIOS2 input data sets contain coastline data, wind data, sea currents data, oil spill location, oil type, oil amount, and seawater temperature. Coastline data was extracted from the GSHHS database by the GOODS server. Wind data was downloaded from the ECMWF Reanalysis ERA5, while sea currents data was from the GLO-CPL model. Wind data for the study area from 2015 to 2020 is shown in **Figure 4.2**. The wind is shown to move mostly in SW-SE directions. The maximum wind speed over the stated period reached 12 m/s.

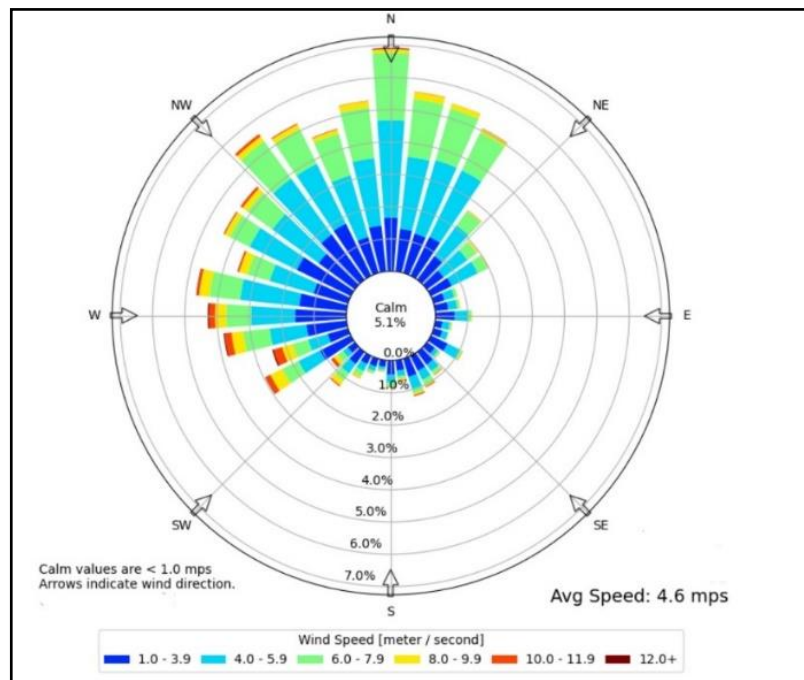


Figure 4.2 Wind rose diagram in the study area from 2015 to 2020

The temperature of seawater reported in previous studies is 18.7 °C in winter and 29.75 °C in summer [234]. The simulation period was 72 h at a step of 0.25 h. The models provide georeferenced trajectory output that can be used as an input to Geographic Information System (GIS) tools [47]. The along-current uncertainty and cross-current uncertainty values for the

sea currents data were adjusted to 10% to accommodate probable currents value uncertainties. According to Zelenke et al. [23], along-current uncertainty is the uncertainty in the forward and backward currents values. In contrast, cross-current uncertainty refers to the left and right direction uncertainty. The spill parameters provided for this study case are depicted in **Table 4-1**.

Table 4-1 Oil spill parameters of Case study 2

Variables	Values
Spill location	29.618 N – 32.415 E
Oil released	1000 metric tons (mt.)
Release type	Instantaneous
Oil type	Arabian light crude oil
Start time	Scenario #1: 07-02-2020 /12 PM Scenario #2: 09-07-2020 /12 PM
Seawater temperature	Scenario 1: 18.7 °C Scenario 2: 29.75 °C
Duration	72 h
Timestep	0.25 h
Number of oil particles	1000
Along-current uncertainty	10%
Cross-current uncertainty	10%

4.3. Results

4.3.1. Scenario #1 trajectory and weathering

Wind and sea current data from February 2020 were used for Scenario #1. The model simulation started at 12 pm on August 7th, 2020, and the run duration was 72 h. A tanker accident is thought to have leaked 1,000 metric tons of Arabian crude oil at the spill site. The spill is represented in terms of points, which are either black or red. The black dots represent the best-guess solution, supposing that input parameters are without uncertainties. In contrast, the red dots reflect a minimum regret solution that accounts for wind and wave uncertainty.

The results of the GNOME model are displayed in **Figure 4.3**, as maps for every 12 h. As the simulation started, oil particles drifted in a southeast direction (SE), parallel to the west

coast of the GOS. After 42 hours, at 6:00 pm, on February 9th, 2020, the oil beached at Ras Abu Darag, 22.7 km from the spill location. Approximately 29.7 mt of the spilled oil settled on the shoreline over the next 18 hours, covering approximately 14.2 km of the western shoreline (32°29'58.40"E 29°25'45.86"N to 32°35'38.68"E 29°20'27.67"N). At the same time, the rest of the oil (709 mt.) floated southeastward until the simulation ended.

Weathering processes occur following oil spills at varying rates (**Table 4-2**). In this scenario, the evaporation rate rose with time, reaching 25.4% (254 mt) after three days of spilling (**Figure 4.5**). Emulsion water content followed the same evaporation pattern and reached approximately 90% at the end of the simulation (**Figure 4.6**). In contrast, the rate of natural dispersion was gradual, began after an hour of the spill, and reached 0.7% after 72 hours (**Figure 4.7**).

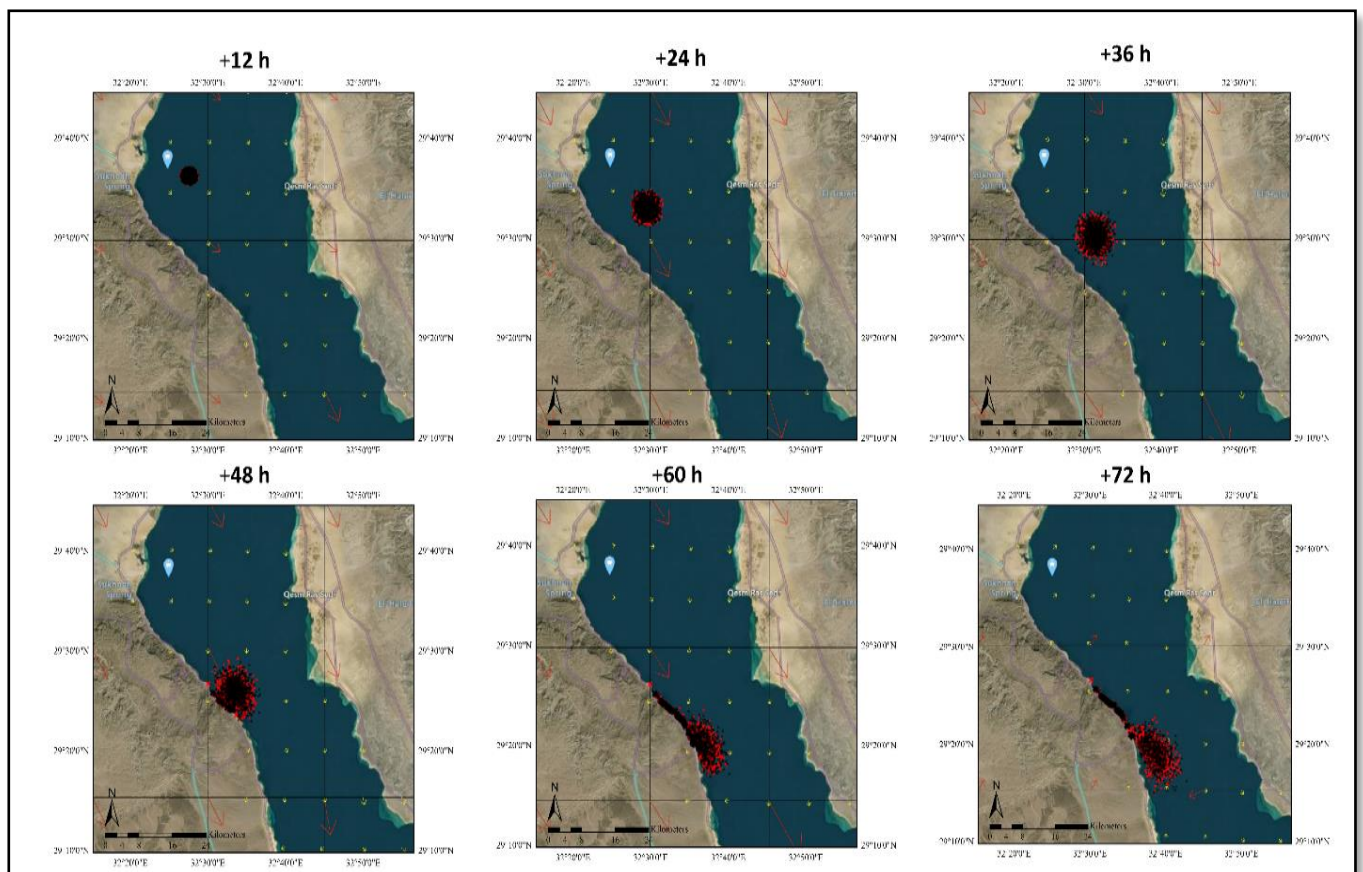


Figure 4.3 Oil-spill trajectory maps for Scenario #1, the long red arrows represent wind speed and direction, and the short yellow arrows represent surface current.

Table 4-2 Scenario #1 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	Natural dispersion	Beached	Floating
1	88.4	1.19	0	910
2	153	2.69	0	844
3	191	3.6	0	805
4	212	4.19	0	783
5	224	4.6	0	771
6	231	4.89	0	764
9	239	5.4	0	755
12	242	5.61	0	752
15	244	5.76	0	751
18	245	5.99	0	749
21	246	6.34	0	747
24	247	6.75	0	746
30	249	7	0	744
36	249	7.01	0	743
42	250	7.01	4.46	738
48	251	7.01	24.5	717
60	253	7.02	46	694
72	254	7.02	29.7	709

4.3.2. Scenario #2

July 2020 wind and sea currents data were used for Scenario 2. The source of the spill, type of oil, and amount are kept similar to Scenario #1. The start time of the model was set at

12 pm on July 9th and continued for three consecutive days. As shown in **Figure 4.4**, the spill moved southwest (SW) towards the western shores of the GOS. The oil particles took 21 hours to reach the beach at around 09:00 pm and traveled a distance of 10.5 km from the spill location. As shown in **Table 4-3**, the oil spill behavior and fate results with time. At the end of the simulation, about 705 mt of oil particles had accumulated along the western shore. The whole oil is beached with no floating oil in the water, spanning a distance of ten kilometers from 32°23'32.71"E 29°31'11.17"N to 32°28'44.56"E 29°26'52.81"N. The evaporation process started immediately after the oil leak, and within 72 hours, around 28.6% (268 mt) of the total oil spill had evaporated (**Figure 4.5**). As the oil drifted, the emulsion water content reached approximately 76.4% (**Figure 4.6**). The natural dispersion process began after 3 hours and was 0.8% (8.2 mt) at the simulation's end (**Figure 4.7**).

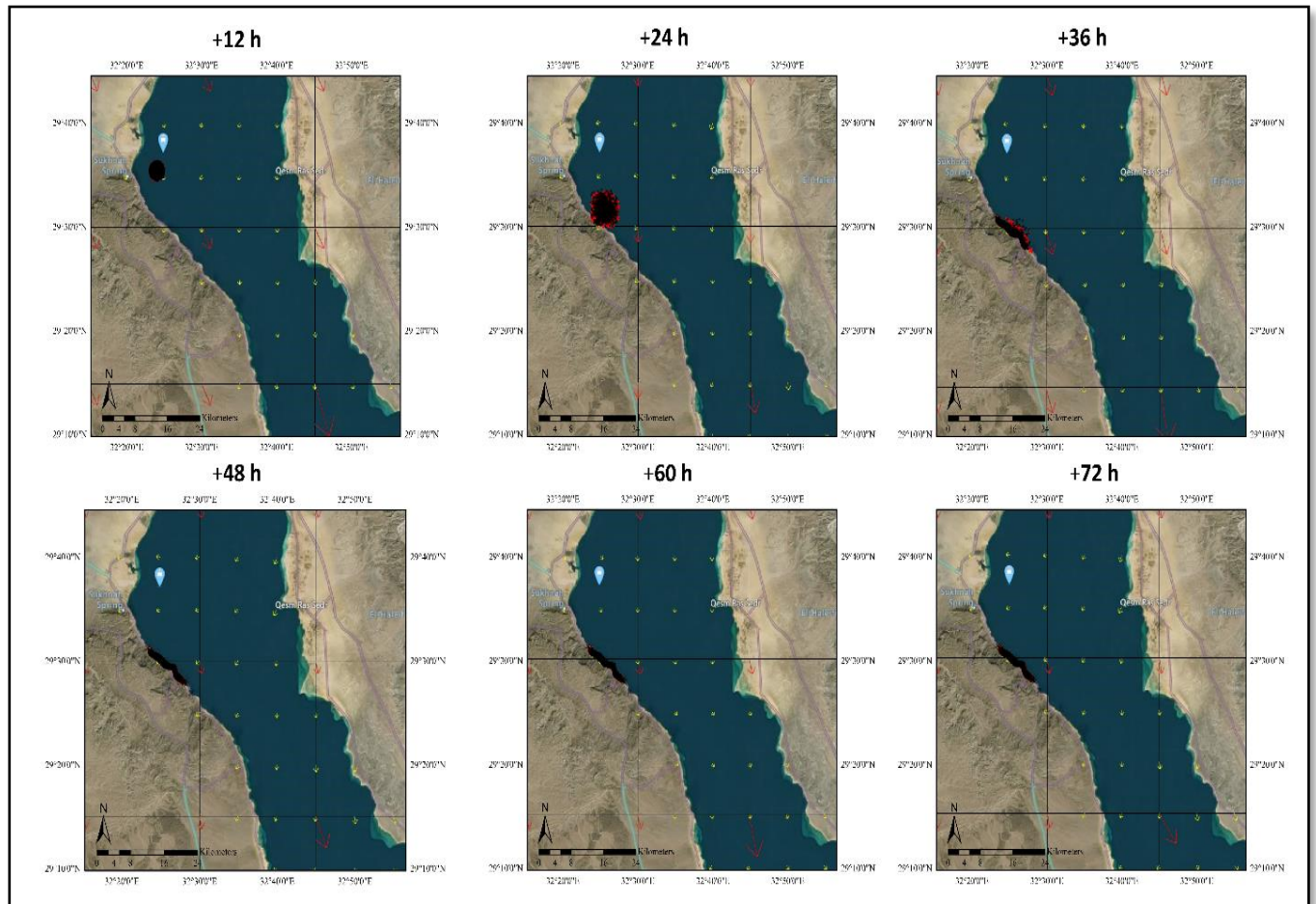
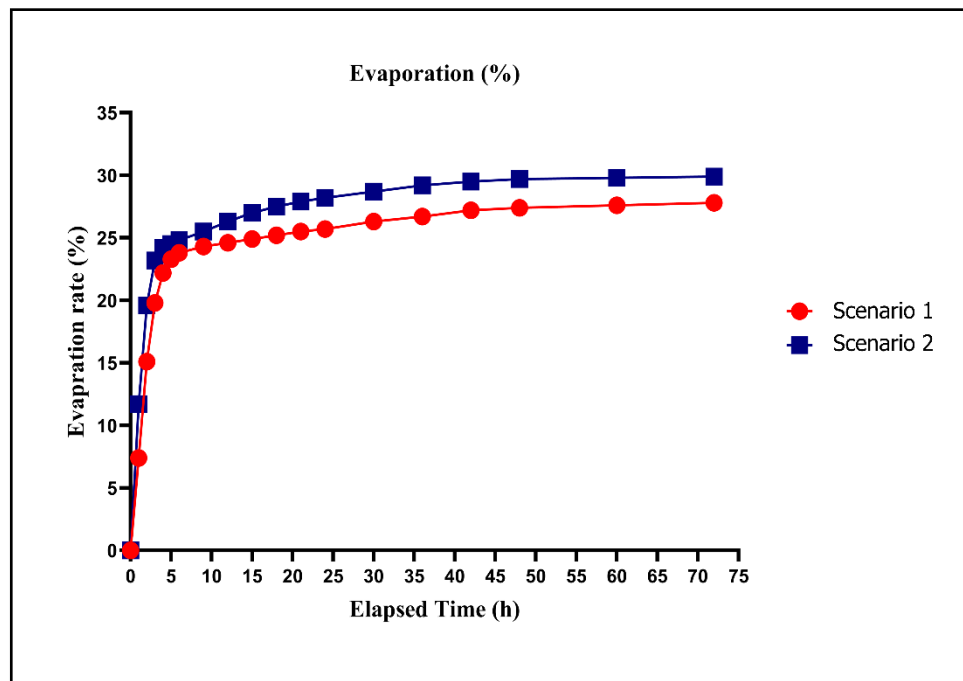


Figure 4.4 Oil-spill trajectory maps for Scenario #2, the long red arrows represent wind speed and direction, and the short yellow arrows represent surface current.

Table 4-3 Scenario #2 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	Natural dispersion	Beached	Floating
1	81.8	0.03	0	918
2	200	0.21	0	800
3	236	0.42	0	764
4	244	0.7	0	756
5	247	1.06	0	752
6	249	1.52	0	749
9	256	3.06	0	741
12	261	4.25	0	735
15	266	5.45	0	729
18	270	6.77	0	723
21	273	7.54	2.16	717
24	275	7.7	13.6	703
30	280	7.86	182	530
36	282	8.02	527	183
42	283	8.08	679	29.3
48	284	8.09	690	18.3
60	285	8.14	673	33.6
72	286	8.2	705	0

**Figure 4.5** Evaporation rate (%)

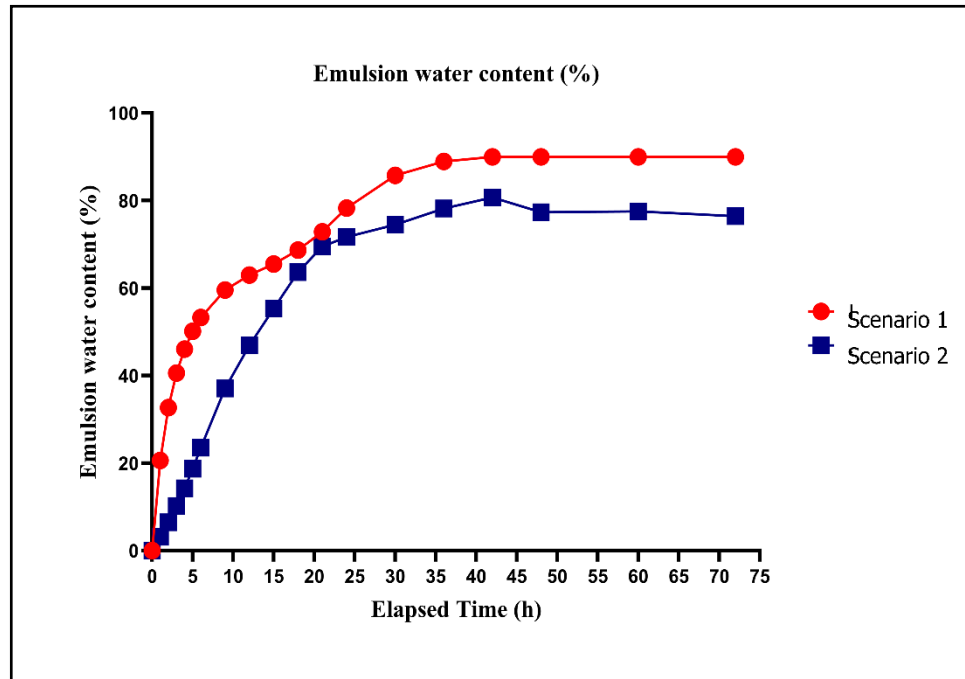


Figure 4.6 Emulsion water content (%)

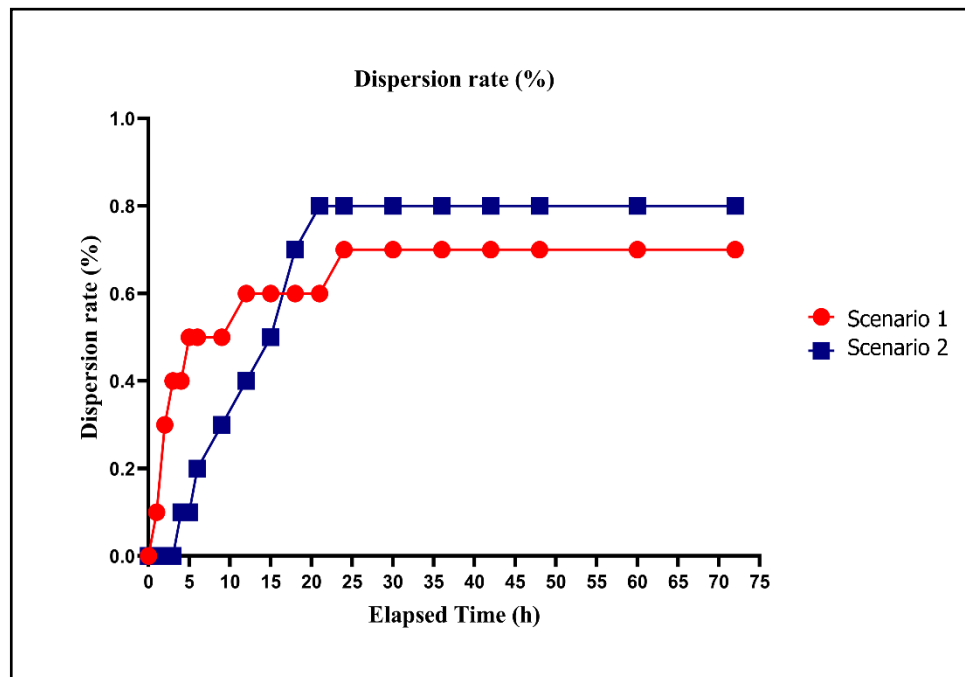


Figure 4.7 Dispersion rate (%)

4.4. Discussion

This study simulates two possible oil leak scenarios induced by a tanker accident off the Ain Sukhna port on the western coast of the GOS. First, a GNOME trajectory model has been used to predict the oil slick's movement and the time to reach the beach. Additionally, the Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) has been used to determine how the oil breaks down naturally (through evaporation, emulsification, and spreading) as it moves.

The simulation maps show that in Scenario #2, oil particles traveled a short distance to the southwest and reached the beach in 21 hours. While in Scenario #1, oil particles traveled a long distance to the southeast before reaching the shoreline 42 hours later. A possible explanation for this might be that in Scenario #2, which occurred in July, the predominant wind is northeast (NE), pushing oil directly to the shore. On the contrary, Scenario #1 was in February, and the prevailing wind direction was north-west (NW), forcing the oil to move southeast parallel to the coast for a while before reaching it. This explanation is in line with the observations of Hussein [61], who demonstrated that the predominant wind in the northern portion of the GOS is the NW surface wind, which accounts for approximately 45 percent of the frequency. The other prominent wind is the NE, with monthly frequencies ranging from 28 to 1 percent. The current findings are consistent with Omar et al. [65], who simulated some expected oil spill scenarios from an oil drilling rig in the Gulf of Suez using the Canadian SL-Ross predictive mathematical oil spill model. When the prevailing wind was NW, all oil leak trajectories flowed toward the southeast and south-southeast. Therefore, if there is an oil leak off the coast of Ain Sukhna port and the wind is NE, response teams will have a limited time to manage the spill since these winds accelerate the movement of the oil to the western coast of the GOS.

Another possible explanation for the southward movement of the spilled oil in both scenarios is that it was affected by the prevailing southward direction of the sea currents. Frihy et al. [225] reported that sea currents in the GOS generally flow southward. Furthermore, Nasr and Smith [62] simulated a hypothetical spill at a point in the shipping lane in the Gulf of Suez and concluded that sea currents dictate the slick trajectory. The results highlight that in the

case of an oil leak from a source opposite the port of Ain Sukhna on the western side of the Gulf of Suez, the region south of Sukna port would be the most vulnerable to contamination. This area has various tourist resorts as well as coral reefs. Any subsequent leaks will significantly impact these resorts and the marine environment.

Following the oil spill, weathering processes occur at varying rates. Evaporation is the first weathering process that occurs after an oil spill. During this process, most volatile components of crude oil are removed within hours following the spill, which significantly impacts the density and viscosity of the oil slick [19]. As a result, determining the rate of evaporation is critical. The results show that significant amounts of oil were lost due to evaporation in both scenarios, which can be attributed to the fact that the Arabian Light crude has a higher percentage of light and soluble fractions than other types of oil [62]. Also, in July (Scenario #2), evaporation rates were more significant than in February (Scenario #1); this may be due to the high summer temperatures. These results are compatible with those of Fingas [143], who also reported that the rate of evaporation of spilled oil in the marine environment increases as temperature rises.

Emulsification is the process of incorporating water into the oil [19]. The negative impact of emulsification is an increase in the slick volume, which significantly raises the expense of cleaning. Consequently, emulsification is a process that plays a significant role in oil spill modeling [1]. In this study, the results demonstrated that in contrast to the evaporation rate, the emulsification rate of Scenario 1 was higher than that of Scenario #2. It might be because scenario #1 was in the winter when the turbulence at the water's surface was at its peak. These results support the findings of Bozkurtoğlu [235], who suggested that turbulence at the sea surface promotes emulsion. In both scenarios, it was shown that the evaporation and emulsification rates were very high.

Natural dispersion occurs when oil is broken up into little particles by the action of waves [41]. This process directly affects the increase in surface area, which accelerates biodegradation processes [52,236]. Surprisingly, the natural dispersion of the spilled oil was modest in both scenarios (0.7% and 0.8%). This finding contradicts those of Nasr and Smith [62], who modeled the natural dispersion of the same oil type by the SL Ross model and found

that about 8% of the oil dispersed after 10 h. This discrepancy may be due to their different oil spill model usage. The primary processes for removing oil from seawater are evaporation and natural dispersion, whereas emulsification causes its persistence and a rise in pollutant concentration [66,232]. Therefore, these results about the behavior of oil after a spill are crucial for spill responders.

4.5. Summary

We simulated a thousand metric tons of Arabian light crude oil spilled into seawater on a shipping route around 5 kilometers from the Ain Sukhna port in 2020. GNOME and ADIOS2 models were used to simulate two scenarios in order to predict the affected areas, calculate when the oil would reach the shoreline, and compute the weathering processes of the spilled oil (evaporation, emulsification, and dispersion). The study found that the direction of the wind and sea currents play an essential role in determining the spill trajectory movement. In Scenario #1, about 46 metric tons of oil spilled reached Ras Abu Darag, approximately 22.7 km away from the spill location, covering nearly 14.2 km of the western shoreline of the Gulf of Suez. While in Scenario #2, the spill moved to the southwest (SW), and after 21 hours, roughly 705 mt of oil particles covered a distance of 10 km along the western coast, approximately 10.5 km from the spill location. In Scenario #2, the oil reaches the shore faster due to the influence of northeasterly winds. Therefore, if there is an oil leak off the coast of Ain Sukhna port and the dominant wind is NE, response teams will have a limited time to manage the spill. The results also demonstrate that the region south of Sukna port, which has many tourist resorts and various coral reefs, would be the most vulnerable to contamination. According to the ADIOS2 results, the rate of evaporation and emulsification was high, while the natural dispersion was modest in both scenarios. The findings reveal that the behavior of the spilled oil is influenced by the oil type and the environmental conditions (temperature and sea turbulence). The current study findings on oil spill behavior and trajectory maps may help organizations involved in response operations and decision-makers construct more effective contingency plans.

Chapter 5. Modeling the path and behavior of oil spill at the southern entrance of the Suez Canal

5.1. Research region

The Suez Canal is an artificial waterway of 193 km running from Port Said north to the Gulf of Suez south, thus connecting the Mediterranean and the Red Seas (**Figure 5.1**). It is one of the most vital and heavily used waterways globally; navigation started on the 17th of November, 1869 [196].

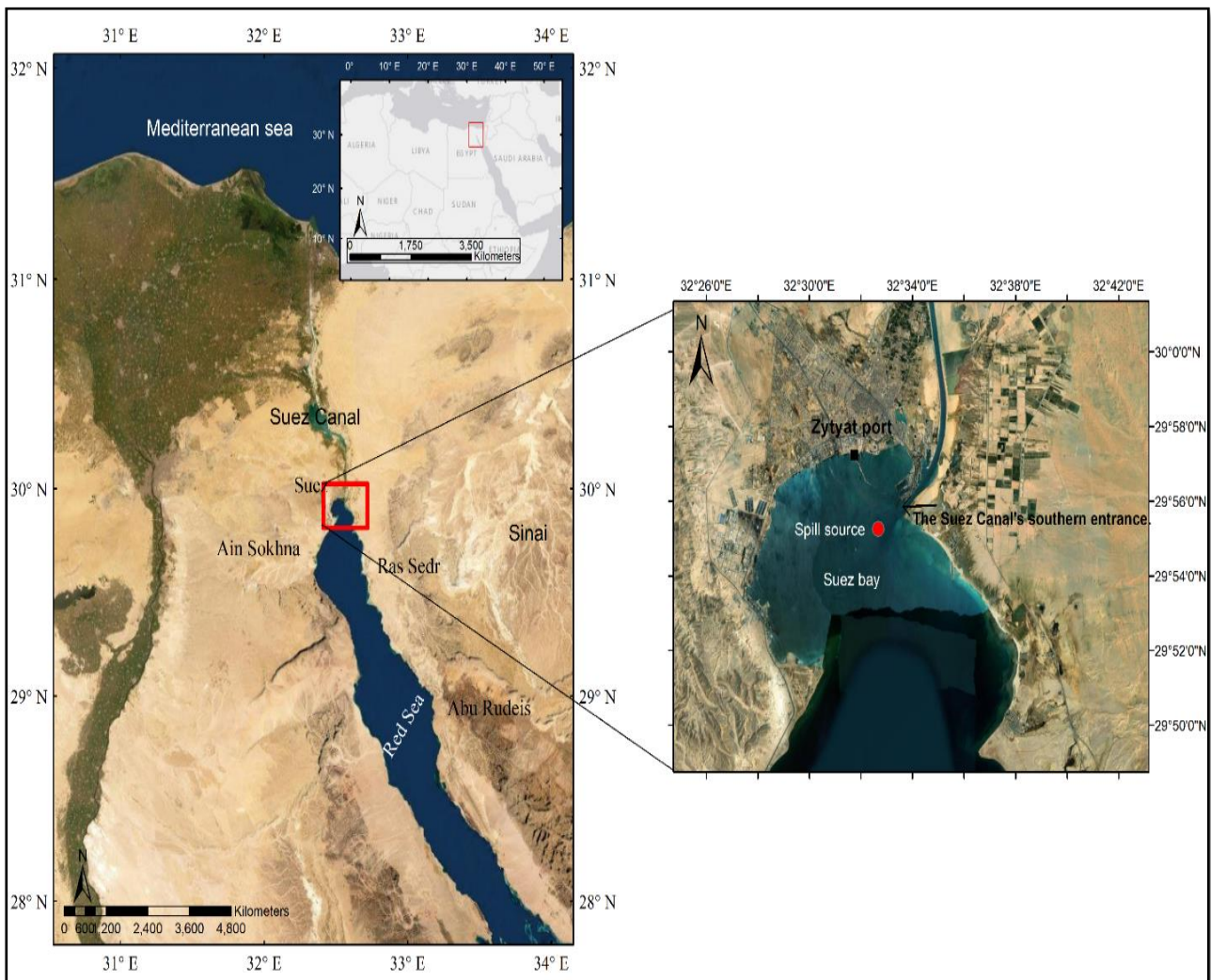


Figure 5.1 Suez gulf showing the hypothetical oil spill source as a big red dot off the southern entrance of the Suez Canal and Zaytyat Port.

According to the Suez Canal Authority [237], the canal accounts for around 10% of worldwide marine traffic and provides Egypt with much-needed foreign cash. On the 5th of August, 2014, Egyptian President Abdel Fattah El-Sisi declared the start of Egypt's new Suez Canal project. Consequently, canal traffic increased from 18,830 vessels in 2020 to 20,694 in 2021, or more than 56 per day [195]. Thus, the possibility of oil spill accidents in Egyptian water has increased due to the shipping traffic that passes through the Suez Canal to the Mediterranean Sea, which might obstruct the maritime route and harm the marine ecosystem [196]. **Figure 5.2** shows marine traffic density in the Gulf of Suez and Suez Canal for all ship types in 2021 [201]. According to Kostianaia et al. [196], the Suez Canal has already seen many oil spill incidents. As a result of oil tanker accidents, about 4,000 tons of crude oil leaked in 2004, and 9,000 tons were spilled in 2006 [61].

The Suez Bay, which represents the south entrance of the Suez Canal, is a shallow extension of the Gulf of Suez, roughly twisted in shape, with its central axis in the NE-SW direction [238]. Therefore, the Bay is always congested with cargos and tankers awaiting transit through the canal to the Mediterranean, which may result in oil leak accidents. Another factor contributing to the probability of an oil spill in the region is the Zytyat port. The Port is one of Egypt's oldest and largest specialty ports. It is utilized by Suez oil corporations to accept oil tankers laden with petroleum and gas from the Red Sea and South Sinai Governorate [239]. Despite the high shipping activities and the potential of being exposed to oil spills in Egypt's waters, there is no existing reference for predicting oil spill movement in the area under investigation (the Suez Canal's southern entrance), making this the first research of its sort.

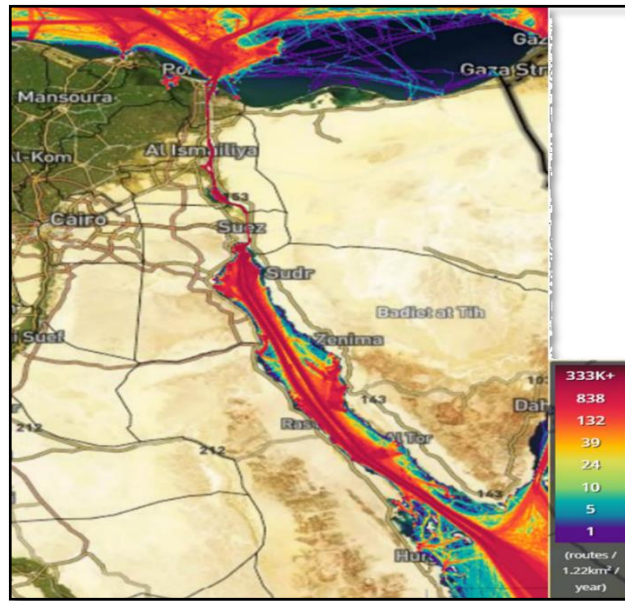


Figure 5.2 Heavy traffic at the Gulf of Suez and Suez Canal, source marine traffic [201]

5.2. Model formulation and assumptions

A hypothetical oil spill caused by a tanker accident in the Suez Bay at the southern entrance of the Suez Canal is considered for the present case. This possible oil spill source is in the shipping lane about 2 kilometers from the shoreline (**Figure 5.1**). One thousand metric tons of Arabian light crude oil is assumed to have spilled on the 10th of February 2021 at 12.00 am. The GNOME and ADIOS2 models were used to simulate the trajectory and behavior of the spill. As previously mentioned, the GNOME and ADIOS2 input data sets contain coastline data, wind data, sea currents data, oil spill location, oil type, oil amount, and seawater temperature. This study's spill scenarios comprise both actual and hypothetical environmental parameters. The actual wind data was downloaded from the ECMWF Reanalysis ERA5, while the sea currents data was from Copernicus. The wind speed is assumed to be constant at 4 m/s, which is the average scalar speed for February in Suez, and the wind direction is manipulated to represent the three predominant wind directions: the NW, accounting for 22.4% of the frequency; the N (17.3%); and the NE (7.0%) [61]. Seawater temperature was extracted from previous studies, where the average seawater temperature in winter is 18.7 °C [234]. Coastline data was obtained from the GSHHS database by the GOODS server. The simulation period

was 72 h at a step of 0.25 h. The along-current and cross-current uncertainty values for the sea currents data were adjusted to 10% to accommodate probable currents value uncertainties. Four different scenario settings are presented in **Table 5-1**.

Table 5-1 GNOME model scenarios with various parameters

Scenario	Spill location	Volume of spill	Seawater current	Wave speed and direction
Scenario 1	Late: 29.9214 N Long:32.5493 E	1000 metric tons	Variable	Variable
Scenario 2	Late: 29.9214 N Long: 32.5493 E	1000 metric tons	Variable	4 m/s from NW
Scenario 3	Late: 29.9214 N Long: 32.5493 E	1000 metric tons	Variable	4 m/s from N
Scenario 4	Late: 29.9214 N Long: 32.5493 E	1000 metric tons	Variable	4 m/s from NNE

5.3. Results

5.3.1. Scenario #1 trajectory and weathering

Variable wind and sea current data are used for Scenario #1. The simulation for the model started at 12:00 am on the 10th of February 2021. The results of Scenario #1 from the GNOME model are displayed in **Figure 5.3** as maps every six hours. As the simulation started, oil particles drifted in a southeast direction SE. Three hours after the simulation's beginning at 3 am, about 0.84% (177 metric tons) of the oil started reaching the southern entrance of the Suez Canal and continued to accumulate on the eastern side of the Gulf of Suez. After 72 hours, approximately 37.2% of the oil had covered about 34 kilometers of the east coast of the Gulf of Suez from (29°56'17.50"N 32°33'14.24"E to 29°42'29.57"N 32°41'20.83"E) for both black dots (best guess) and red dots (minimum regret solution). At the same time, approximately 35.9% (359 mt) of the oil traveled 30 km from the spill source and remained floating. The evaporation and emulsification processes started immediately after the oil spill. Within 72 hours, around 26% (260 mt) of the total oil spill had evaporated, and the emulsion water content reached approximately 84.8% (**Figure 5.4**) (**Table 5-2**).

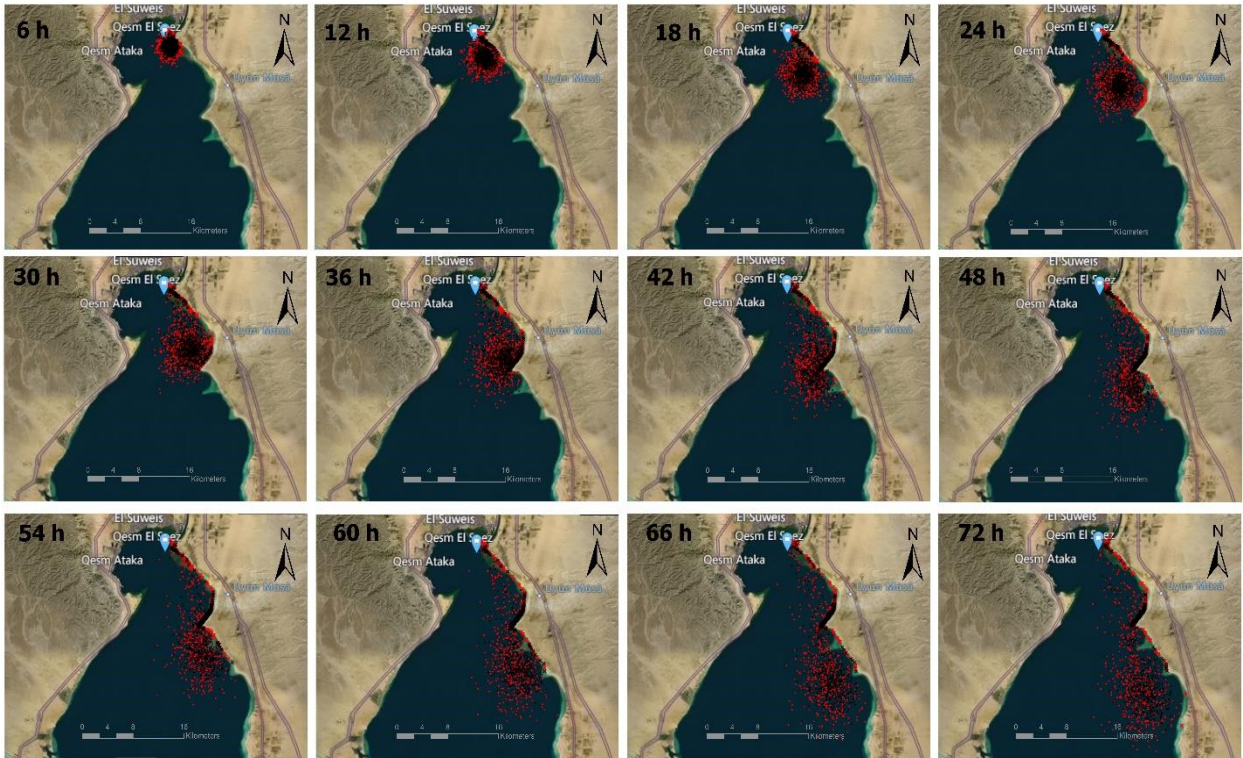


Figure 5.3 Oil particle position for Scenario #1 (variable wind and sea currents speed and direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.

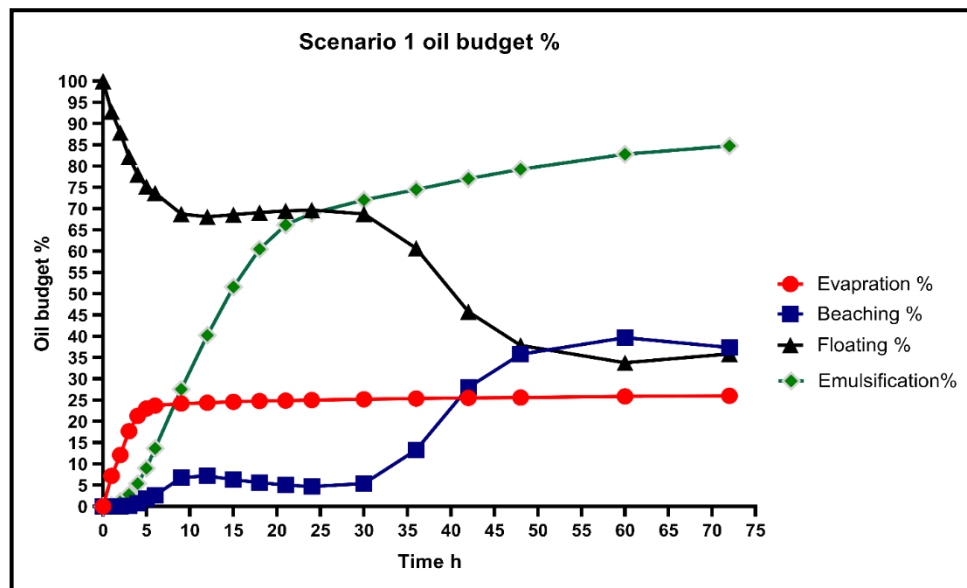


Figure 5.4 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #1.

Table 5-2 Scenario #1 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	Beached	Floating	Emulsification
1	72.2	0	928	2.7
2	121	0	879	11.7
3	177	0.84	822	28.0
4	213	7.28	780	53.7
5	230	18.2	752	90.0
6	237	25.8	737	136.5
9	242	68.2	688	275.5
12	244	71.8	681	402.5
15	246	63.3	686	516.3
18	248	56.4	691	605.4
21	249	50.3	695	661.8
24	250	47.2	697	689.5
30	252	54.3	688	720.6
36	254	133	607	745.4
42	255	280	458	770.5
48	256	358	379	793.0
60	259	397	338	828.3
72	260	374	359	848.1

5.3.2. Scenario #2 trajectory and weathering

Scenario #2 is simulated with a constant wind speed of 4 m/s from the NW direction and variable sea current. The model is set off on 10.2.2021 at 12:00 am. Here we saw the slick starts to move ESE direction with the best guess and minimum regret coverage area (**Figure 5.5**). In this scenario, beaching started after two hours at 2 am; nearly less than one metric ton of oil was found to be beached along the southern entrance of the Suez Canal. At the end of the simulation, approximately 70.5% of the whole oil was beached along the eastern shoreline of the Gulf of Suez, south of the Suez Canal. In this case, Black dots covered about 16.5 km (29°55'46.04"N 32°33'36.28"E to 29°48'56.49"N 32°35'52.46"E), While Red dots affect more than 38 km (29°56'17.43"N 32°33'27.54"E to 29°39'33.62"N 32°39'45.01"E). After 72 hours, the evaporation rate was about 25.2%, and the emulsification amount was 73.3% (**Figure 5.6**) (**Table 5-3**).

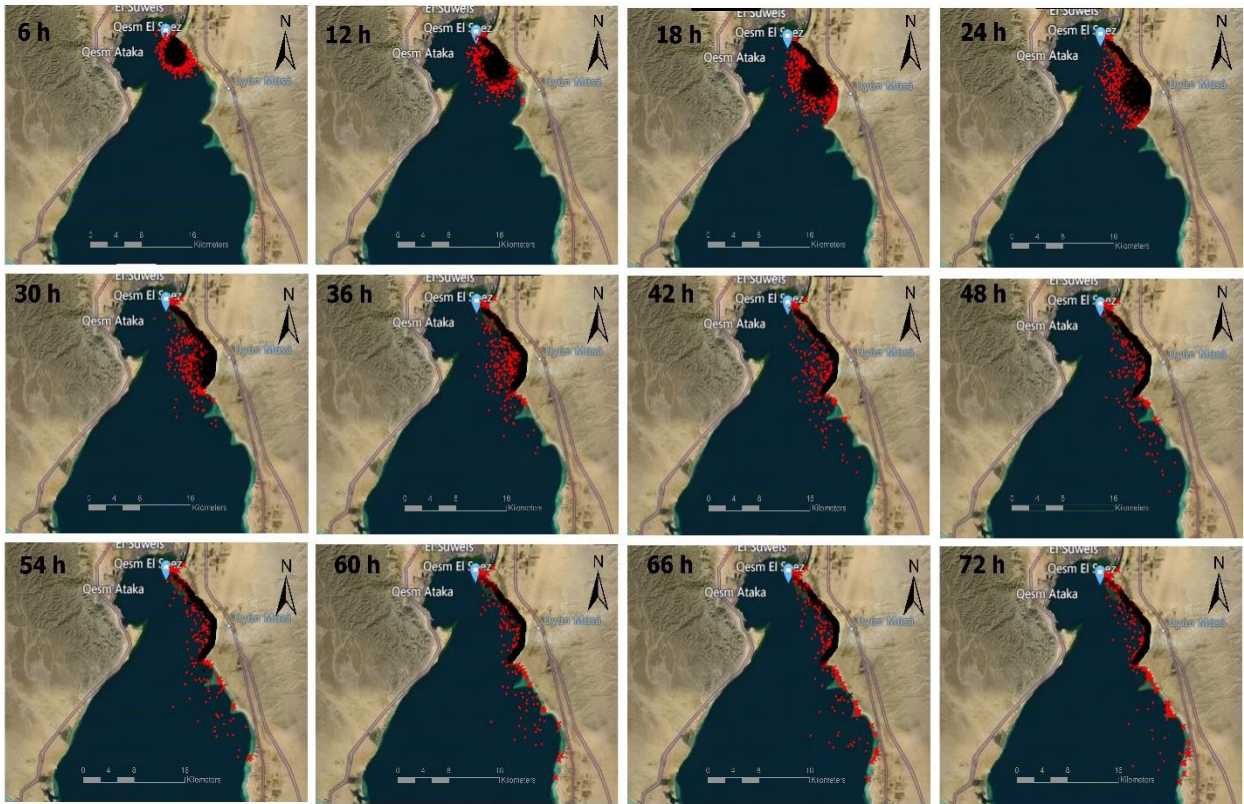


Figure 5.5 Oil particle position for Scenario #2 (constant wind speed 4 m/s from NW direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.

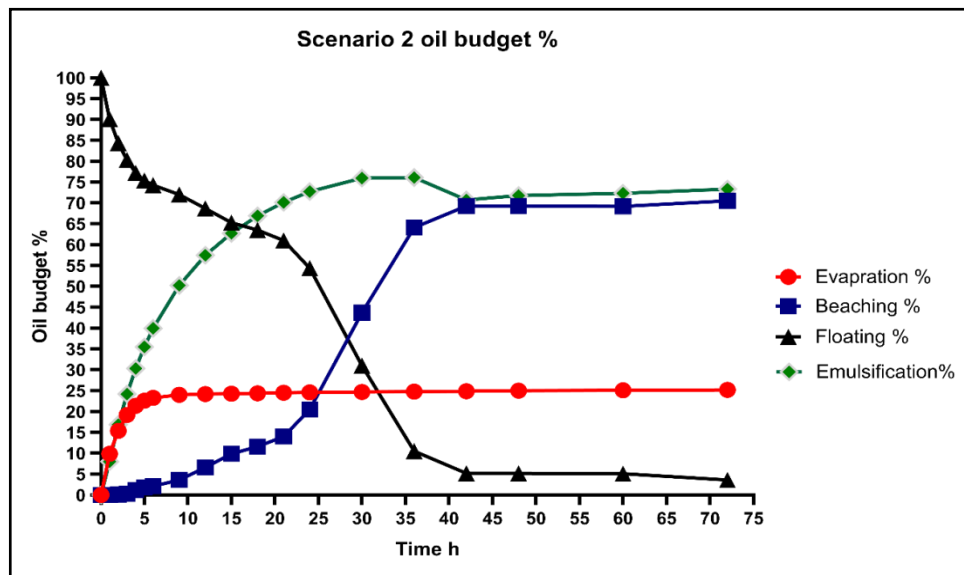


Figure 5.6 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #2.

Table 5-3 Scenario #2 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	Beached	Floating	Emulsification
1	98.9	0	901	80.2
2	154	0.87	844	169.0
3	192	3.31	803	242.0
4	214	12.1	772	303.3
5	226	17.6	754	355.3
6	233	21.3	743	399.7
9	240	36.4	720	502.4
12	242	66.5	687	575.0
15	243	98.6	653	627.4
18	244	116	635	669.3
21	245	140	610	701.4
24	246	205	544	727.6
30	247	437	310	759.6
36	248	641	105	761.3
42	249	693	52	707.5
48	250	693	51.8	718.0
60	251	692	50.8	723.6
72	252	705	35.9	733.2

5.3.3. Scenario #3 trajectory and weathering

In Scenario #3, the simulation is run with a constant wind speed 4 m/s from the N direction. As the simulation started at 12 am, the spill moved in the south direction with black (best guess solution, BGS) and Red (minimum regret solution, MRS) dots (**Figure 5.7**). After 9 hours, a minor amount of 0.1% of oil reached the eastern and western beaches of the Gulf of Suez. While at the end of the simulation, the majority of the oil, around 73.8 percent, stayed floating in the center of the Gulf waters and continued travel in the south direction. After 72 hours, the amount of oil lost due to evaporation reached 25.6%, and the emulsion water content reached approximately 76.4% (**Figure 5.8**) (**Table 5-4**).

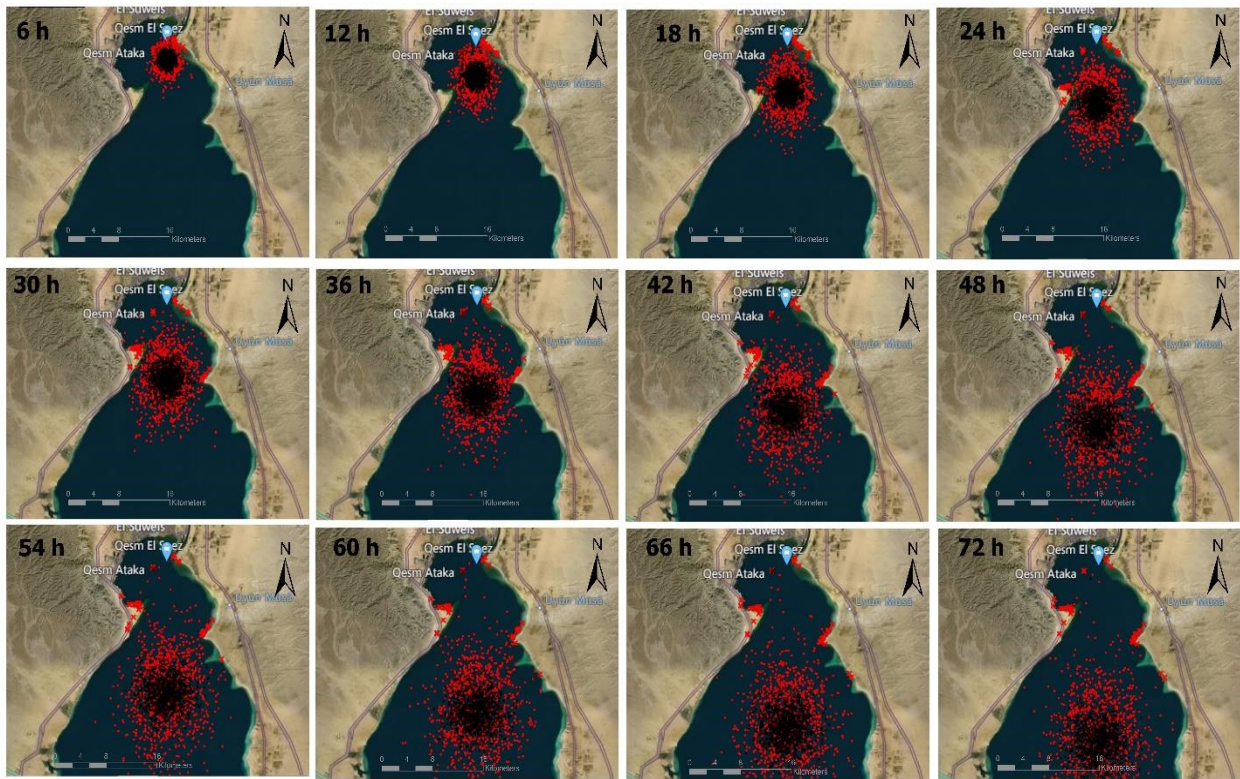


Figure 5.7 Oil particle position for Scenario #3 (constant wind speed 4 m/s from N direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.

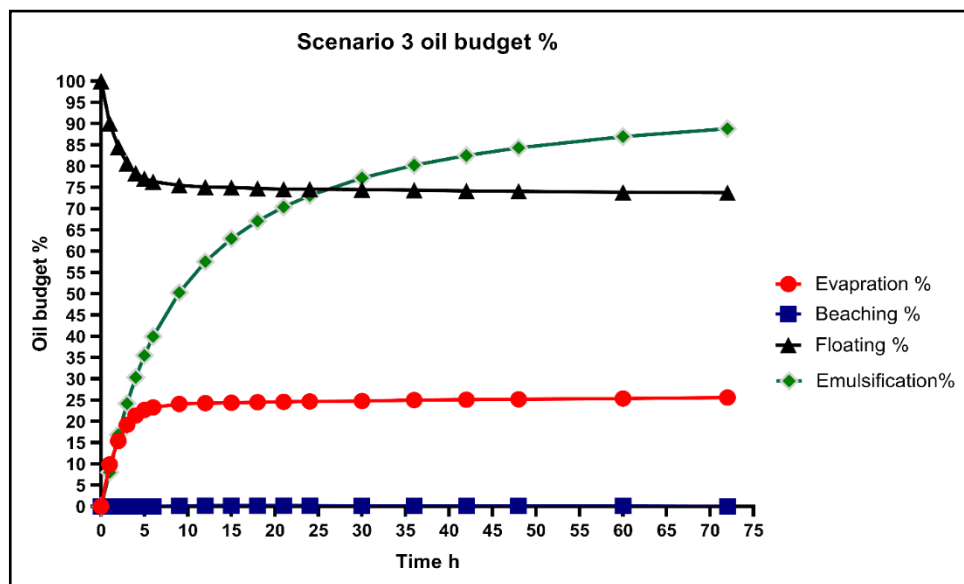


Figure 5.8 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #3.

Table 5-4 Scenario #3 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	Beached	Floating	Emulsification
1	98.9	0	901	80.2
2	154	0	845	169.0
3	192	0	807	242.1
4	214	0	784	303.3
5	227	0	771	355.3
6	233	0	764	400.0
9	241	0.76	755	503.1
12	243	1.51	751	575.7
15	244	1.51	750	629.7
18	245	2.26	748	671.3
21	246	2.26	746	704.4
24	247	1.5	746	731.1
30	248	0.75	745	772.3
36	250	0.75	744	802.4
42	251	0.75	742	825.4
48	252	0.75	741	843.4
60	254	0.75	739	869.9
72	256	0	738	888.3

5.3.4. Scenario #4 trajectory and weathering

The fourth scenario is simulated with a constant wind speed of 4 m/s from the north-east NE (**Figure 5.9**). As the simulation begins at 12 am, the oil slick starts moving in the southwest direction toward the western coast of the Gulf of Suez. Immediately after 2 hours at 2 am, approximately 1.4% (140 mt) starts beached to the Green Island, about 2 km from the spill location. After 18 h at 6 pm, the slick traveled about 9 km and reached the western coast of the Gulf of Suez at Al-Adabiya port. After 72 hours, approximately 60.3% of all spilled oil accumulated on the Green Island and covered about 40 km of the western coast of the Gulf of Suez from 29°54'31.20" N 32°27'43.70" E to 29°39'11.66" N 32°21'54.20" E for black and red dots. At the same time, approximately 13.7% remained in the water and continued floating. As shown in **Figure 5.10** and **Table 5-5**, the amount of oil lost due to evaporation was about

25.3% (253 mt), and the emulsion water content reached approximately 80.1% at the end of the simulation.

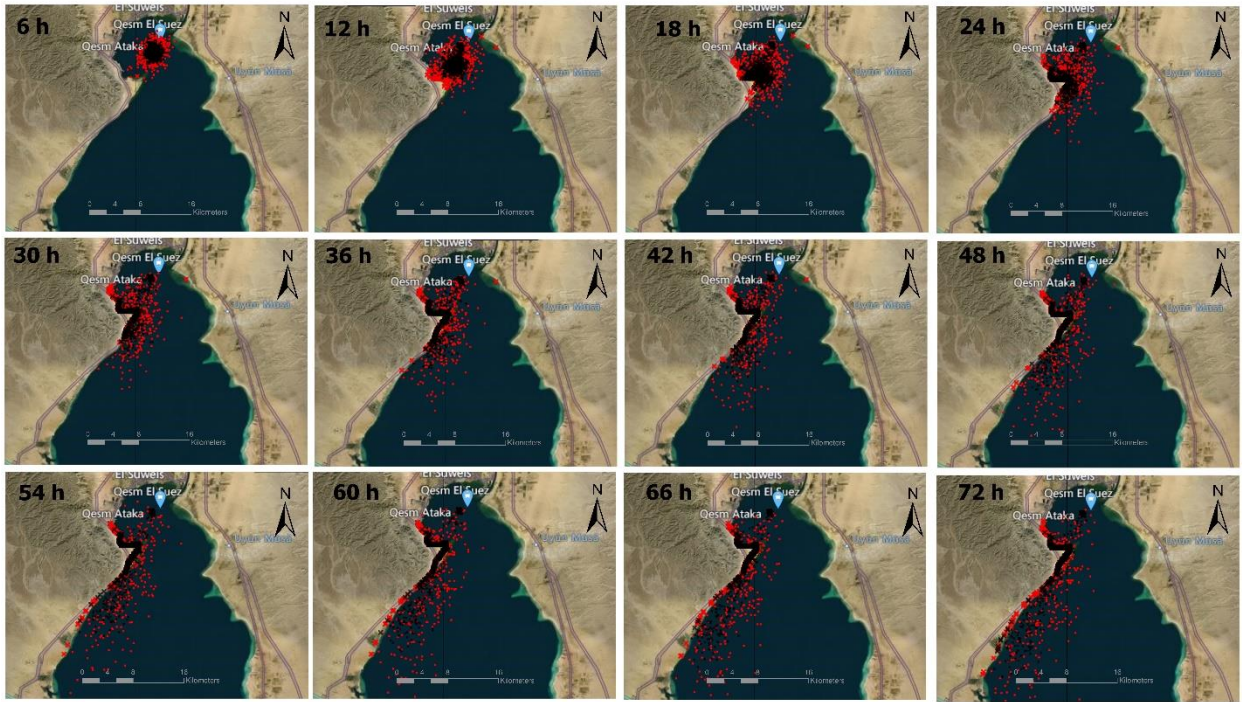


Figure 5.9 Oil particle position for Scenario 4 (constant wind speed 4 m/s from NE direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.

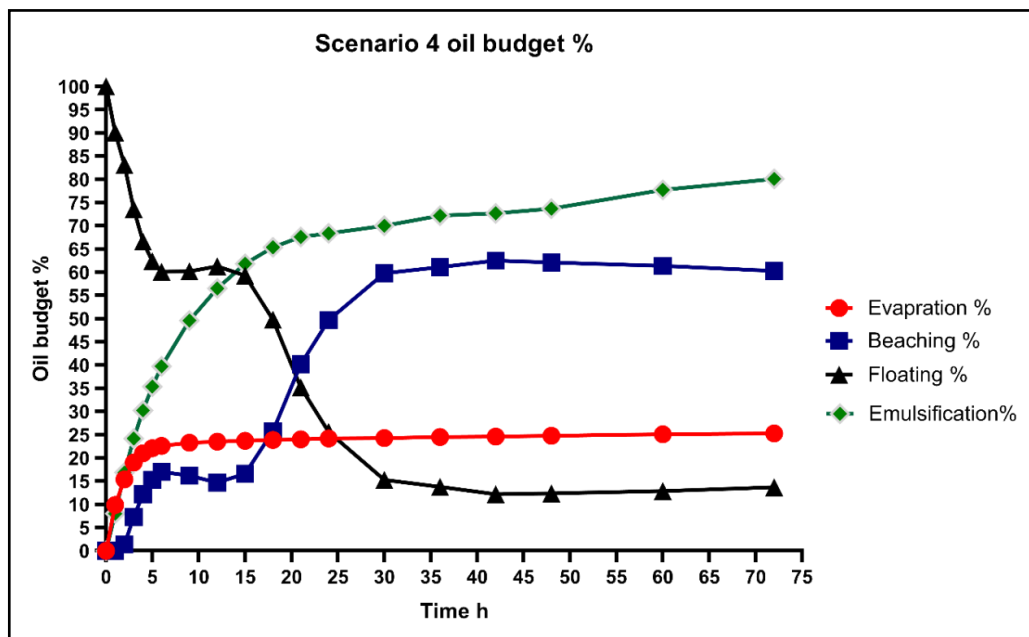


Figure 5.10 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #4.

Table 5-5 Scenario #4 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons)

Time (hours)	Evaporated	Beached	Floating	Emulsification
1	98.9	0	901	80.2
2	154	13.8	831	169.0
3	190	72.6	736	242.0
4	210	122	666	302.4
5	221	153	624	354.1
6	226	170	601	397.6
9	233	162	602	496.0
12	235	147	613	565.3
15	237	166	593	618.6
18	239	258	498	653.8
21	240	402	352	676.1
24	242	497	256	684.0
30	243	598	153	700.4
36	245	611	138	722.2
42	246	625	122	727.1
48	248	621	124	736.8
60	251	614	129	777.3
72	253	603	137	801.2

5.4. Discussion

This study simulates four possible oil spill scenarios that may be induced by a vessel accident at the southern entrance of the Suez Canal. Hence, the GNOME trajectory model simulated the oil spill's movement and time to reach the beach. In addition, the Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) has been utilized to identify how the oil breaks down naturally as it propagates (through evaporation and emulsification).

The trajectory maps in this study show that wind speed and direction significantly affected the movement of spilled oil in all four scenarios. These results are in line with those of previous studies. Numerous prior studies have indicated that wind speed and direction during and after an oil spill significantly affect the oil's mobility in the marine environment [240–243]. Another potential cause for the flow of the spilled oil in the south direction in all

scenarios is that it may be influenced by the predominant southerly movement of the sea currents. According to Frihy [225], sea currents in the Gulf of Suez mainly move southward.

The results show that the spilled oil moved southeast in scenarios 1 and 2. Although in Scenario #1, we used actual wind data for February extracted from the ECMWF reanalysis ERA5 model, in the second scenario, we utilized a constant wind speed of 4 meters per second and a constant direction from the north-west. This is because the north-west wind predominates in this area throughout February and forces the oil to move in the southeast direction. The north-west wind regime accounts for about 24% of the frequency of February in the northern part of the Gulf of Suez [244]. The current findings are consistent with Hussein [61], who used the GNOME oil spill model to simulate several anticipated oil spill scenarios under the influence of various wind regimes in the northern portion of the Gulf of Suez. She found that when the predominant wind is from the north-west direction, all oil spill trajectories flow in the southeast direction toward the eastern shoreline of the Gulf. In this study, the spilled oil in both scenario #1,2 reached the navigation lane of the Suez Canal within two to three hours. Also, approximately 30 to 38 kilometers of beaches south of the Suez Canal were threatened by oil contamination. Thus, in the case of an oil spill from a source at the southern entrance of the Suez Canal, the navigation lane via the Suez Canal and the area south of the Suez Canal would be the most vulnerable to contamination. This area has various crucial projects, such as the Ayoun Mousse power plant and several tourist resorts. Therefore, oil spill response personnel in the region must constantly be on alert.

In the case of the third scenario, the prevailing winds were from the north, the spill headed south, and almost three-quarters of all spilled oil continued to float in the water for 72 hours till the end of the simulation period. Therefore, the response teams could have enough time to choose the appropriate method to mitigate the effect of this spilled oil before it contaminates the coastline. Continuing with the fourth scenario, we assumed that the NE wind was dominant. In this scenario, the spilled oil moved southwesterly to the west coast of the Gulf of Suez. The movement direction of the oil in this scenario is consistent with Pradhan et al. [17], who simulated an oil spill in the Bay of Bengal, India. They observed that the oil moved in the southwest direction when northerly winds blew. In this study, Scenario 4 represents a

significant threat to the Green Island and the western coast of the Gulf of Suez, from Al-Adabiya port in the north to Ain Sukhna port in the south. This area is characterized by sensitive and fragile natural resources, habitats, a vast coastal plain, extensive tidal flat, tourist resorts, and its aquatic environment hosting a vital coral reef [245].

Weathering processes occur at varied speeds after the oil spill. Evaporation is the first weathering process that occurs after an oil spill. During this process, most volatile components of crude oil are removed within hours following the spill, which significantly impacts the density and viscosity of the oil slick [19]. As a result, determining the rate of evaporation is critical. The results show that approximately a quarter of the oil spilled was lost due to evaporation in all scenarios. The Arabian Light crude has a higher percentage of light and soluble fractions than other types of oil [62].

Emulsification is the process of incorporating water into the oil [19]. The negative impact of emulsification is an increase in the slick volume, which significantly raises the cleaning expense. Consequently, emulsification is a process that plays a significant role in oil spill modeling [1]. The results demonstrate that the emulsion water content was extremely high in all scenarios. It might be because the simulation period was in February, and the turbulence at the water's surface was at its peak. These results support the findings of Bozkurtoğlu [235], who suggested that turbulence at the sea surface promotes emulsion. The emulsification causes a rise in pollutant concentration. Therefore, these results about the behavior of oil after a spill are crucial for spill responders [66,232].

5.5. Summary

Since the Suez Canal is one of the world's busiest shipping routes, particularly for crude oil transit, it is vulnerable to oil spills, which may disrupt traffic, harm marine and coastal ecosystems, and threaten infrastructure and tourist resorts in the Gulf of Suez. This study simulates 1,000 metric tons of Arabian light crude oil that spilled into seawater on the 10th of February, 2021, at 12:00 am, in the shipping lane about 2 kilometers from the Suez Canal's southern entrance. Four scenarios were simulated using GNOME and ADIOS2 models in different wind conditions to define the potentially affected regions, determine when the oil

would reach the coast, how much oil remains in the water and calculate the weathering processes of the spilled oil (evaporation and emulsification). The study revealed that the spilled oil movement had been influenced by the direction of the wind in each scenario and the seawater current direction in the region. The spilled oil movement in scenario #1 was influenced by the north-west NW wind and drifted towards the eastern shoreline of the Gulf of Suez and reached the beach within two to three hours. As a result, the Suez Canal navigation lane and approximately 30 to 38 kilometers of beaches south of the Suez Canal, which have several projects and touristic resorts, were endangered by oil pollution. The north wind in Scenario #3 forced the spilled oil to move in the south direction, and the high proportion of the oil (73.8 %) remained floating until the end of the simulation and did not threaten the beaches. In Scenario #4, the spill moved in the southwest (SW) direction toward the western coast of the Gulf of Suez under the influence of north-east NE wind. The spilled oil reached Green Island within two hours, and after 72 h, roughly 60.3% of oil particles covered a distance of 40 km south of Al-Adabiya port to Ain Sukhna port. According to the ADIOS2 results, in all scenarios, a considerable portion of the spilled oil, almost a quarter of the oil, evaporated, and more than two-thirds of the oil emulsified.

Conclusion

The Gulf of Suez (GOS) is subject to considerable shipping activity, particularly oil tanker traffic, Because of its strategic position between the Mediterranean Sea and Red Sea. Therefore, it is a potentially vulnerable location to oil spills caused by tanker accidents that could have a destructive ramification on Egypt's coastal areas, damaging its marine environment, coral reefs, and touristic resorts and obstructing the maritime route. Three cases of Arabian light crude oil spill caused by an oil tankers' incidents along the maritime route in the Gulf of Suez, in front of three crucial areas: Hurghada, Ain Sukhna port, and the southern entrance to the Suez Canal were simulated using the General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Oil Modeling Environment (GNOME) and Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS2) models. In conclusion, the main results obtained from the mathematical modeling of the trajectory and behavior of the oil spill in the three areas can be formulated as follows:

- In all cases of the direction of the wind and sea currents play an essential role determining the spill trajectory movement in the Gulf of Suez.

- In Hurghada, two potential oil spill scenarios in February and August 2021 due to a tanker incident in the Gubal Strait, approximately 50 km northern of Hurghada were simulated. The results highlighted that the oil particles in Scenario #1 (February) moved in the southeast direction under the influence of northwest NW winds, and it took 42 hours to reach Small Jubal Island and then Shadwan Island. While in Scenario #2 (August) moved southwesterly under the influence of northeast NE winds and arrived after 21 hours at Ashrafi Island and then at Jubal, Geisum, and Tawila Islands. The results of modeling the spilled oil weathering processes showed that about 27% of the Arabian Light oil had evaporated, and the natural dispersion rate was modest, about 1.3% in both scenarios at the end of the simulation. Furthermore, the amount of water in the emulsion rose as soon as the oil was introduced to the water, reaching 90% after 108 h in both scenarios. The northern Red Sea islands (Ashrafi, Small Gubal, Geisum, Tawila, Shadwan, and Gifton), which are of enormous economic and strategic significance, would be the most vulnerable to pollution.

- In Ain Sukhna, two scenarios of Arabian light crude oil spilled into seawater on the shipping route about 5 kilometers from the Ain Sukhna port in February and August 2020. The study found in Scenario #1, about 29.7 metric tons of the spilled oil moved in the southeast direction (SE), parallel to the west coast of the GOS and reached Ras Abu Darag, approximately 22.7 km away from the spill location, covering nearly 14.2 km of the western shoreline of the Gulf of Suez. While in Scenario #2, the spill moved to the southwest (SW) direction, and after 21 hours, roughly 705 mt of oil particles covered a distance of 10 km along the western coast, approximately 10.5 km from the spill location. According to the ADIOS2 results, the rate of evaporation and emulsification was high, while the natural dispersion was modest in both scenarios. The region south of the port, which hosts many tourist resorts and various coral reefs, would be the most vulnerable to contamination.

- In the southern entrance of the Suez Canal, four scenarios of Arabian light crude oil spilled about 2km from the southern entrance of the Suez Canal in February 2021. In this case the wind speed is assumed to be constant at 4 m/s, which is the average scalar speed for February in Suez, and the wind direction is manipulated to represent the three predominant wind directions: the NW, N and NNE. The spilled oil movement in scenario #1 and #2 was influenced by the north-west NW wind and drifted towards the eastern shoreline of the Gulf of Suez and reached the beach within two to three hours. As a result, the Suez Canal navigation lane and approximately 30 to 38 kilometers of beaches south of the Suez Canal, which have several projects and touristic resorts, were endangered by oil pollution. The north wind in Scenario #3 forced the spilled oil to move in the south direction, and the high proportion of the oil (73.8 %) remained floating until the end of the simulation and did not threaten the beaches. In Scenario #4, the spill moved in the southwest (SW) direction toward the western coast of the Gulf of Suez under the influence of north-east NE wind. The spilled oil reached Green Island within two hours, and after 72 h, roughly 60.3% of oil particles covered a distance of 40 km south of Al-Adabiya port to Ain Sukhna port. According to the ADIOS2 results, in all scenarios, a considerable portion of the spilled oil, almost a quarter of the oil, evaporated, and more than two-thirds of the oil emulsified.

Finally, modeling oil spill in the Gulf of Suez using mathematical oil spill models can be significant in several ways:

Improving Response Planning: The study can help improve response planning for potential oil spills in the Gulf of Suez by providing information on how the oil would move and spread in the event of a spill. This can allow for better preparedness and response planning to minimize the impact of the spill.

Evaluating Risk: The study can also be used to evaluate the risk of oil spills in the Gulf of Suez. By understanding how oil would move and spread in the event of a spill, stakeholders can assess the likelihood and severity of an oil spill and take necessary measures to reduce the risk.

Informing Policy: The study can provide valuable information for policymakers to make informed decisions about regulations and policies related to oil spill prevention and response. This can ultimately lead to better protection of the environment and the livelihoods of people in the area.

Environmental Impact Assessment: The study can contribute to the environmental impact assessment of potential oil and gas projects in the Gulf of Suez. By simulating oil spills under various conditions, the study can help assess the potential environmental impact of a spill and aid in making informed decisions about the feasibility of oil and gas projects in the region.

Overall, the practical significance of a study on modeling oil spills in the Gulf of Suez using mathematical oil spill models can be crucial in improving response planning, evaluating risk, informing policy, and contributing to environmental impact assessment.

List of figures

Figure 1.1 Global oil production from 1998 to 2021 per day [71]	13
Figure 1.2 Numbers of reported oil spills summed by decade, by spill source, across almost five decades, from 1970 to 2010–2018 [77].	14
Figure 1.3 The main causes of tankers’ major and minor spill incidents.....	15
Figure 1.4 Map of major and minor oil spills worldwide from 1970 to 2020 [58].	16
Figure 1.5 Main marine oil spill processes after spillage [1]	19
Figure 1.6 Relative timescales of weathering and fate processes. The thickness of the bars represents the relative importance of each process at a given time after the initial spill [105].	20
Figure 1.7 The effect of different wind and current directions on the resulting movement of an oil slick [113].	22
Figure 2.1 The Gulf of Suez topographic map	38
Figure 2.2 Locations of Oil Fields and Pipelines in the Gulf of Suez [200]	38
Figure 2.3 Contours depicting the marine traffic density in the Gulf of Suez for all ship types in 2021 [201].	39
Figure 2.4 Zonal distribution of oil spill incidents from 1998 to 2005 in the Gulf of Suez, the most frequent oil spill zones circled by red; 1) Hurghada 2) Ain Sukhna 3) The southern entrance of the Suez Canal. (Every red cubic represent one incident)	41
Figure 2.5 ADIOS2 program structure [50].....	48

Figure 2.6 A diagram framework of the GNOME and ADIOS2 models' input and output data.....	51
Figure 2.7 Extracting coastline data of the study area from GOODS website	52
Figure 3.1 General map of Egypt's Red Sea showing Hurghada beaches, islands, and the source of the spilled oil symbolized by a red dot.....	55
Figure 3.2 The ship traffic density between the Gulf of Suez and the Mediterranean Sea through the Suez Canal. The circle depicts the ship's activity off the coast of Hurghada [201]	55
Figure 3.3 Wind rose diagram at Hurghada city from 2011 to 2020.....	57
Figure 3.4 Scenario #1 trajectory modeling, the green arrows represent the wind direction, and the big blue dot represents the spill location.....	59
Figure 3.5 Arabian light crude oil budget in Scenario #1	61
Figure 3.6 Emulsification rate of Scenario #1	61
Figure 3.7 Scenario #2 trajectory modeling, the green arrows represent the wind direction, and the big blue dot represents the spill location.....	62
Figure 3.8 Arabian light crude oil budget in Scenario #2.....	64
Figure 3.9 Emulsification rate of Scenario #2	64
Figure 4.1 Gulf of Suez map showing the hypothetical oil spill location as a big red dot off Ain Sukhna port	68
Figure 4.2 Wind rose diagram in the study area from 2015 to 2020	69
Figure 4.3 Oil-spill trajectory maps for Scenario #1, the long red arrows represent wind speed and direction, and the short yellow arrows represent surface current.	71

Figure 4.4 Oil-spill trajectory maps for Scenario #2, the long red arrows represent wind speed and direction, and the short yellow arrows represent surface current.	73
Figure 4.5 Evaporation rate (%).....	74
Figure 4.6 Emulsion water content (%)	75
Figure 4.7 Dispersion rate (%).....	75
Figure 5.1 Suez gulf showing the hypothetical oil spill source as a big red dot off the southern entrance of the Suez Canal and Zaytyat Port.....	79
Figure 5.2 Heavy traffic at the Gulf of Suez and Suez Canal, source marine traffic [201].....	81
Figure 5.3 Oil particle position for Scenario #1 (variable wind and sea currents speed and direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.....	83
Figure 5.4 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #1.	83
Figure 5.5 Oil particle position for Scenario #2 (constant wind speed 4 m/s from NW direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.....	85
Figure 5.6 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #2.	85
Figure 5.7 Oil particle position for Scenario #3 (constant wind speed 4 m/s from N direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.....	87

Figure 5.8 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #3.	87
Figure 5.9 Oil particle position for Scenario 4 (constant wind speed 4 m/s from NE direction). The black dots represent BGS, and the red dot presents MRS). The spill source is shown as the big blue dot.....	89
Figure 5.10 The spilled oil's evaporation, beaching, floating, and emulsification during the simulation period of Scenario #4.	89

List of tables

Table 1-1 Crude oil offshore production from 2012 to 2021 per year [72]	13
Table 1-2 Major tanker spills since 1967 (arranged according to spill amount) [58].....	16
Table 2-1 Arabian light crude oil characteristics (ADIOS2 oil library database)	53
Table 3-1 Oil spill parameters of the study case.....	57
Table 3-2 Scenario #1 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	60
Table 3-3 Scenario #2 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	63
Table 4-1 Oil spill parameters of Case study 2.....	70
Table 4-2 Scenario #1 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	72
Table 4-3 Scenario #2 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	74
Table 5-1 GNOME model scenarios with various parameters	82
Table 5-2 Scenario #1 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	84
Table 5-3 Scenario #2 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	86
Table 5-4 Scenario #3 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	88
Table 5-5 Scenario #4 Oil spill behavior and fate results with time (metric tons).....	90

Acknowledgements

No words can possibly explain how grateful I am to **Allah** for guiding, assisting, and blessing me in all aspects of my life.

I would like to express my sincere gratitude to Prof. **Valery Chantsev**, associate professor of geographical sciences at the Russian State Hydrometeorological University, Russia, for his guidance, support, review of manuscripts and abstracts of conferences, and valuable comments as my academic supervisor. His expertise, encouragement, and mentorship have been invaluable throughout my academic journey and have played a significant role in my success. and sharing his knowledge and expertise with me, for his patience and understanding, and for his tireless efforts to help me grow both academically and personally. His contributions to my academic success will never be forgotten, and I am honored to have had him as my supervisor.

This research would not have been possible without the support and a grant [EGY-6549/19] from both the General Administration of Missions at the Ministry of Higher Education of Egypt and the Russian government.

I would like to express my gratitude to the Russian State Hydrometeorological University for its gracious hospitality during my stay at the Department of Oceanography. I am thankful to all staff members for their kind assistance and for educating me with several courses to broaden my knowledge.

I owe great support, sincere love, and my heartfelt gratitude to my family (**my mother, wife, and my lovely kids, Amany, Mohamed, and Rofan**), who stood by me during hard times and gave me all the potential support I needed to accomplish my study.

References

1. Keramea P. et al. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2021. Vol. 9, № 2. P. 181.
2. ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation Limited, Oil Tanker Spill Statistics. London, 2011.
3. Robert Perkins. Global oil demand to surpass pre-pandemic levels in 2022 as omicron fears subside: IEA // *S&P Global Commodity Insights*. 2022.
4. Zabbey N., Olsson G. Conflicts–oil exploration and water // *Glob. challenges*. Wiley Online Library, 2017. Vol. 1, № 5. P. 1600015.
5. Kakalis N.M.P., Ventikos Y. Robotic swarm concept for efficient oil spill confrontation // *J. Hazard. Mater. Elsevier*, 2008. Vol. 154, № 1–3. P. 880–887.
6. Mohammadiun S. et al. Intelligent Computational Techniques in Marine Oil Spill Management: A Critical Review // *J. Hazard. Mater. Elsevier*, 2021. P. 126425.
7. Fingas M. Oil Spills : Causes , Consequences , Prevention , and Countermeasures. 2016. № July 2016. 159–201 p.
8. Singha S. Offshore oil spill detection using synthetic aperture radar. University of Hull, 2014.
9. Kachel M.J. Threats to the marine environment: pollution and physical damage // *Part. Sensitive Sea Areas IMO’s Role Prot. Vulnerable Mar. Areas*. Springer, 2008. P. 23–36.
10. Gurumoorthi K. et al. Fate of MV Wakashio oil spill off Mauritius coast through modelling and remote sensing observations // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2021. Vol. 172. P. 112892.
11. Escobar H. Mystery oil spill threatens marine sanctuary in Brazil. American Association for the Advancement of Science, 2019.
12. Magris R.A., Giarrizzo T. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2020. Vol. 153. P.

110961.

13. Salomon M., Markus T. Handbook on marine environment protection: Science, impacts and sustainable management. Springer, 2018.
14. Daling P.S., Strom T. Weathering of oils at sea: model/field data comparisons // *Spill Sci. Technol. Bull.* Elsevier, 1999. Vol. 5, № 1. P. 63–74.
15. Fingas M.F. The evaporation of oil spills: Development and implementation of new prediction methodology // 2005 Int. Oil Spill Conf. IOSC 2005. 2005. № January 2005. P. 2659–2669.
16. Lončar G., Beg Paklar G., Janeković I. Numerical modelling of oil spills in the area of Kvarner and Rijeka Bay (The Northern Adriatic Sea) // *J. Appl. Math.* Hindawi, 2012. Vol. 2012.
17. Pradhan B., Das M., Pradhan C. Forecasting oil spill movement through trajectory modeling: a case study from Bay of Bengal, India // *Model. Earth Syst. Environ.* Springer, 2021. Vol. 7, № 2. P. 1107–1119.
18. Dietrich J.C. et al. Surface trajectories of oil transport along the Northern Coastline of the Gulf of Mexico // *Cont. Shelf Res.* Elsevier, 2012. Vol. 41. P. 17–47.
19. Mishra A.K., Kumar G.S. Weathering of Oil Spill: Modeling and Analysis // *Aquat. Procedia.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 4, № Icwrcoc. P. 435–442.
20. Olita A. et al. Oil spill hazard and risk assessment for the shorelines of a Mediterranean coastal archipelago // *Ocean Coast. Manag.* Elsevier, 2012. Vol. 57. P. 44–52.
21. Lee M., Jung J.-Y. Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2015. Vol. 100, № 1. P. 297–303.
22. Saçu Ş., Şen O., Erdik T. A stochastic assessment for oil contamination probability: A case study of the Bosphorus // *Ocean Eng.* Elsevier, 2021. Vol. 231, № May. P. 1–13.
23. Zelenke B. et al. General NOAA operational modeling environment (GNOME) technical documentation. 2012.

24. Elizaryev A. et al. Numerical simulation of oil spills based on the GNOME and ADIOS // *Int. J. Eng. Technol. Science Publishing Corporation Inc*, 2018. Vol. 7, № 2. P. 24.
25. Yang Y. et al. Numerical simulation of oil spill in the Gulf of Mexico based on the GNOME and ADIOS // *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publ*, 2013. Vol. 295. P. 1535–1542.
26. Yapa P.D. et al. How does oil and gas behave when released in deepwater? // *J. Hydro-Environment Res. Elsevier*, 2012. Vol. 6, № 4. P. 275–285.
27. Chen F., Yapa P.D. A model for simulating deep water oil and gas blowouts-Part II: Comparison of numerical simulations with “Deepspill” field experiments // *J. Hydraul. Res. Taylor & Francis*, 2003. Vol. 41, № 4. P. 353–365.
28. Reed M., Rye H. A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment // *International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute*, 1995. Vol. 1995, № 1. P. 61–66.
29. Aamo O.M., Reed M., Downing K. Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: sensitivity studies // *International Oil spill conference. American Petroleum Institute*, 1997. Vol. 1997, № 1. P. 429–438.
30. Spaulding M.L. et al. Application of three-dimensional oil spill model (WOSM/OILMAP) to hindcast the Braer spill // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 1994. Vol. 1, № 1. P. 23–35.
31. Daniel P. et al. Improvement of drift calculation in Mothy operational oil spill prediction system // *International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute*, 2003. Vol. 2003, № 1. P. 1067–1072.
32. Spaulding M. et al. Application of an integrated blowout model system, OILMAP DEEP, to the Deepwater Horizon (DWH) spill // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2017. Vol. 120, № 1–2. P. 37–50.
33. Crowley D. et al. Modeling atmospheric volatile organic compound concentrations resulting from a deepwater oil well blowout–Mitigation by subsea dispersant injection // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2018. Vol. 136. P. 152–163.

34. McCay D.F. Development and application of damage assessment modeling: example assessment for the North Cape oil spill // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2003. Vol. 47, № 9–12. P. 341–359.
35. McCay D.F., Rowe J.J. Evaluation of bird impacts in historical oil spill cases using the SIMAP oil spill model // *Arctic And Marine Oilspill Program Technical Seminar. Citeseer*, 2004. Vol. 1. P. 421–452.
36. French-McCay D. et al. Comparative risk assessment of spill response options for a deepwater oil well blowout: Part 1. Oil spill modeling // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2018. Vol. 133. P. 1001–1015.
37. Gros J. et al. Simulating gas–liquid– water partitioning and fluid properties of petroleum under pressure: implications for deep-sea blowouts // *Environ. Sci. Technol. ACS Publications*, 2016. Vol. 50, № 14. P. 7397–7408.
38. Gros J. et al. Dynamics of live oil droplets and natural gas bubbles in deep water // *Environ. Sci. Technol. ACS Publications*, 2020. Vol. 54, № 19. P. 11865–11875.
39. Berry A., Dabrowski T., Lyons K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2012. Vol. 64, № 11. P. 2489–2501.
40. De Dominicis M. et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting–Part 1: Theory // *Geosci. Model Dev.* 2013. Vol. 6, № 6. P. 1851–1869.
41. Röhrs J. et al. The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills // *Ocean Sci. Copernicus GmbH*, 2018. Vol. 14, № 6. P. 1581–1601.
42. Dagestad K.-F. et al. OpenDrift v1. 0: a generic framework for trajectory modelling // *Geosci. Model Dev. Copernicus GmbH*, 2018. Vol. 11, № 4. P. 1405–1420.
43. Duran R. et al. Simulation of the 2003 foss barge-point wells oil spill: A comparison between BLOSOM and GNOME oil spill models // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2018. Vol. 6, № 3. P. 104.
44. Farzingohar M., Ibrahim Z.Z., Yasemi Mjij. Oil spill modeling of diesel and gasoline with GNOME around Rajae Port of Bandar Abbas, Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*,

2011.

45. Cheng Y. et al. SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2011. Vol. 62, № 2. P. 350–363.
46. Huynh B.Q. et al. Public health impacts of an imminent Red Sea oil spill // *Nat. Sustain. Nature Publishing Group*, 2021. Vol. 4, № 12. P. 1084–1091.
47. Beegle-Krause J. General NOAA oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model // *International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute*, 2001. Vol. 2001, № 2. P. 865–871.
48. Prasad S.J. et al. An assessment on oil spill trajectory prediction: Case study on oil spill off Ennore Port // *J. Earth Syst. Sci. Springer*, 2018. Vol. 127, № 8. P. 1–8.
49. Marzooq H., Naser H.A., Elkanzi E.M. Quantifying exposure levels of coastal facilities to oil spills in Bahrain, Arabian Gulf // *Environ. Monit. Assess. Springer*, 2019. Vol. 191, № 3. P. 1–16.
50. Lehr W. et al. Revisions of the ADIOS oil spill model // *Environ. Model. Softw. Elsevier*, 2002. Vol. 17, № 2. P. 189–197.
51. Samuels W.B. et al. Development of a global oil spill modeling system // *Earth Sci. Res. Citeseer*, 2013. Vol. 2, № 2. P. 52.
52. Toz A.C. Modelling oil spill around Bay of Samsun, Turkey, with the use of OILMAP and ADIOS software systems // *Polish Marit. Res.* 2017.
53. Celik M., Topcu Y.I. Use of an ANP to prioritize managerial responsibilities of maritime stakeholders in environmental incidents: An oil spill case // *Transp. Res. Part D Transp. Environ. Elsevier*, 2009. Vol. 14, № 7. P. 502–506.
54. Cakir E., Sevgili C., Fiskin R. An analysis of severity of oil spill caused by vessel accidents // *Transp. Res. Part D Transp. Environ. Elsevier*, 2021. Vol. 90. P. 102662.
55. Ye X. et al. A simulation-based multi-agent particle swarm optimization approach for supporting dynamic decision making in marine oil spill responses // *Ocean Coast. Manag. Elsevier*, 2019. Vol. 172. P. 128–136.

56. Riazi M.R. Oil Spill Occurrence, Simulation, and Behavior. CRC Press, 2021.
57. France-Press A. Diesel tanker sinks off Tunisia risking environmental disaster // The Gardian. 2022.
58. ITOPF. Oil Tanker Spill Statistics 2021 [Electronic resource]. 2021. URL: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/> (accessed: 22.04.2022).
59. Rob Schmitz. The EU will block most Russian oil imports as Hungary's Orbán fights off a total ban [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.npr.org/2022/05/30/1102083611/eu-agree-partial-russian-oil-embargo> (accessed: 03.08.2022).
60. Hanna R.G.M. Oil pollution on the Egyptian Red Sea coast // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 1983. Vol. 14, № 7. P. 268–271.
61. Hussein M.S. Assessment of the vulnerability of environmentally sensitive coasts to a large oil spill: the case of the northern part of the Gulf of Suez // Arab. J. Geosci. Springer, 2021. Vol. 14, № 18. P. 1–15.
62. Nasr P., Smith E. Simulation of oil spills near environmentally sensitive areas in Egyptian coastal waters // Water Environ. J. Wiley Online Library, 2006. Vol. 20, № 1. P. 11–18.
63. Omar M.Y. et al. Oil Spill Modeling at Sidi Kreir SUMED Oil Terminal, Alexandria, Egypt // International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development. Springer, 2019. P. 331–341.
64. Periañez R. A Lagrangian oil spill transport model for the Red Sea // Ocean Eng. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 217, № April. P. 107953.
65. Omar M.Y. et al. A case study of the Suez Gulf: Modeling of the oil spill behavior in the marine environment // Egypt. J. Aquat. Res. 2021.
66. Toz A.C., Koseoglu B. Trajectory prediction of oil spill with Pisces 2 around Bay of Izmir, Turkey // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2018. Vol. 126. P. 215–227.
67. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Simulating oil spill movement and behavior: a case study from the Gulf of Suez, Egypt // Model. Earth Syst. Environ. Springer, 2022. Vol. 8, № 4. P. 4553–

4562.

68. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Modeling marine oil spill trajectory and fate off Hurghada, Red Sea coast, Egypt // Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH), 2022. Vol. 26, № 6. P. 41–61.
69. Abdallah I.M. Chantsev V.Y. Simulation of Oil Spill Trajectory and Fate at the Southern Entrance of the Suez Canal, Red Sea, Egypt // Fundam. Appl. Hydrophys. 2023. Vol. 16, № 1. P. 63–79.
70. Asif M., Muneer T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies // Renew. Sustain. energy Rev. Elsevier, 2007. Vol. 11, № 7. P. 1388–1413.
71. Sönnichsen N. Global Oil Production 2021 [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/265203/global-oil-production-since-in-barrels-per-day/> (accessed: 09.10.2022).
72. of Ocean Energy Management. B. Outer Continental Shelf Oil and Gas Production [Electronic resource] // Bureau of Safety and Environmental Enforcement. 2018. P. 2. URL: <https://www.data.bsee.gov/Production/OCSProduction/Default.aspx> (accessed: 08.10.2022).
73. Li P. et al. Offshore oil spill response practices and emerging challenges // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2016. Vol. 110, № 1. P. 6–27.
74. Fingas M. Oil spill science and technology. Gulf professional publishing, 2016.
75. Chen J. et al. Oil spills from global tankers: Status review and future governance // J. Clean. Prod. Elsevier, 2019. Vol. 227. P. 20–32.
76. Nelson J.R., Grubestic T.H. Oil spill modeling: computational tools, analytical frameworks, and emerging technologies // Prog. Phys. Geogr. Earth Environ. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2019. Vol. 43, № 1. P. 129–143.
77. Chilvers B.L., Morgan K.J., White B.J. Sources and reporting of oil spills and impacts on wildlife 1970–2018 // Environ. Sci. Pollut. Res. Environmental Science and Pollution Research, 2021. Vol. 28, № 1. P. 754–762.

78. Zhang H.-Y., Ji Q., Fan Y. What drives the formation of global oil trade patterns? // *Energy Econ.* Elsevier, 2015. Vol. 49. P. 639–648.
79. Fingas M., Brown C. Review of oil spill remote sensing // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2014. Vol. 83, № 1. P. 9–23.
80. Rares S. Ships that changed the law: the Torrey Canyon disaster // *Lloyd's Marit. Commer. law Q.* Informa Law, 2018. № 3. P. 336–347.
81. Yin L. et al. The long-term prediction of the oil-contaminated water from the Sanchi collision in the East China Sea // *Acta Oceanol. Sin.* Springer, 2018. Vol. 37, № 3. P. 69–72.
82. English E. et al. Estimating the value of lost recreation days from the Deepwater Horizon oil spill // *J. Environ. Econ. Manage.* Elsevier, 2018. Vol. 91. P. 26–45.
83. Li X. et al. A probabilistic framework for risk management and emergency decision-making of marine oil spill accidents // *Process Saf. Environ. Prot.* Elsevier, 2022.
84. Yang C. et al. Fluorous metal–organic frameworks with superior adsorption and hydrophobic properties toward oil spill cleanup and hydrocarbon storage // *J. Am. Chem. Soc.* ACS Publications, 2011. Vol. 133, № 45. P. 18094–18097.
85. White H.K. et al. Impact of the Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico // *Proc. Natl. Acad. Sci. National Acad Sciences*, 2012. Vol. 109, № 50. P. 20303–20308.
86. Huettel M. Oil pollution of beaches // *Curr. Opin. Chem. Eng.* Elsevier, 2022. Vol. 36. P. 100803.
87. Yang J. et al. Characterization analysis and identification of common marine oil spill types using hyperspectral remote sensing // *Int. J. Remote Sens.* Taylor & Francis, 2020. Vol. 41, № 18. P. 7163–7185.
88. Nukapothula S. et al. Potential impact of the extensive oil spill on primary productivity in the Red Sea waters // *Cont. Shelf Res.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 222, № April. P. 104437.
89. Graham W.M. et al. Oil carbon entered the coastal planktonic food web during the Deepwater Horizon oil spill // *Environ. Res. Lett.* IOP Publishing, 2010. Vol. 5, № 4. P. 45301.

90. Asif Z. et al. Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 10, № 6. P. 762.
91. Wang Y. et al. Temperature and salinity effects in modeling the trajectory of the 2011 Penglai 19-3 oil spill // *Mar. Georesources Geotechnol. Taylor & Francis*, 2017. Vol. 35, № 7. P. 946–953.
92. Kahkashan S. et al. Evaluation of marine sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons along the Karachi coast, Pakistan, 11 years after the Tasman Spirit oil spill // *Chemosphere. Elsevier*, 2019. Vol. 233. P. 652–659.
93. Michel J. et al. Oil spill response-related injuries on sand beaches: when shoreline treatment extends the impacts beyond the oil // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2017. Vol. 576. P. 203–218.
94. Bejarano A.C., Michel J. Oil spills and their impacts on sand beach invertebrate communities: A literature review // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2016. Vol. 218. P. 709–722.
95. Prasad S.J. et al. Simulating the spatial and temporal distribution of oil spill over the coral reef environs along the southeast coast of Mauritius: A case study on MV Wakashio vessel wreckage, August 2020 // *J. Earth Syst. Sci. Springer*, 2022. Vol. 131, № 1. P. 1–10.
96. Loya Y., Rinkevich B. Effects of oil pollution on coral reef communities // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1980. Vol. 3, № 16. P. 180.
97. Guzman H.M., Kaiser S., Weil E. Assessing the long-term effects of a catastrophic oil spill on subtidal coral reef communities off the Caribbean coast of Panama (1985–2017) // *Mar. Biodivers. Springer*, 2020. Vol. 50, № 3. P. 1–19.
98. Fragoso ados Santos H. et al. Impact of oil spills on coral reefs can be reduced by bioremediation using probiotic microbiota // *Sci. Rep. Nature Publishing Group*, 2015. Vol. 5, № 1. P. 1–11.
99. Silva D.P. et al. Multi-domain probiotic consortium as an alternative to chemical remediation of oil spills at coral reefs and adjacent sites // *Microbiome. Springer*, 2021. Vol. 9, № 1. P. 1–19.
100. Edwards R., White I. The Sea Empress oil spill: environmental impact and recovery //

- International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1999. Vol. 1999, № 1. P. 97–102.
101. Boehm P.D. et al. Distribution and weathering of crude oil residues on shorelines 18 years after the Exxon Valdez spill // *Environ. Sci. Technol.* ACS Publications, 2008. Vol. 42, № 24. P. 9210–9216.
 102. Wardlaw G.D. et al. Disentangling oil weathering at a marine seep using GC× GC: Broad metabolic specificity accompanies subsurface petroleum biodegradation // *Environ. Sci. Technol.* ACS Publications, 2008. Vol. 42, № 19. P. 7166–7173.
 103. Fingas M. Introduction to Oil Chemistry and Properties // *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. 2015. 51–77 p.
 104. Fingas M. Introduction to spill modeling // *Oil spill science and technology*. Elsevier, 2011. № February 2015. P. 187–200.
 105. Hook S. et al. *Oil spill monitoring handbook*. Csiro Publishing, 2016.
 106. Simecek-Beatty D., Lehr W.J. Extended oil spill spreading with Langmuir circulation // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2017. Vol. 122, № 1–2. P. 226–235.
 107. Morales A.D., Rubio E.R., Martínez D.R. Numerical modeling of oil spills in the Gulf of Morrosquillo, Colombian Caribbean // *CT&F-Ciencia, Tecnol. y Futur.* 2022. Vol. 12, № 1. P. 69–83.
 108. ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation Technical Information Papers [Electronic resource] // London, UK. 2012. URL: www.itopf.com.
 109. Kotzakoulakis K., George S.C. *Advanced Oil Spill Modeling and Simulation Techniques // Oil Spill Occurrence, Simulation, and Behavior*. CRC Press, 2021. P. 225–264.
 110. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // *Oil on the Sea*. Springer, 1969. P. 53–63.
 111. Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface // *International oil spill conference*. American Petroleum Institute, 1971. Vol. 1971, № 1. P. 463–467.
 112. Lardner R., Zodiatis G. Modelling oil plumes from subsurface spills // *Mar. Pollut. Bull.*

- Elsevier, 2017. Vol. 124, № 1. P. 94–101.
113. Fingas M. Handbook of oil spill science and technology. John Wiley & Sons, 2014.
 114. Zafirakou A. Oil spill dispersion forecasting models // Monitoring of marine pollution. IntechOpen London, UK, 2018.
 115. Fingas M.F. A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation // J. Hazard. Mater. Elsevier, 1995. Vol. 42, № 2. P. 157–175.
 116. Fingas M.F. Studies on the Evaporation Regulation Mechanisms of Crude Oil and Petroleum Products // Adv. Chem. Eng. Sci. 2012. Vol. 2, № April. P. 246–256.
 117. Council N.R. Oil in the sea III: inputs, fates, and effects. National Academies Press (US), 2003.
 118. Xie H., Yapa P.D., Nakata K. Modeling emulsification after an oil spill in the sea // J. Mar. Syst. Elsevier, 2007. Vol. 68, № 3–4. P. 489–506.
 119. Horn M. Trajectory and Fate Modelling in Support of the ExxonMobil Eastern Newfoundland Offshore Exploration Drilling Project // RPS South Kingstown, RI, USA. 2018.
 120. Delvigne G.A.L., Sweeney C. Natural dispersion of oil // Oil Chem. Pollut. Elsevier, 1988. Vol. 4, № 4. P. 281–310.
 121. Reed M. et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 1999. Vol. 5, № 1. P. 3–16.
 122. Faksness L.-G., Brandvik P.J. Distribution of water soluble components from Arctic marine oil spills—a combined laboratory and field study // Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier, 2008. Vol. 54, № 2. P. 97–105.
 123. Spaulding M.L. A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling // Oil Chem. Pollut. 1988. Vol. 4, № 1. P. 39–55.
 124. Danchuk S., Willson C.S. Numerical modeling of oil spills in the inland waterways of the lower Mississippi river delta // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 2008. Vol. 2008, № 1. P. 887–891.

125. Abianeh O.S., Chen C.P. Modelling of evaporation and dissolution of multicomponent oil droplet in shallow water // *Adv. Comput. Methods Exp. Heat Transf.* 2012. Vol. 12, № 75. P. 231.
126. Ganjali S.T., Niknafs B.N., Khosravi M. Photooxidation of crude petroleum maltenic fraction in natural simulated conditions and structural elucidation of photoproducts // *J. Environ. Heal. Sci. Eng.* 2007. Vol. 4, № 1. P. 37–42.
127. Fernández-Varela R. et al. Monitoring photooxidation of the Prestige's oil spill by attenuated total reflectance infrared spectroscopy // *Talanta. Elsevier*, 2006. Vol. 69, № 2. P. 409–417.
128. Lee R.F. Photo-oxidation and photo-toxicity of crude and refined oils // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 2003. Vol. 8, № 2. P. 157–162.
129. McConkey B.J. et al. Natural sunlight induced photooxidation of naphthalene in aqueous solution // *Water. Air. Soil Pollut. Springer*, 2002. Vol. 136, № 1. P. 347–359.
130. Pérez Calderón L.J. Fate of spilled oil in marine sediments and the effects of chemical dispersant. University of Aberdeen, 2018.
131. Payne J.R., Clayton Jr J.R., Kirstein B.E. Oil/suspended particulate material interactions and sedimentation // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 2003. Vol. 8, № 2. P. 201–221.
132. Baawain M. et al. Recent progress in desalination, environmental and marine outfall systems // *Recent Prog. Desalination, Environ. Mar. Outfall Syst.* 2015. P. 1–347.
133. Poirier O.A., Thiel G.A. Deposition of free oil by sediments settling in sea water // *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. American Association of Petroleum Geologists (AAPG)*, 1941. Vol. 25, № 12. P. 2170–2180.
134. Owens E.H., Lee K. Interaction of oil and mineral fines on shorelines: review and assessment // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2003. Vol. 47, № 9–12. P. 397–405.
135. Lepo J.E. et al. The effect of amount of crude oil on extent of its biodegradation in open water-and sandy beach-laboratory simulations // *Environ. Technol. Taylor & Francis*, 2003. Vol. 24, № 10. P. 1291–1302.
136. Das N., Chandran P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an

- overview // *Biotechnol. Res. Int.* Hindawi Limited, 2011. Vol. 2011.
137. McGenity T.J. et al. Marine crude-oil biodegradation: a central role for interspecies interactions // *Aquat. Biosyst.* Springer, 2012. Vol. 8, № 1. P. 1–19.
 138. Ławniczak Ł. et al. Microbial degradation of hydrocarbons—basic principles for bioremediation: a review // *Molecules.* MDPI, 2020. Vol. 25, № 4. P. 856.
 139. Kostka J.E. et al. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in the deep sea // *Deep Oil Spills.* Springer, 2020. P. 107–124.
 140. Socolofsky S.A. et al. The treatment of biodegradation in models of sub-surface oil spills: A review and sensitivity study // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2019. Vol. 143. P. 204–219.
 141. Nelson J.R., Grubestic T.H. Oil spill modeling: Mapping the knowledge domain // *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* SAGE Publications Sage UK: London, England, 2020. Vol. 44, № 1. P. 120–136.
 142. Remyalekshmi R., Hegde A.V. Numerical modeling of oil spill movement along north-west coast of India using GNOME // *Int. J. Ocean Clim. Syst.* SAGE Publications Sage UK: London, England, 2013. Vol. 4, № 1. P. 75–86.
 143. Fingas M. Chapter 8 - Introduction to Spill Modeling / ed. Fingas M.B.T.-O.S.S. and T. (Second E. Boston: Gulf Professional Publishing, 2017. P. 419–453.
 144. Zodiatis G. et al. Oil spill forecasting (prediction) // *J. Mar. Res.* Sears Foundation for Marine Research, 2017. Vol. 75, № 6. P. 923–953.
 145. Chen H. et al. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout // *Ocean Eng.* Elsevier, 2015. Vol. 110. P. 227–243.
 146. Daniel P. et al. Drift modeling of cargo containers // *Spill Sci. Technol. Bull.* Elsevier, 2002. Vol. 7, № 5–6. P. 279–288.
 147. Carracedo P. et al. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2006. Vol. 53, № 5–7. P. 350–360.

148. French-McCay D.P. Oil spill impact modeling: Development and validation // Environ. Toxicol. Chem. 2004. Vol. 23, № 10. P. 2441–2456.
149. Etkin D.S. et al. Modeling of response, socioeconomic, and natural resource damage costs for hypothetical oil spill scenarios in San Francisco Bay. 2002.
150. Crowley D. et al. Modeling subsurface dispersant applications for response planning and preparation // International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute, 2014. Vol. 2014, № 1. P. 933–948.
151. Yapa P.D., Li Z. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development // J. Hydraul. Res. Taylor & Francis, 1997. Vol. 35, № 5. P. 673–688.
152. Reed M. et al. OSCAR2000: a multi-component 3-dimensional oil spill contingency and response model. 2000.
153. Spaulding M.L. et al. OILMAP: A global approach to spill modeling. 1992.
154. Lima J.A. et al. Development of oil spill scenarios for contingency planning along the Brazilian coast // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 2003. Vol. 2003, № 1. P. 947–953.
155. Belore R. The SL Ross oil spill fate and behavior model: SLROSM // Spill Sci. Technol. Bull. 2005.
156. Ju X. et al. Mathematical Physics Modelling and Prediction of Oil Spill Trajectory for a Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) System // Adv. Math. Phys. Hindawi, 2022. Vol. 2022.
157. Biglane K.E. A history of major oil spill incidents // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1969. Vol. 1969, № 1. P. 5–6.
158. Liu Z. et al. Research on transport and weathering of oil spills in Jiaozhou Bight, China // Reg. Stud. Mar. Sci. Elsevier, 2022. Vol. 51. P. 102197.
159. Lehr W. et al. A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 1984. Vol. 15, № 9. P. 326–329.

160. Elliott A.J. EUROSPILL: oceanographic processes and NW European shelf databases // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 1991. Vol. 22, № 11. P. 548–553.
161. Beegle-Krause C.J. GNOME: NOAA's next-generation spill trajectory model // *Oceans' 99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008). IEEE*, 1999. Vol. 3. P. 1262–1266.
162. Buranapratheprat A. Oil spill trajectory model testing in the upper Gulf of Thailand // *Proceedings International Workshop on Environmental Sensitivity Index Mapping for Oil Spill in the Southeast Asian Seas*. 2000. P. 142–152.
163. Chao X., Shankar N.J., Cheong H.F. Two-and three-dimensional oil spill model for coastal waters // *Ocean Eng. Elsevier*, 2001. Vol. 28, № 12. P. 1557–1573.
164. Bergueiro J.R. et al. Simulation of oil spills at the Casablanca platform (Tarragona, Spain) under different environmental conditions // *J. Marit. Res.* 2006. Vol. 3, № 1. P. 55–71.
165. Papadimitrakis J. et al. Simulating the fate of an oil spill near coastal zones: The case of a spill (from a power plant) at the Greek Island of Lesbos // *Environ. Model. Softw. Elsevier*, 2006. Vol. 21, № 2. P. 170–177.
166. Vethamony P. et al. Trajectory of an oil spill off Goa, eastern Arabian Sea: Field observations and simulations // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2007. Vol. 148, № 2. P. 438–444.
167. Elhakeem A.A., Elshorbagy W., Chebbi R. Oil spill simulation and validation in the Arabian (Persian) Gulf with special reference to the UAE coast // *Water. Air. Soil Pollut. Springer*, 2007. Vol. 184, № 1. P. 243–254.
168. Díaz B., Pavón A., Gómez-Gesteira M. Use of a probabilistic particle tracking model to simulate the Prestige oil spill // *J. Mar. Syst. Elsevier*, 2008. Vol. 72, № 1–4. P. 159–166.
169. Guo W.J., Wang Y.X. A numerical oil spill model based on a hybrid method // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2009. Vol. 58, № 5. P. 726–734.
170. Liao G., Li M. Numerical prediction of oil spill trajectory and fate in pearl river estuary // *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. IEEE*, 2010. P. 2153–2157.

171. Liu Y. et al. Trajectory forecast as a rapid response to the Deepwater Horizon oil spill // *Monit. Model. Deep. Horiz. Oil Spill A Rec. Enterp. Geophys. Monogr. Ser.* 2011. Vol. 195. P. 153–165.
172. Mariano A.J. et al. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill // *Dyn. Atmos. Ocean.* Elsevier, 2011. Vol. 52, № 1–2. P. 322–340.
173. Cucco A. et al. A high-resolution real-time forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea) // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2012. Vol. 64, № 6. P. 1186–1200.
174. Quang T.D., Don N.C., Ching C.Y. TRAJECTORY MODELING OF MARINE OIL SPILLS: CASE STUDY OF LACH HUYEN PORT, VIETNAM // *Lowl. Technol. Int.* International Association of Lowland Technology, 2013. Vol. 15, № 2. P. 41–55.
175. Prabhu K., Kankara R.S. Development of matlab based system to simulate oil spill trajectory using GNOME model for Indian coast. 2014. P. 5–7.
176. Liu X. et al. Modelling of oil spill trajectory for 2011 Penglai 19-3 coastal drilling field, China // *Appl. Math. Model.* Elsevier, 2015. Vol. 39, № 18. P. 5331–5340.
177. Toz A.C., Koseoglu B., Sakar C. Numerical modelling of oil spill in New York Bay // *Arch. Environ. Prot.* 2016. Vol. 42, № 4.
178. Yu F. et al. A hindcast method to simulate oil spill trajectories for the Bohai Sea, Northeast China // *Ocean Eng.* Elsevier, 2016. Vol. 124. P. 363–370.
179. Lu J. et al. Modelling the transport of oil after a proposed oil spill accident in Barents Sea and its environmental impact on Alke species // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Publishing, 2017. Vol. 82, № 1. P. 12010.
180. Li X., Chen G., Zhu H. Modelling and assessment of accidental oil release from damaged subsea pipelines // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2017. Vol. 123, № 1–2. P. 133–141.
181. Qiao F. et al. Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill // *Sci. Total Environ.* Elsevier, 2019. Vol. 685. P. 856–866.
182. Soussi A. et al. An oil spill trajectory model: validation in the Mediterranean Sea // 2019

- International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE, 2019. P. 1–6.
183. Zhen Z. et al. Trajectory and weathering of oil spill in Daya bay, the South China sea // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2020. Vol. 267. P. 115562.
 184. Prasad S.J. et al. Oil spill trajectory prediction with high-resolution ocean currents // *J. Oper. Oceanogr. Taylor & Francis*, 2020. Vol. 13, № 2. P. 84–99.
 185. Lawan M.S. Oil Spill Trajectory and Fate Modelling at the Bahamas Caribbean: Theoretical Framework // *J. Env. Pollut Manag.* 2020. Vol. 2. P. 206.
 186. Hosseinpour V., Farzingohar M., Kabiri K. Physical Parameters Impact on Oil Spill Trajectory By GNOME Around Siri Island // *J. Environ. Sci. Stud.* 2020. Vol. 5, № 4. P. 3150–3154.
 187. Balogun A.-L.L. et al. Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2021. Vol. 268. P. 115812.
 188. Naz S. et al. Marine oil spill detection using synthetic aperture radar over Indian Ocean // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2021. Vol. 162. P. 111921.
 189. Pradhan B., Das M., Pradhan C. Trajectory modelling for hypothetical oil spill in Odisha offshore, India // *J. Earth Syst. Sci. Springer*, 2022. Vol. 131, № 4. P. 1–15.
 190. Grubestic T.H., Nelson J.R. Estimating potential oil spill trajectories and coastal impacts from near-shore storage facilities: A case study of FSO Nabarima and the Gulf of Paria // *Int. J. Disaster Risk Reduct. Elsevier*, 2022. Vol. 78. P. 103117.
 191. Akinbamini O.E., Anifowose B., Obioma E.C. Oil Spill Modeling for the Mariner Oil Field, East of Shetland, United Kingdom, North Sea // *J. Environ. Eng. American Society of Civil Engineers*, 2022. Vol. 148, № 8. P. 4022037.
 192. Rasul N. The Red Sea: The Formation, Morphology, Oceanography and Environment of a Young Ocean Basin // 2015. *springer*, 2015. 1–28 p.
 193. Eladawy A. et al. Estimating the Mean Circulation and Water Exchange of the Gulf of Suez-Red Sea via a Validated One-Way Atmospheric-Hydrodynamic Coupled Model // *Earth Syst. Environ. Springer International Publishing*, 2018. Vol. 2, № 2. P. 213–231.

194. Barakat A.O. et al. Application of petroleum hydrocarbon chemical fingerprinting in oil spill investigations—Gulf of Suez, Egypt // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 2002. Vol. 7, № 5–6. P. 229–239.
195. France-Presse A. Record Cargo Shipped Through Egypt’s Suez Canal Last Year // *VOAnews*. 2022.
196. Kostianaia E.A. et al. Oil Pollution in the Northern Red Sea: A Threat to the Marine Environment and Tourism Development // *Environ. Remote Sens. Egypt. Springer Nature*, 2020. P. 329–362.
197. Hanna R.G.M. An approach to evaluate the application of the vulnerability index for oil spills in tropical Red Sea environments // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 1995. Vol. 2, № 2–3. P. 171–186.
198. Mittal H.V.R. et al. Hazard assessment of oil spills along the main shipping lane in the Red Sea // *Sci. Rep. Nature Publishing Group*, 2021. Vol. 11, № 1. P. 1–14.
199. O’Rourke D., Connolly S. Just oil? The distribution of environmental and social impacts of oil production and consumption // *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. Vol. 28. P. 587–617.
200. Bashat H. Challenges of oil spill response in Egyptian coastal zone overlooking the mediterranean and the red sea // *2005 Int. Oil Spill Conf. IOSC 2005*. 2005. P. 11498–11504.
201. MarineTraffic. Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:32.1/centery:30.4/zoom:8> (accessed: 15.04.2022).
202. Shehadeh M. et al. A study of the behavior of oil spill from an offshore rig in Red Sea region // *North Africa Technical Conference and Exhibition. OnePetro*, 2012.
203. Johansen O. The Halten Bank experiment-observations and model studies of drift and fate of oil in the marine environment // *Proceedings of the 11th Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Techn. Seminar. Environment Canada*. 1984. P. 18–36.
204. Simecek-Beatty D., Lehr W.J. Trajectory modeling of marine oil spills // *Oil spill environmental forensics. Academic Press, Burlington, MA*, 2007. P. 405–418.

205. Lebreton L.C.-M., Franz T. Trajectory analysis of deep sea oil spill scenarios in New Zealand waters // Greenpeace, New Zealand, Pg. 2013. Vol. 3.
206. Jones R.K. A simplified pseudo-component oil evaporation model // Proc. Twent. Arct. Mar. Oilspill Progr. Tech. Semin. Environ. Canada, Emergencies Sci. Div. Ottawa, Canada. 1997. P. 43–61.
207. Lyman W.J., Reehl W.F., Rosenblatt D.H. Handbook of chemical property estimation methods. Washington, DC (USA); American Chemical Society, 1990.
208. Stiver W., Mackay D. Evaporation Rate of Spills of Hydrocarbons and Petroleum Mixtures // Environ. Sci. Technol. 1984. Vol. 18, № 11. P. 834–840.
209. Eley D.D., Hey M.J., Symonds J.D. Emulsions of water in asphaltene-containing oils 1. Droplet size distribution and emulsification rates // Colloids and surfaces. Elsevier, 1988. Vol. 32. P. 87–101.
210. Thorpe S.A., Humphries P.N. Bubbles and breaking waves // Nature. Nature Publishing Group, 1980. Vol. 283, № 5746. P. 463–465.
211. Holthuijsen L.H., Herbers T.H.C. Statistics of breaking waves observed as whitecaps in the open sea // J. Phys. Oceanogr. 1986. Vol. 16, № 2. P. 290–297.
212. Toba Y. et al. Study of the air-sea boundary processes at the Shirahama Oceanographic Tower Station // Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Ann. B. 1971. Vol. 14. P. 519–531.
213. Ding L., Farmer D.M. Observations of breaking surface wave statistics // J. Phys. Oceanogr. 1994. Vol. 24, № 6. P. 1368–1387.
214. W. Lehr, Simecek-Beatty D. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 2000. Vol. 6, № 3–4. P. 247–253.
215. Wessel P., Smith W.H.F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophys. Res. Solid Earth. Wiley Online Library, 1996. Vol. 101, № B4. P. 8741–8743.
216. Lea D.J. et al. Assessing a new coupled data assimilation system based on the Met Office

- coupled atmosphere–land–ocean–sea ice model // *Mon. Weather Rev.* 2015. Vol. 143, № 11. P. 4678–4694.
217. Nour H.E. et al. Assessment of sediment quality using different pollution indicators and statistical analyses, Hurghada area, Red Sea coast, Egypt // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2018. Vol. 133. P. 808–813.
218. Abo-Taleb H. et al. Biodiversity of Calanoida Copepoda in Different Habitats of the North-Western Red Sea (Hurghada Shelf) // *Water. MDPI*, 2020. Vol. 12, № 3. P. 656.
219. Ghallab A. et al. Distribution and Diversity of Living Natural Resources from the Most Northern Red Sea Islands, Egypt: I-Hard and Soft Corals // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH)*, 2020. Vol. 24, № 5. P. 125–145.
220. Independent E. Repeated Red Sea oil spills forces Environment Minister to take action. 2017.
221. Mohamed T.A.A., Mohamed A.M. Some ecological factors affecting coral reef assemblages off Hurghada, Red Sea, Egypt. Alexandria: National Oceanography and Fisheries, 2005.
222. El Saman M.I. Global warming and decadal trends of sea surface temperature in Hurghada, Red Sea, Egypt // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH)*, 2022. Vol. 26, № 3. P. 247–259.
223. Dhaka A., Chattopadhyay P. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills // *J. Environ. Manage. Elsevier*, 2021. Vol. 288. P. 112428.
224. Dong J. et al. Climate Change Impacts on Coastal and Offshore Petroleum Infrastructure and the Associated Oil Spill Risk: A Review // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 10, № 7. P. 849.
225. Frihy O.E. et al. The role of fringing coral reef in beach protection of Hurghada, Gulf of Suez, Red Sea of Egypt // *Ecol. Eng. Elsevier*, 2004. Vol. 22, № 1. P. 17–25.
226. Keramea P. et al. Operational Modeling of North Aegean Oil Spills Forced by Real-Time Met-Ocean Forecasts // *J. Mar. Sci. Eng. MDPI*, 2022. Vol. 10, № 3. P. 411.
227. Yildiz S. et al. Modelling of possible tanker accident oil spills in the Istanbul Strait in order

- to demonstrate the dispersion and toxic effects of oil pollution // *Environ. Monit. Assess.* Springer, 2021. Vol. 193, № 8. P. 1–19.
228. Mahdy A. et al. Status of Seagrass community in Northern Protected Islands, Hurghada, Red Sea, Egypt // *Aquat. Sci. Fish Resour.* Suez University, Faculty of Fish Resources, 2021. Vol. 2. P. 1–8.
229. Das K., Mukherjee A.K. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India // *Bioresour. Technol.* Elsevier, 2007. Vol. 98, № 7. P. 1339–1345.
230. Pacwa-Płociniczak M. et al. Environmental applications of biosurfactants: recent advances // *Int. J. Mol. Sci. Molecular Diversity Preservation International (MDPI)*, 2011. Vol. 12, № 1. P. 633–654.
231. Dave D., Ghaly A.E. Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis // *Am. J. Environ. Sci.* Citeseer, 2011. Vol. 7, № 5. P. 423.
232. Fathalla E.M. Degradation of crude oil in the environment: toxicity arising through photochemical oxidation in the aqueous phase. Citeseer, 2007.
233. Hafez R.M., Madney I. Suez Canal Region as an economic hub in Egypt location analysis for the mass real estate appraisal process // *HBRC J.* Taylor & Francis, 2020. Vol. 16, № 1. P. 59–75.
234. I Khedr A. et al. Water Quality Assessment of the northern part of Suez Gulf (Red Sea, Egypt), using Principal Component Analysis. // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish.* The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH), 2019. Vol. 23, № 4. P. 527–538.
235. Bozkurtoğlu Ş.N.E. Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. Vol. 123, № 1–2. P. 57–72.
236. Zeinstra-Helfrich M., Murk A.J. Effects of Oil Properties and Slick Thickness on Dispersant Field Effectiveness and Oil Fate // *Deep Oil Spills.* Springer, 2020. P. 155–169.
237. Suez Canal Authority. About Suez Canal [Electronic resource]. 2019. URL:

<https://www.suezcanal.gov.eg/English/About/SuezCanal/Pages/NewSuezCanal.aspx>
(accessed: 22.04.2022).

238. Hamed M. et al. Physico-chemical characteristics of Suez Bay water during 2006-2007 // Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH), 2010. Vol. 14, № 1. P. 43–57.
239. General Authority for Red Sea Ports. Zytyat port- [Electronic resource]. 2020. URL: <http://www.rspa.gov.eg/port-zytyat.html> (accessed: 25.04.2022).
240. Le Hénaff M. et al. Surface evolution of the Deepwater Horizon oil spill patch: combined effects of circulation and wind-induced drift // Environ. Sci. Technol. ACS Publications, 2012. Vol. 46, № 13. P. 7267–7273.
241. Reed M., Turner C., Odulo A. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 1994. Vol. 1, № 2. P. 143–157.
242. Kim T.-H. et al. Analysis of the contribution of wind drift factor to oil slick movement under strong tidal condition: Hebei Spirit oil spill case // PLoS One. Public Library of Science San Francisco, USA, 2014. Vol. 9, № 1. P. e87393.
243. Lee K.-H., Kim T.-G., Cho Y.-H. Influence of Tidal Current, Wind, and Wave in Hebei Spirit Oil Spill Modeling // J. Mar. Sci. Eng. MDPI, 2020. Vol. 8, № 2. P. 69.
244. Authority E.M. Climatic Atlas of Egypt: Cairo // Egypt, Egypt. Meteorol. Authority, Minist. Transp. Commun. 1996.
245. Abdallah A. Monitoring Environmental Changes in El-Ain El-Sokhna Area, Gulf of Suez, Egypt // Nine conference for geographical and GIS Department, Faculty of Arts, Alexandria University. 2007.

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ИБРАХЕМ МОХАМЕД АБД АЛЛАХ МОХАМЕД АБД ЭЛЬМОАТИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТРАЕКТОРИЙ И
СОСТАВА РАЗЛИВОВ НЕФТИ В СУЭЦКОМ ЗАЛИВЕ

Научная специальность: 1.6.17. Океанология

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Перевод с английского

Научный руководитель:
Кандидат Географических наук
В. Ю. Чанцев

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

Введение.....	129
Глава 1. Обзор поведения разливов нефти в море.....	137
1.1. Разливы нефти в море	137
1.2. Основные причины морских нефтяных разливов	139
1.3. Аварии на разливах нефти.....	141
1.4. Воздействие разливов нефти на морскую среду	143
1.5. Поведение разлитой нефти в морской среде	145
1.5.1. Растекание нефти.....	147
1.5.2. Дрейф (горизонтальное перемещение нефтяных пятен).....	148
1.5.3. Испарение.....	149
1.5.4. Эмульгирование.....	150
1.5.5. Естественная дисперсия.....	151
1.5.6. Растворение.....	152
1.5.7. Фотоокисление	152
1.5.8. Осадкообразование	153
1.5.9. Биодegradация	154
1.6. Обзор моделирования нефтяных разливов	155
1.6.1. Определение и цель.....	155
1.6.2. Важность моделирования морских разливов нефти	156
1.6.3. Примеры программного обеспечения для моделирования разливов нефти	157
1.6.4. Предшествующие исследования.....	159
Глава 2. Используемая методология и данные	167
2.1. Суэцкий залив.....	167
2.2. Модель разлива нефти GNOME.....	172
2.2.1. Обзор и описание модели	172
2.2.2. Движущие силы.....	174
2.2.3. Движущие силы морского течения.....	176

2.2.4. Диффузия	176
2.2.5. Выбрасывание на берег.	178
2.2.6. Траектории разливов нефти	179
2.3. ADIOS2 Модель выветривания разливов нефти	180
2.3.1. Испарение нефти	181
2.3.2. Эмульгирование нефти	182
2.3.3. Дисперсия нефти	182
2.4. Формулирование модели и ввод данных	184
2.4.1. Данные о береговой линии и температуре поверхности моря.....	185
2.4.2. Данные о ветре.....	186
2.4.3. Данные о морском течении	186
2.4.4. Объем разлива и тип нефти	187
Глава 3. Моделирование траектории и судьбы разлива нефти у города Хургада	188
3.1. Район исследований	188
3.2. Формулирование модели и допущения.....	190
3.3. Результаты.....	192
3.3.1. Сценарий №1 траектория и выветривание	192
3.3.2. Сценарий №2 траектория и выветривание	196
3.4. Обсуждение.....	199
3.5. Выводы	201
Глава 4. Моделирование движения и судьбы разливов нефти у порта Айн-Сухна	203
4.1. Район исследований	203
4.2. Формулирование модели и допущения.....	204
4.3. Результаты.....	206
4.3.1. Сценарий №1 траектория и выветривание	206
4.3.2. Сценарий №2 траектория и выветривание	208
4.4. Обсуждение.....	211

4.5. Выводы	214
Глава 5. Моделирование пути и поведения разлива нефти у южного входа в Суэцкий канал	215
5.1. Район исследований	215
5.2. Формулирование модели и допущения.....	217
5.3. Результаты.....	218
5.3.1. Сценарий №1 траектория и выветривание	218
5.3.2. Сценарий №2 траектория и выветривание	221
5.3.3. Сценарий №3 траектория и выветривание	223
5.3.4. Сценарий №4 траектория и выветривание	225
5.4. Обсуждение.....	227
5.5. Выводы	229
Заключение.....	231
Список рисунков	235
Список таблиц.....	239
Благодарности	241
Список литературы	242

Введение

Актуальность темы исследования

Мировой спрос на сырую нефть продолжает расти, несмотря на нынешние попытки перейти на устойчивые источники энергии и возобновляемые виды топлива [1,2]. В последнее время этот спрос вырос из-за санкций, накладываемых западными странами на Россию. По словам Роберта Перкинса (Robert Perkins) [3], мировой спрос на нефть вырос на 3,3 миллиона баррелей в день в 2022 году. Таким образом, значительное увеличение объемов добычи и транспортировки нефти приводит к продолжению инцидентов с утечками или разливами [4]. Разлив нефти – это случайный сброс сырой нефти и нефтепродуктов в природную среду [5,6]. Аварии танкеров, столкновения судов, разрывы или утечки трубопроводов, взрывные скважины, взрывы глубоководного бурения и деятельность по переработке являются наиболее распространенными причинами разливов нефти в морскую среду [7–9].

За последние несколько десятилетий во всем мире произошло несколько крупных и незначительных морских разливов нефти (например, Exxon Valdez 1989, Gulf War 1991, Prestige 2002, Hebei Spirit 2007, Deepwater Horizon 2010, MV MSC Chitra 2010, Sanchi 2018) [10]. Разливы нефти в морскую среду могут вызвать неблагоприятное воздействие и нанести ущерб морской биологической системе [11,12]. В отдельных случаях проблемы могут быть вызваны для прибрежной инфраструктуры (туристические курорты, порты и пристани для яхт) и отраслей, которые полагаются на забор морской воды (морская добыча соли, прибрежные электростанции и опреснительные установки) [13].

Когда нефть просачивается в морскую воду, она претерпевает ряд химических и физических преобразований, в совокупности известных как выветривание [14–16]. Наиболее заметными процессами выветривания разливов нефти являются испарение, естественная дисперсия и эмульгирование [17]. В последние годы, общественные требования к устойчивому экологическому состоянию морской среды вынудили правительства

разрабатывать надлежащие и эффективные планы действий в чрезвычайных ситуациях с разливами нефти [18]. Оценка воздействия разливов нефти на уязвимые районы необходима для разработки эффективных планов ликвидации разливов нефти. Эти планы могут быть реализованы с использованием прогностических математических моделей для моделирования траектории и поведения нефтяных пятен [19].

Численные модели предсказывают движение разлитой нефти, которое управляется внешними силами, такими как течения, волны и ветры, учитывая физико-химические процессы нефти (процессы выветривания) [20–22]. Эти модели могут быть использованы для разработки систем планирования реагирования на чрезвычайные ситуации и оперативного прогнозирования, поскольку они предоставляют информацию для определения потенциальных регионов, пострадавших от разливов нефти. Во всем мире были предприняты различные усилия для моделирования движения разливов нефти в реальных и гипотетических ситуациях. Некоторые из наиболее широко используемых моделей разливов нефти, способных прогнозировать траекторию и судьбу разливов нефти: Общая среда оперативного моделирования NOAA (GNOME) [23], Автоматизированный запрос данных о разливах нефти (ADIOS2) [24,25], Delft3D-PART [22], Комплексная глубоководная модель нефти и газа (CDOG) [26,27], Модель непредвиденных ситуаций и реагирования на разливы нефти (OSCAR) [28,29], OILMAP [30], глубоководная система моделирования и анализа разливов нефти (OILMAPDEEP) [31–33], интегрированная система воздействия разливов нефти (SIMAP) [34–36], калькулятор разливов нефти Texas A&M (TAMOC) [37,38], модель переноса частиц (OILTRANS) [39], MEDSLIK-II [40] и OpenOil [41,42].

В представленном исследовании использовались две наиболее широко используемые модели: Общее национальное управление океанических и атмосферных исследований (General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Oil Modeling Environment) (GNOME) и Автоматизированный запрос данных о разливах нефти (Automated Data Inquiry for Oil Spills) (ADIOS2). Модель GNOME была разработана NOAA's Hazardous Materials Response (HAZMAT) и дебютировала 16 марта 1999 [43]. Модель GNOME двумерна и более обобщаема, чем другие модели, и требует меньшего количества параметров в качестве входных данных [44]. Эта двумерная модель часто используется в

морских, прибрежных и речных средах для прогнозирования движения разлитой нефти [44,45]. Мы выбрали инструмент моделирования GNOME из-за его истории оперативной реализации и проверки на соответствие реальным экологическим катастрофам и его широкого использования среди организаций [1,46]. Кроме того, модель обеспечивает выходные данные траектории с географической привязкой, которые могут быть использованы в качестве входных данных для инструментов ГИС (географической информационной системы) [47]. Кроме того, результаты GNOME для многих ситуаций продемонстрировали значительную степень соответствия между моделированием моделей, спутниковыми данными и экспериментальными наблюдениями, что было подтверждено несколькими исследованиями [45,48]. В результате Морской центр экстренной взаимопомощи рекомендовал использовать модель GNOME для моделирования разливов нефти в Персидском заливе [49].

Автоматизированный запрос данных о разливах нефти (ADIOS2) – это модель разливов нефти, разработанная NOAA. Она имитирует процессы, связанные с выветриванием нефти, включая испарение, естественную дисперсию и эмульгирование [50]. Мы выбрали инструмент моделирования ADIOS2, потому что он сочетает в себе библиотеку из около 1000 видов нефти с краткосрочной моделью судьбы нефти и очисткой, чтобы помочь в оценке того, как долго разлившаяся нефть будет сохраняться в морской среде и разработке методов очистки. Кроме того, данные ADIOS2 объединяют данные о погоде в режиме реального времени (скорость ветра) с данными о химических и физических свойствах из своей библиотеки нефти [51]. К тому же, коды ADIOS2 доступны для многих акваторий, таких как открытое море, прибрежные воды, полузатопленные прибрежные воды, эстуарии, реки, озера и водохранилища [52].

Судоходство является наиболее распространенным методом транспортировки сырой нефти во всем мире, что имеет экономические и экологические преимущества [53,54]. В связи с увеличением количества судов, интенсивности движения и усилением портовых операций, вероятность аварий, приводящих к разливам нефти, возрастает [54,55]. Во всем мире произошло несколько крупных и незначительных аварий с разливами нефти с танкеров [10]. Крупнейшим разливом с нефтяного танкера стал (ABT Summer) у берегов Анголы в

Западной Африке, произошедший в мае 1991 года. В результате в море было выпущено около 2 миллионов баррелей тяжелой нефти, занимая площадь около 80 квадратных миль [56]. Самый последний разлив нефти во время написания этого исследования произошел с танкера, перевозившего 750 тонн дизельного топлива из Египта на Мальту, который затонул в заливе Габес у юго-восточного побережья Туниса из-за плохой погоды в апреле 2022 года [57]. По данным Международной федерации владельцев танкеров (The International Tanker Owners Pollution Federation) (ИТОПФ) [58], общий объем сырой нефти, разлитой в морскую среду из-за инцидентов с танкерами в 2021 году, составил около 10 000 тонн.

Суэцкий залив (СЗ) и Суэцкий канал являются важнейшими судоходными маршрутами для Египта и всего мира. Примерно 15% всей мировой морской торговли и 10% морской нефти ежегодно проходят через СЗ и Суэцкий канал. После того, как Европа стала настаивать на отказе от российской нефти [59], вырос спрос со стороны Катара и Саудовской Аравии, что увеличило количество судов, перевозящих нефть по Красному морю и через Суэцкий канал. Следовательно, вероятность аварий, приводящих к разливам нефти, возрастет [54,55]. С 1970-х годов произошло несколько аварий с разливами нефти в Суэцком заливе, что нанесло значительный ущерб береговой линии и коралловым рифам. Крупнейшая авария с разливом нефти произошла в 1982 году, когда при загрузке танкера на территории Рас-Шукейр, примерно в 110 километрах к северу от Хургады, в воду вытекли десятки тысяч тонн сырой нефти [60,61].

Разливы нефти в Красном море могут иметь ряд различных последствий, в зависимости от размера и места разлива. Некоторые из потенциальных воздействий включают:

- Повреждение коралловых рифов и других морских сред обитания, что может оказать долгосрочное воздействие на биоразнообразие региона.
- Вред морским млекопитающим, рыбам и птицам, что может привести к сокращению популяции или даже вымиранию.
- Загрязнение пляжей и береговых линий, что может оказать негативное влияние на туризм и отдых.
- Нарушение рыболовства и других отраслей прибрежной промышленности, что может оказать значительное экономическое воздействие на местные сообщества.

- Препятствие морскому маршруту через Суэцкий канал.

Разливы нефти непосредственно влияют на национальную экономику из-за потенциального экологического ущерба и соответствующего негативного влияния на туризм [62]. Несмотря на высокую судоходную активность и потенциальную возможность подвергнуться воздействию нефтяных разливов в водах Египта, лишь в нескольких опубликованных научных работах были предсказаны траектории разливов [61–65]. Таким образом, отсутствие надежных исторических записей о разливах нефти, слабый мониторинг и минимальные меры реагирования на разливы увеличивают эту угрозу. Поскольку защита прибрежной зоны от разливов нефти является приоритетной задачей для Египта, Египет должен иметь эффективную стратегию реагирования на разливы нефти для борьбы с загрязнением от прибрежных и морских разливов нефти. Моделирование движения и поведения нефтяных разливов необходимо перед началом любой стратегии реагирования [66].

Цель исследования

Целью исследования является изучение путей распространения и трансформации разливов нефти в результате аварийных утечек с танкеров в Суэцком заливе, особенно в трех важнейших районах: Хургада, порт Айн Сухна и южный вход в Суэцкий канал. Кроме того, определить потенциальные районы, которые в будущем могут пострадать от аварийных разливов нефти в Суэцком заливе.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Сбор исходных данных, необходимых для моделирования распространения и судьбы разлива.
2. Оценить характер распространения и судьбы нефтяных разливов в Суэцком заливе перед тремя критическими районами: Хургадой, портом Айн-Сухна и южным входом в Суэцкий канал.
3. Оценка количества нефти, которое достигает берега, и того, сколько остается на плаву в воде после разлива нефти.

4. Определение потенциальных районов, наиболее пострадавших от аварийных разливов нефти в Суэцком заливе.

Положения, выносимые на защиту

1. Оценка уязвимости берегов в регионе Хургады, включая северные острова Красного моря (Ашрафи, Малый Губал, Гейсум, Тавила, Шадван и Гифтон) в результате аварийных разливов нефти.
2. Результат анализа возможных последствий разливов нефти на судоходной трассе в пяти километрах от порта Айн Сухна, возникающих в регионе, где расположено множество туристических курортов и различные коралловые рифы.
3. Оценка возможного распространения нефти в направлении экономических структур и туристических курортов в различных регионах Суэцкого залива, разлившейся у южного входа Суэцкого канала.
4. Результат расчёта объемов вероятных выбросов нефти на берег и протяжённости береговой линии, подверженной загрязнению.

Научная новизна результатов

1. Впервые была проведена оценка возможного распространения и судьбы нефтяных пятен вблизи южного входа в Суэцкий канал и порта Айн Сухна на основе совместной работы модели GNOME и ADIOS2.
2. Впервые определены регионы, наиболее подверженные загрязнению нефтью в случае аварии с разливом нефти у побережья Хургады.
3. Модель GNOME была впервые использована для расчета количества нефти, которая будет накапливаться на берегах (beaching) Суэцкого залива.

Практическая значимость работы

Моделирование распределения и поведения нефтяного пятна в Суэцком заливе с помощью математических моделей разлива нефти имеет практическое значение в нескольких областях. Во-первых, исследование может помочь в улучшении

планирования мер реагирования, поскольку оно дает представление о потенциальном движении и распространении нефти в случае разлива, позволяя лучше подготовиться и спланировать меры реагирования для минимизации последствий разлива. Во-вторых, исследование может быть использовано для оценки риска разливов нефти в Суэцком заливе, что позволит заинтересованным сторонам оценить вероятность и серьезность разлива нефти и принять меры по снижению рисков. В-третьих, исследование может предоставить важную информацию для политиков, чтобы они могли принимать обоснованные решения относительно правил и политики по предотвращению и ликвидации разливов нефти, тем самым защищая окружающую среду и местные средства к существованию. Наконец, исследование может внести вклад в оценку воздействия на окружающую среду перспективных нефтегазовых проектов в Суэцком заливе путем моделирования разливов нефти в различных условиях, что позволит оценить потенциальное воздействие разлива на окружающую среду и принять обоснованные решения о целесообразности реализации проекта в данном районе. Таким образом, практическая значимость данного исследования значительна и может иметь широкие последствия для улучшения планирования мер реагирования, оценки рисков, выработки политики и оценки воздействия на окружающую среду.

Список публикаций

Результаты были опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

1. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Simulating oil spill movement and behavior: a case study from the Gulf of Suez, Egypt // *Model. Earth Syst. Environ.* Springer, 2022, 8, p: 4553–4562 [67]
<https://doi.org/10.1007/s40808-022-01449-9>
2. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Modeling marine oil spill trajectory and fate off Hurghada, Red Sea coast, Egypt // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish.* Elsevier, 2022. 26(6), p: 41-61 [68]
<https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.269676>

3. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Simulation of Oil Spill Trajectory and Fate at the Southern Entrance of the Suez Canal, Red Sea, Egypt. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 1, 63–79 [69]. <https://doi.org/10.48612/fpg/hg4a-1ht8-db7d>

Список конференций

Результаты были доложены на следующих научных конференциях:

- 1) The 2ND International Conference of Geo-Sciences & Environment (2nd ICGSE2022) September 17 and 18, 2022 Mascara, Algeri. Oral communication (Modeling oil spill trajectory and fate using GNOME and ADIOS models in the Gulf of Suez, Egypt) (https://www.univ-mascara.dz/evenementscientifique/pages/pres_evenement_en.php?q3=26)
- 2) XXVII Международной научно-практической конференции, Состоявшейся 20 сентября 2022г. в г. Пенза. СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ. (МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВА И ДВИЖЕНИЯ НЕФТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ ТАНКЕРА ВБЛИЗИ ХУРГАДЫ, КРАСНОЕ МОРЕ, ЕГИПЕТ. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49438301>

Личный вклад автора

Автор настроил все сценарии разливов нефти, выбрал места разливов, собрал необходимые данные для моделей, установил модели и получил результаты. Затем представили эти результаты для научного анализа; совместно с научным руководителем они подготовили и опубликовали статьи.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка рисунков, таблиц и ссылок. Полный объем диссертации составляет 135 страниц с 40 рисунками и 14 таблицами. Список литературы содержит 245 пункта.

Глава 1. Обзор поведения разливов нефти в море

1.1. Разливы нефти в море

Сырая нефть является природным и невозобновляемым энергетическим ресурсом. В глобальном масштабе нефть является одним из основных источников топлива и исторически обеспечивает более трети мирового потребления энергии. На протяжении всей истории, с эволюцией цивилизаций, потребность человека в энергии непрерывно растет [70]. Мировой спрос на сырую нефть и нефтепродукты продолжает расти, несмотря на нынешние попытки перехода на устойчивые источники энергии и возобновляемые виды топлива [1,2]. В связи с увеличением мирового спроса на нефть и сокращением запасов на суше добыча нефти на шельфе значительно увеличила свой потенциал с 1990-х годов [58]. Мировая добыча нефти выросла с 73 миллионов баррелей в день в 1998 году до более чем 89 миллионов баррелей в день в 2021 году. Уровень добычи нефти достиг рекордно высокого уровня в 2019 году, составив почти 95 млн баррелей. Однако пандемия коронавируса и ее влияние на спрос на транспортное топливо привели к заметному снижению в следующем году [71] (**Рисунок 1.1**). Согласно отчетам о газовых операциях, представленным морскими операторами в Управление по доходам от природных ресурсов, общий объем добычи нефти на шельфе Аляски, Тихого океана и Персидского залива увеличился с примерно 483 миллионов баррелей в 2012 году до более чем 600 миллионов баррелей в 2021 году [72] (**Таблица 1-1**).

Технология транспортировки нефти развивалась теми же темпами, что и нефтедобывающая промышленность: супертанкеры и нефтепроводы для сырой нефти и нефтепродуктов пересекают океаны. Однако, несмотря на постоянное совершенствование безопасности морских перевозок, танкерной отрасли и портовых сооружений, инциденты с разливами нефти на море продолжают происходить [1]. Морские разливы нефти часто относятся к выбросам жидких нефтяных углеводородов в океан или прибрежные районы в результате деятельности человека или стихийных бедствий [73].

Эра реагирования на разливы и внимания к возникающим экологическим последствиям началась после разлива нефти с супертанкера «Торри Каньон» в 1967 году у юго-западного побережья Соединенного Королевства [74]. Эта авария привела к значительным изменениям в реагировании на разливы нефти. Кроме того, в последние 50 лет все большее значение придается авариям разливов нефти морскими агентствами и странами по всему миру [75]. В результате исследовательские усилия, направленные на разработку полноценных сред моделирования разливов нефти, продолжают оставаться активной областью исследований. Когда эти усилия объединяются с краткосрочными и долгосрочными наблюдениями за разливами, разработка комплексов моделирования рисков и последствий разливов нефти, предназначенных для повышения эффективности реагирования и снижения риска, приводит к созданию относительно большой системы вычислительных инструментов для изучения потенциальных последствий разливов нефти в пространстве и времени [76].

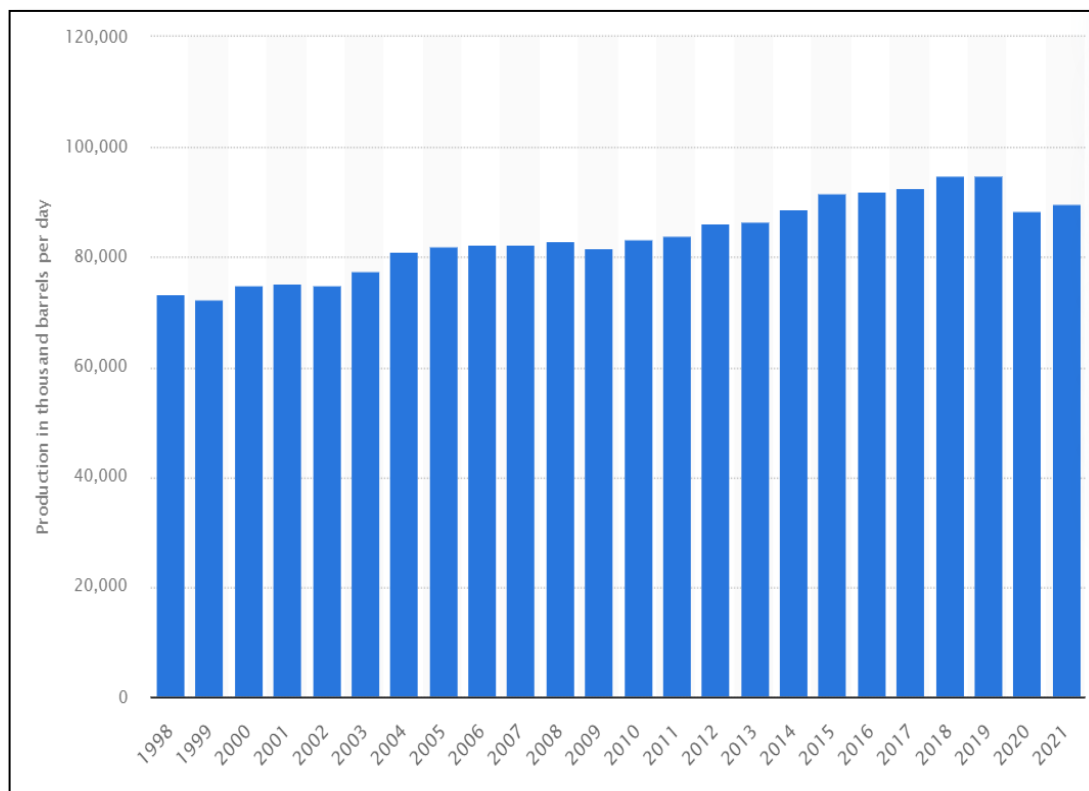


Рисунок 1.1 Мировая добыча нефти с 1998 по 2021 год в сутки [71].

Таблица 1-1 Добыча сырой нефти на шельфе с 2012 по 2021 год [72]

Год	Аляска	Тихий океан	Персидский залив	Итого
2012	627,108	17,678,493	464,786,485	483,092,086
2013	669,148	18,565,833	459,046,740	478,281,721
2014	625,303	18,506,540	510,467,459	529,599,302
2015	609,912	11,451,040	553,007,049	565,068,001
2016	548,343	6,142,614	585,712,140	592,403,097
2017	513,420	5,714,391	613,670,834	619,898,645
2018	491,616	4,873,812	642,064,616	647,430,044
2019	479,711	4,448,922	692,744,886	697,673,519
2020	458,067	4,568,527	609,733,770	614,760,364
2021	449,679	3,991,793	622,841,833	627,283,305

1.2. Основные причины морских нефтяных разливов

Разливы нефти обычно происходят из-за плохой погоды (ураганы, штормы и землетрясения), преднамеренных актов насилия (таких как война, вандалы или сброс) и человеческих ошибок [8]. По словам Качел (Kachel) [9], наиболее распространенными причинами разливов нефти в морскую среду являются: аварии судов, крушения танкеров, разрыв или утечка трубопроводов, взрывы скважин, взрывы при глубоководном бурении, естественное просачивание (это когда сырая нефть, находящаяся в земле, просачивается в воду естественным путем) и работа нефтеперерабатывающих заводов.

Чилверс и др. (Chilvers) [77] изучили 1702 разлива нефти из общедоступных источников. Они обнаружили, что около 47% всех сообщений были от общего судоходства (включая грузы, балкеры, круизные суда, военные и рыболовные суда), 23% от нефтяных танкеров и барж и 12% от трубопроводов (**Рисунок 1.2**). В настоящее время более 90% мировых перевозок нефти осуществляется нефтяными танкерами [78]. Следовательно, существует высокая вероятность инцидентов утечки нефти с участием нефтяных танкеров. Около 13% аварий и загрязнений нефти во всем мире вызваны на этапе транспортировки [79]. По данным Международной федерации по предотвращению

загрязнения окружающей среды владельцев танкеров (ITOPF), столкновение с танкерами и посадка на мель являются основными причинами незначительных (<700 тонн) и крупных (>700 тонн) аварий с разливами (Рисунок 1.3). В 2021 году восемь аварий на разливах нефти различной величины привели к потере 10 000 тонн нефти в морскую среду [58].

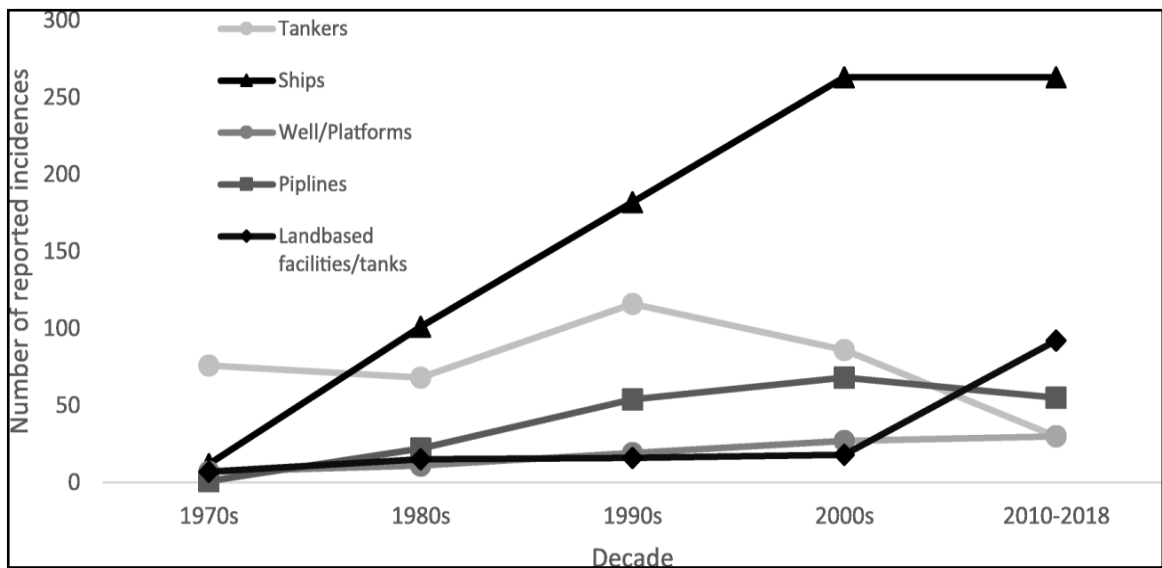


Рисунок 1.2 Количество зарегистрированных разливов нефти в сумме по десятилетиям, по источникам разливов, за почти пять десятилетий, с 1970 по 2010–2018 [77].

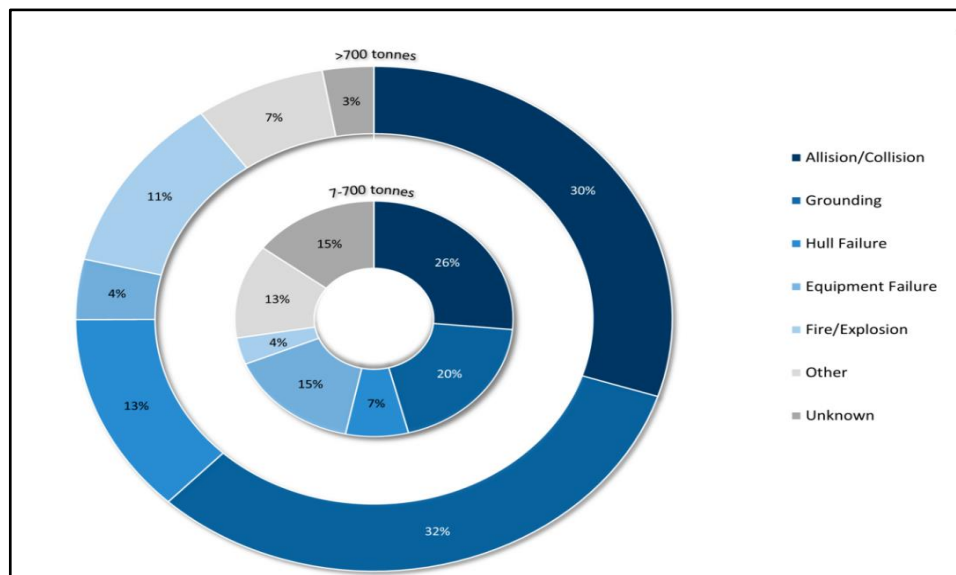


Рисунок 1.3 Основные причины крупных и незначительных разливов танкеров

1.3. Аварии на разливах нефти

Мировые темпы разлива нефти резко снизились с 1960-х и 1970-х годов, с примерно 635,000 тонн в год до примерно 300,000 тонн в год из всех источников, не считая аномального преднамеренного разлива, связанного с войной в Персидском заливе 1991 года, который составил более 82 миллионов тонн на суше и на море [74]. Как мы уже упоминали ранее, крупнейшие источники разливов нефти за последние два десятилетия связаны с транспортировкой нефти танкерами. По данным Европейского космического агентства (ЕКА), приблизительные потери в 250 000 тонн нефти в год оцениваются из-за процедур эксплуатации кораблей [1].

Во всем мире произошло несколько крупных и незначительных аварий с разливами нефти с танкеров [10]. На **Рисунок 1.4** показано распределение крупных и мелких разливов нефти с 1970 по 2020 год. Крупные разливы нефти привлекают внимание общественности и средств массовой информации. В прошлые годы это внимание способствовало глобальному осознанию рисков, связанных с разливами нефти, и ущерба, наносимого ими окружающей среде. Мелкие разливы нефти происходят часто по всему миру, в основном из-за интенсивного использования нефти и нефтепродуктов в нашей повседневной жизни [7].

Как показано в **Таблица 1-2**, первой крупной катастрофой нефтяного танкера в мире стала посадка на мель "Torrey Canyon" в Соединенном Королевстве 18 марта 1967 г [80]. В результате этой катастрофы в морскую среду было выброшено около 119,000 тонн сырой нефти. В то время как самым крупным из когда-либо зарегистрированных разливов, произошедших на судах, был инцидент с "Atlantic Empress" и "Aegean Captain". Во время тропического ливня в 1979 году два полностью загруженных танкера столкнулись. После аварии оба танкера начали разливать нефть. В результате, по оценкам, 287 000 тонн нефти было выброшено в Карибское море танкером "Atlantic Empress" [75]. Последним крупным разливом нефти в морской среде стала авария нефтяного танкера "Sanchi" в 2018 году. Танкер взорвался, а затем затонул после

горения в течение восьми дней подряд, что привело к разливу 113 000 тонн нефти у Шанхая, Китай [81].

В заключение важно изучить предыдущие инциденты с разливами нефти, чтобы узнать, как нефть повлияла на окружающую среду, какие методы очистки работают и какие улучшения могут быть сделаны, а также выявить пробелы в технологии [74].

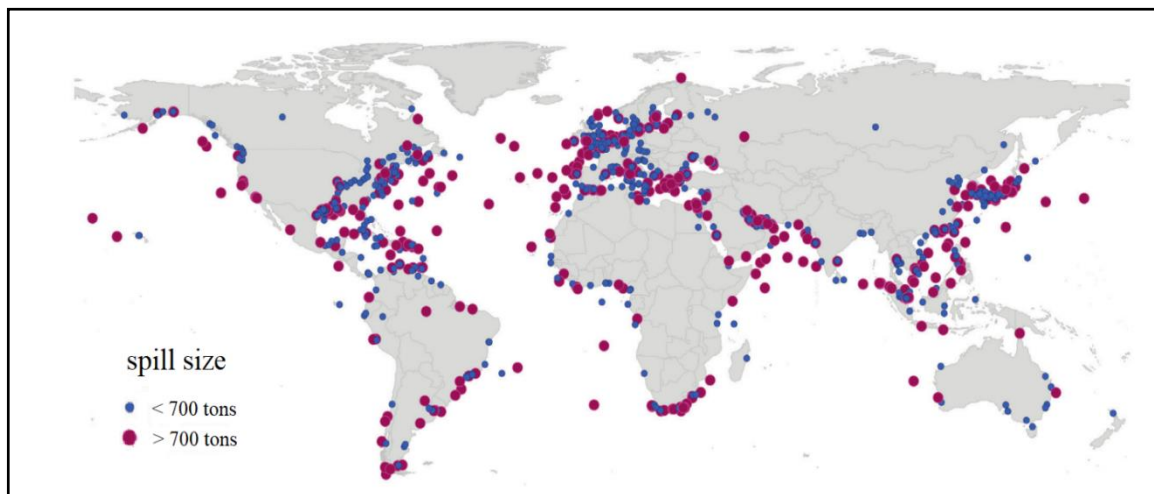


Рисунок 1.4 Карта крупных и мелких разливов нефти в мире с 1970 по 2020 год [58].

Таблица 1-2 Крупные разливы танкеров с 1967 года (расположены в соответствии с объемом разлива) [58]

Название судна	Год	Местоположение	Размер разлива (тонн)
ATLANTIC EMPRESS	1979	У берегов Тобаго, Вест-Индия	287,000
ABT SUMMER	1991	700 морских миль от Анголы	260,000
CASTILLO DE BELLVER	1983	У залива Салданья, Южная Африка	252,000
AMOCO CADIZ	1978	За пределами Бретани, Франция	223,000
HAVEN	1991	Генуя, Италия	144,000
ODYSSEY	1988	700 морских миль от Новой Шотландии, Канада	132,000
TORREY CANYON	1967	Силли Айлс, Великобритания	119,000
SEA STAR	1972	Оманский залив	115,000
SANCHI	2018	За пределами Шанхая, Китай	113,000
IRENES SERENADE	1980	Наваринский залив, Греция	100,000

Продолжение таблицы 1-2

URQUIOLA	1976	Ла-Корунья, Испания	100,000
HAWAIIAN PATRIOT	1977	300 морских миль от Гонолулу	95,000
INDEPENDENTA	1979	Босфор, Турция	95,000
JAKOB MAERSK	1975	Порту, Португалия	88,000
BRAER	1993	Шетландские острова, Великобритания	85,000
AEGEAN SEA	1992	Ла-Корунья, Испания	74,000
SEA EMPRESS	1996	Милфорд-Хейвен, Великобритания	72,000
KHARK 5	1989	120 морских миль от атлантического побережья Марокко	70,000
NOVA	1985	У острова Харк, Иранский залив	70,000
KATINA P	1992	За пределами Мапуту, Мозамбик	67,000
PRESTIGE	2002	За пределами Галисии, Испания	63,000
EXXON VALDES	1989	Пролив Принца Уильяма, Аляска, США	37,000
HEBEI SPIRIT	2007	Южная Корея	11,000

1.4. Воздействие разливов нефти на морскую среду

Морские разливы нефти вызывают экологические нарушения и могут иметь различные краткосрочные и долгосрочные последствия для морских экосистем и экономики прибрежного населения [11,12,22,82,83]. Крупные аварии с разливами нефти могут привести к утечке большого количества нефти, поэтому они очень опасны. Помимо экономических потерь, большие площади нефтяного загрязнения в море могут повлиять на обмен материалами и энергией между воздушными и морскими системами [84], что приводит к массовой гибели морских обитателей и птиц. Это не только вызывает катастрофические бедствия для морской жизни, но и значительно влияет на экологию, туризм и окружающую среду прибрежных районов. Кроме того, загрязнение также является длительным и стойким [85]. Из-за физико-химических свойств сырой нефти и ее взаимодействия с морской средой даже незначительные разливы нефти могут иметь серьезные последствия [86]. Присутствие нефти в воде может препятствовать фотосинтезу морского фитопланктона, тем самым снижая содержание растворенного кислорода и изменяя температуру воды и других составляющих частиц [87,88].

Следовательно, физические и химические нарушения от нефти в морях загрязняют экосистему и загрязняют морскую пищевую цепь в эвфотической зоне [89].

Тяжесть воздействия разлива нефти зависит от многих факторов, включая количество разлитой нефти, первоначальные физико-химические характеристики нефти, а также метеорологические и морские условия. Даже разливы продуктов нефтепереработки, таких как бензин, быстро испаряются и вызывают лишь краткосрочные экологические последствия. С другой стороны, сырая нефть, мазут и смеси «вода в нефти» могут привести к широкомасштабному и длительному физическому загрязнению береговых линий [8]. Ситуация осложняется и ухудшается, если разлитая нефть достигает береговой линии или побережья, поскольку биологическая продуктивность на этих участках выше, и нефть, скопившаяся на береговых линиях, может сохраняться в течение длительных периодов времени [90]. Нефть рассеивается медленнее и может сохраняться в течение нескольких лет в отложениях даже после процессов очистки [91]. Таким образом, эти загрязненные нефтью отложения могут увеличить риск воздействия на водные экосистемы и здоровье человека [92]. Кроме того, нефть, разлитая на береговой линии, может нанести значительный ущерб среде обитания и представлять серьезную угрозу для всех живых организмов на береговой линии и в ее пределах [93].

Потенциальное воздействие нефтяного загрязнения на биоту может варьироваться от вида к виду [94]. Например, нефть вступает в контакт с коралловыми рифами в толще воды на мелководье и может препятствовать их размножению, поведению и росту. Это может даже привести к гибели коралловых организмов. Коралловые рифы, являющиеся средой обитания сопутствующих морских организмов, таких как рыба, морские травы, водоросли, крабы и т.д., при загрязнении в результате разлива нефти могут привести к потере биоразнообразия [95]. Несколько исследований, в которых было представлено влияние нефти на физиологию кораллов, подтвердили пагубное воздействие нефти на кораллы, поэтому загрязнение нефтью является угрожающим фактором для коралловых рифов [96–99].

Прибрежные районы, как правило, густонаселены и привлекают множество рекреационных мероприятий и объектов, разработанных для рыбалки, катания на лодках, подводного плавания, и других развлечений для жителей и туристов. Разливы нефти, которые вторгаются в эти районы и загрязняют их и негативно сказываются на деятельности человека, могут иметь разрушительные и долгосрочные последствия для местной экономики и общества. Стоимость жилья имеет тенденцию к снижению, региональная деловая активность снижается, а будущие инвестиции рискованны [100]. В конкретных случаях проблемы могут возникнуть для отраслей промышленности, которые зависят от потребления морской воды (например, производство морской соли, опреснительные установки и прибрежные электростанции) и прибрежных сооружений (например, пристаней, портов и гаваней) [13].

1.5. Поведение разлитой нефти в морской среде

При разливе нефти происходит несколько процессов трансформации; многие из этих процессов называются поведением разлитой нефти. Первой группой процесса является выветривание, ряд процессов, посредством которых физические и химические свойства нефти изменяются после разлива [14–16,101,102]. Вторая группа процессов связана с физическими процессами переноса, такими как распространение и перемещение нефтяного пятна [1,74]. **Рисунок 1.5** иллюстрирует основные морские процессы после разлива нефти. Процессы выветривания и физического переноса могут перекрываться; временные масштабы процессов, происходящих после разлива, показаны на **Рисунок 1.6**. Все процессы зависят от типа разлитой нефти и погодных условий во время и после разлива [103]. Специфические поведенческие процессы после разлива нефти определяют, как следует очищать нефть и ее влияние на окружающую среду. Специалисты по ликвидации разливов должны знать окончательную судьбу нефти, чтобы принять меры по минимизации общего воздействия разлива [104].

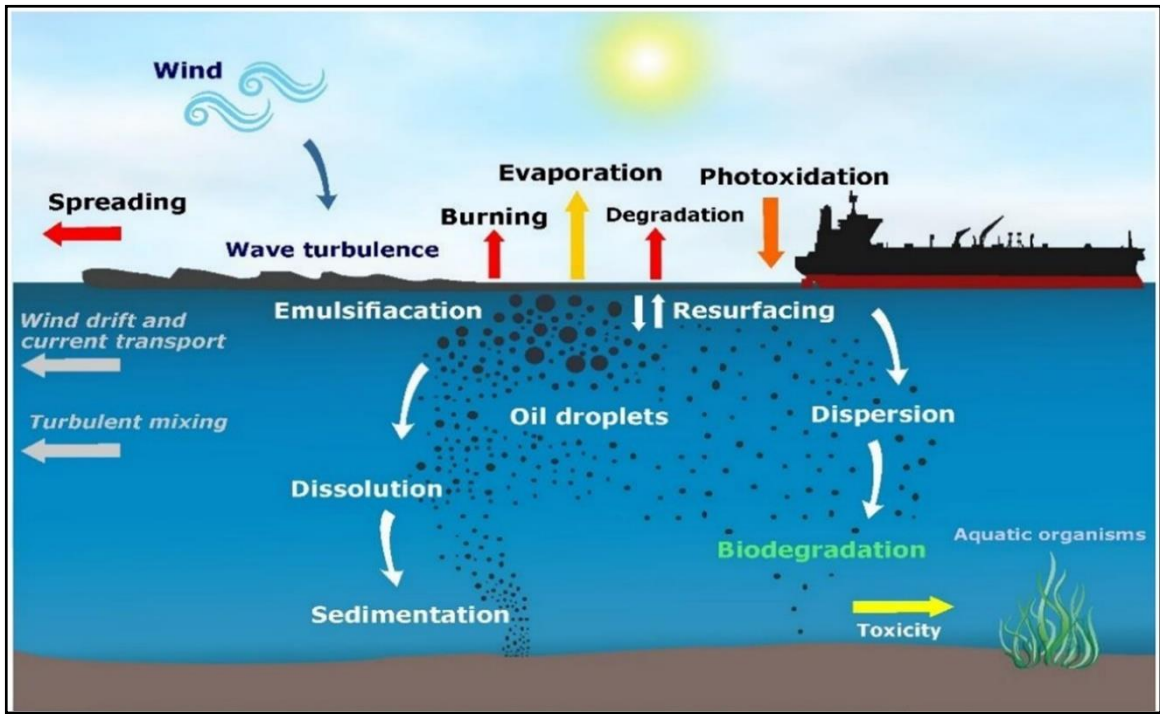


Рисунок 1.5 Основные процессы разлива морской нефти после разлива [1].

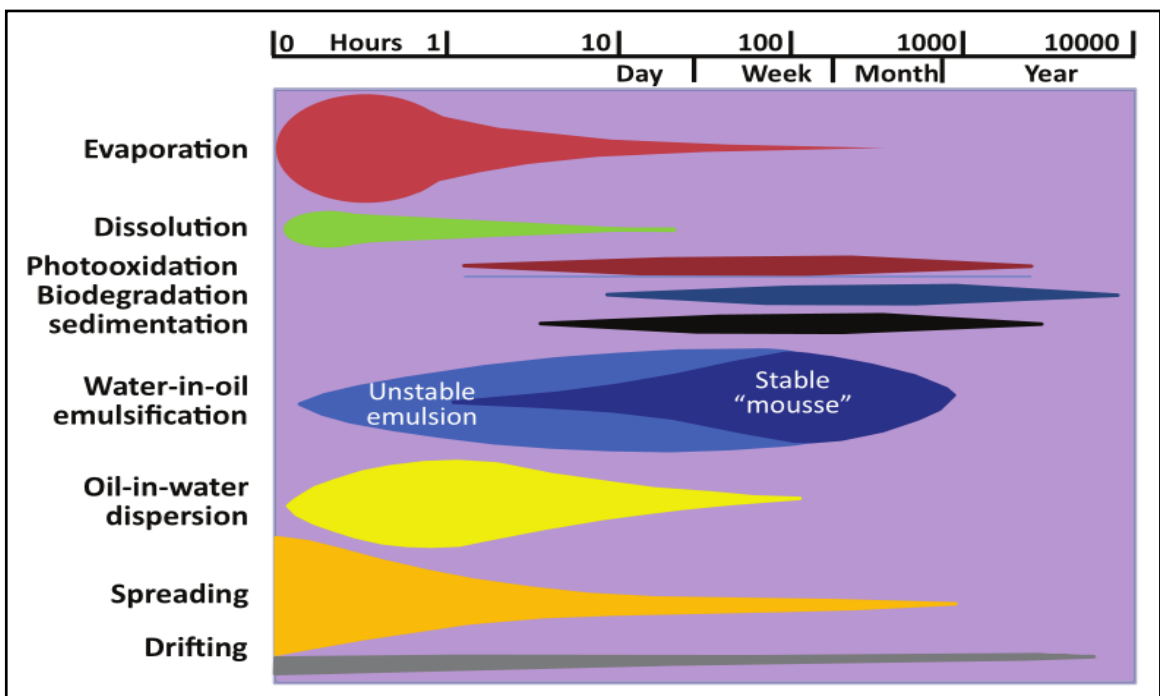


Рисунок 1.6 Относительные временные шкалы процессов выветривания и судьбы. Толщина столбиков отражает относительную важность каждого процесса в определенное время после первоначального разлива [105].

1.5.1. Растекание нефти

Растекание означает создание тонкой пленки, распространяющейся по поверхности моря сразу после выброса нефти [106]. После разлива нефти на воду нефть, как правило, растекается по поверхности воды в виде пятна, что особенно характерно для более легких продуктов, таких как бензин, дизельное топливо и легкая сырая нефть, которые образуют тонкие пятна. В то время как более тяжелая сырая нефть первоначально растекается до пятен толщиной в несколько миллиметров, а также может образовывать смоляные шарики и, таким образом, не проходит через прогрессивные стадии истончения [74].

Гравитация и поверхностное натяжение являются основными силами, действующими в пользу растекания, в то время как инерционные и вязкие силы работают против него. Поэтому распространение нефтяного пятна происходит даже при отсутствии морских течений или деформаций, вызванных ветром. Скорость растекания зависит от температуры поверхности моря, вязкости и плотности нефти [107]. Маловязкая нефть растекается гораздо быстрее, чем высоковязкая, которая может остаться в виде ряда пятен, а не создать непрерывную пленку [108].

Ветер и морские течения также влияют на распространение нефти и ускоряют этот процесс. Нефтяные пятна вытягиваются в направлении ветра и морских течений и, по мере распространения, принимают различные формы в зависимости от движущих сил. Нефтяные пятна часто предшествуют более тяжелым или густым скоплениям нефти. При сильном ветре (более 20 км/ч) нефтяные пятна могут отделяться от более толстых пятен и перемещаться вниз по ветру [103]. Хотя распространение нефти по поверхности моря не изменяет никаких физических или химических свойств нефти, любое изменение толщины нефтяного пятна и соотношения площади к объему вследствие распространения нефтяного пятна влияет на скорость всех других процессов выветривания, а также на возможность восстановления и обработки нефтяного пятна. Поэтому точное моделирование распространения нефтяного разлива имеет важное значение [109].

Наиболее часто используемые модели для разбрасывания разливов нефти основаны на работе Фэй (Fay) [110,111]. Фэй предположил, что распространение лучше всего описывается тремя фазами: инерционной, вязкой и поверхностного натяжения. В инерционной фазе доминируют силы гравитации, в вязкой фазе - силы гравитации и вязкости, а в фазе поверхностного натяжения - поверхностное натяжение. В целом, растекание — это процесс с определенными модельными ограничениями, поскольку он зависит от характеристик нефти и состояния океана. Существующие алгоритмы лишь частично приближают фактическую площадь поверхности реальных разливов. Для точного решения проблемы требуются данные о состоянии моря и нефти, которые могут быть недоступны на начальном этапе оперативного реагирования на разлив. Еще одним источником неопределенности является то, что в вычислительных целях модели разливов нефти делят пятно на Элементы Лагранжа (ЭЛ) или частицы и отслеживают их движение, что не позволяет напрямую определить концентрацию или толщину нефти в конкретных местах [1].

1.5.2. Дрейф (горизонтальное перемещение нефтяных пятен)

В дополнение к естественной тенденции к распространению, нефтяные пятна на воде перемещаются вдоль водной поверхности, в основном под воздействием морских течений и ветра [41]. Движение, возникающее в результате воздействия ветра и морского течения, проиллюстрировано на **Рисунок 1.7**.

При попытке определить движение нефтяного пятна, на точность влияют два фактора. Более существенным фактором является невозможность получения точных данных о скорости ветра и морского течения в момент разлива. Другой, очень незначительный фактор - это явление, известное как эффект Кориолиса, когда вращение Земли немного отклоняет движущийся объект [103]. Общим методом моделирования, применяемым почти всеми моделями нефтяных разливов для учета влияния ветра на нефтяное пятно, плавающее на поверхности моря, является использование подхода "ветрового фактора", т.е. воздействие ветра будет перемещать нефть при определенной доле скорости ветра под определенным углом к направлению ветра [112]. Кроме того,

в большинстве моделей нефтяных разливов используется метод Лагранжа (например, GNOME, MEDSLIK и OpenOil), поэтому частицам нефти приписывается адвективно перемещение в соответствии с морскими течениями, ветром и дрейфом Стокса, а также диффузионное перемещение, задаваемое моделью случайного блуждания [1].

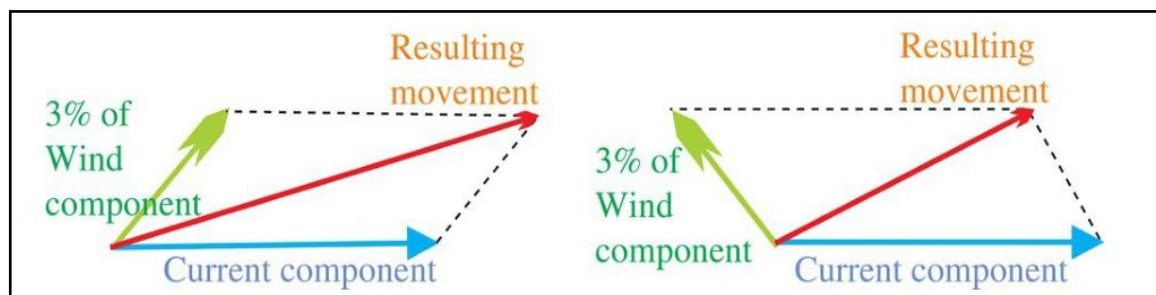


Рисунок 1.7 Влияние различных направлений ветра и течения на результирующее движение нефтяного пятна [113].

1.5.3. Испарение

Испарение происходит, когда летучие элементы нефти диффундируют из нефти и уносят газообразную стадию, в то время как более тяжелые компоненты нефти остаются в море [114]. Согласно Фингас (Fingas) [115,116] испарение является первым и наиболее важным процессом выветривания, которому подвергается нефть после разлива, и доминирующим процессом выветривания на начальных стадиях разлива нефти.

Легкие соединения с более низкой температурой кипения могут испаряться при более низких температурах, а при повышении температуры нефти могут испаряться и более тяжелые соединения. Основным источником тепла для испарения нефти является солнце [56]. В течение нескольких дней после разлива легкая нефть может потерять до 75% своего первоначального объема, а средняя нефть - до 40%. Напротив, тяжелые или остаточные нефти теряют не более 10% своего объема в первые несколько дней после разлива [117]. Свойства нефти могут значительно измениться в зависимости от степени испарения. Согласно Мишра и Кумар (Mishra and Kumar) [19], плотность и вязкость нефтяного пятна значительно изменяются в результате испарения. Если испаряется около 40% (по весу) нефти, ее вязкость может увеличиться в 1000 раз. Плотность может

увеличиться на 10%. Степень испарения может быть наиболее существенным фактором в определении свойств нефти в данный момент времени после разлива и в изменении поведения нефти [7].

1.5.4. Эмульгирование

Эмульгирование – это процесс, при котором одна жидкость диспергируется в другой в виде мельчайших капель [113]. Когда нефть просачивается в воду, эмульгирование нефти - это процесс, в результате которого вода смешивается с нефтью [1]. Капельки воды могут находиться в слое нефти в стабильном состоянии, в результате чего образуется совершенно другой материал. Существуют два типа эмульсий вода-в-нефти и нефть-в-воде. Эмульсии "вода в нефти", или "шоколадный мусс", образуются, когда в результате сильных морских течений или волнового воздействия вода оказывается в ловушке внутри вязкой нефти. Эмульсии "шоколадного мусса" могут сохраняться в окружающей среде в течение нескольких месяцев или даже лет. Эмульсии нефти и воды заставляют нефть тонуть и исчезать с поверхности, что создает ложное впечатление, что ее больше нет и угроза для окружающей среды миновала [19].

На эмульгирование влияют турбулентность, состав нефти и температура. Однако другие факторы, влияющие на нее, включают адвекцию, диффузию, растекание, испарение и растворение [118]. Эмульгирование может увеличить объем нефтяного пятна в три раза, а также повысить его вязкость на несколько порядков. Эти изменения могут затруднить химическую обработку и механическое восстановление нефтяного разлива, поэтому органы по ликвидации разливов нефти должны уметь прогнозировать поведение конкретной нефти [109]. По мере увеличения вязкости нефти все более значительная ее часть эмульгируется. Нефть эмульгируется, что также нарушает скорость испарения. Параллельно скорость эмульгирования увеличивается с ростом скорости ветра и турбулентности на поверхности моря [119].

Основной эффект эмульгирования заключается в том, что образуется эмульсия с другими физическими и химическими свойствами по сравнению с первоначально

разлитой нефтью, что приводит к серьезным последствиям для методов очистки. Другой значительный негативный эффект эмульгирования заключается в том, что оно увеличивает объем пятна; это означает, что затраты на очистку значительно возрастут. Эмульсии, содержащие около 70% воды, увеличивают объем нефтяного пятна в три раза. Что еще более существенно, вязкость нефти увеличивается в 1000 раз, в зависимости от типа образовавшейся эмульсии [19]. Таким образом, эмульгирование является процессом со специфическими ограничениями модели и играет решающую роль в оценке воздействия и реагировании при моделировании разливов нефти [1].

1.5.5. Естественная дисперсия

Хотя молекулярная растворимость нефти в воде относительно мала, разбивающиеся волны будут гнать крошечные капли нефти в толщу воды. Если капли достаточно малы, естественная турбулентность в воде не позволит нефти всплыть на поверхность, подобно тому, как турбулентность в воздухе удерживает на плаву мелкие частицы пыли. Этот процесс называется естественной дисперсией [50]. Таким образом, естественная дисперсия происходит, когда мелкие капли нефти переносятся в толщу воды под действием волн или турбулентности. Мелкие капли распространяются и диффундируют в толще воды, в то время как более крупные капли поднимаются вверх и образуют тонкую пленку, известную как глянец [104,120]. Нефтяной блеск - это тонкая нефтяная пленка, обычно толщиной 0,003 мм или менее [56]. На скорость естественного рассеивания влияют условия окружающей среды (т.е. состояние моря), свойства нефти и характеристики разлива (толщина нефтяной пленки, плотность, вязкость и поверхностное натяжение нефти/воды). Тяжелая сырая нефть не рассеивается естественным образом в сколько-нибудь значительной степени. Напротив, легкая нефть может значительно рассеиваться. Кроме того, для рассеивания нефти необходимо значительное воздействие волн [121]. Долгосрочная судьба диспергированной нефти неизвестна, хотя она может в некоторой степени разлагаться, поскольку состоит в основном из насыщенных компонентов [74,104].

1.5.6. Растворение

Растворение – это физический процесс, в результате которого при контакте нефти с водой некоторые растворимые компоненты теряются в воде под пятном [122]. Растворение – более медленный процесс по сравнению с вышеупомянутыми процессами. Нефть может растворяться в толще воды из поверхностного пятна или диспергированных капель нефти [123]. Растворение происходит сразу после разлива, и скорость растворения быстро уменьшается, поскольку растворимые вещества быстро истощаются. Некоторые из растворимых соединений также быстро испаряются [124]. Таким образом, растворение и испарение – это два конкурирующих процесса, хотя испарение происходит быстрее и затрагивает более значительные части разлива. Легкая сырая нефть хорошо растворима в морской воде и относительно более летуча [125].

На скорость растворения в основном влияют растворимость нефтяных соединений в воде, площадь контакта с водой, температура воды, состав нефти, условия моря и коэффициент переноса растворения через пограничный слой на границе раздела вода-нефть [56,109]. Более мелкие и легкие компоненты обладают большей растворимостью, чем более крупные и тяжелые молекулы. При поверхностных разливах нефти растворение вносит небольшой вклад в общее выветривание нефти, поскольку очень легкие и ароматические компоненты составляют небольшую долю всей нефти. Они также летучи и имеют тенденцию испаряться быстрее, чем растворяться [109,117].

1.5.7. Фотоокисление

Сырая нефть обычно имеет темный цвет и может поглощать ультрафиолетовое излучение (УФ) от солнца; это может изменить состав нефти [126,127]. Степень фотоокисления зависит от площади поверхности нефти на поверхности воды, концентрации растворенного кислорода, доступности солнечного света, прозрачности воды и состава нефти [128,129]. Под воздействием солнечного света на нефтяное пятно кислород и углерод соединяются и образуют новые продукты, которые могут быть смолами. Смолы могут быть в некоторой степени растворимыми и растворяться в воде

или образовывать эмульсии "вода в нефти". Для большинства нефтей фотоокисление не играет существенной роли в изменении их непосредственной судьбы или массового баланса после разлива [74]. В целом, фотоокисление долгое время считалось относительно медленным процессом, при котором тонкие нефтяные пленки растворяются даже при ярком солнечном свете со скоростью менее 0,1% в день [2]. Поэтому фотоокисление не включено в современные модели ликвидации разливов нефти, так как об этом процессе существует мало знаний, а важность и скорость этого процесса еще тщательно не изучены [1].

1.5.8. Осадкообразование

Осаждение – это процесс, в результате которого нефть оседает на дно моря или других водоемов [104]. Осаждение капель нефти происходит в результате налипания на береговые линии. Когда разлитая нефть достигает берегов, большая часть нефти остается адсорбированной на поверхности осадка; увеличение плотности унесенной нефти и поверхностных пятен в результате процессов выветривания; включение фекальных гранул в результате заглатывания зоопланктоном или бентическими организмами; прилипание нефти или флокуляция и агломерация с агрегатами взвешенных частиц [123,130,131]. Исследования показали, что взаимодействие между нефтью и отложениями играет существенную роль в рассеивании и деградации разлитой нефти [132]. В прибрежных водах естественно рассеянные капли нефти могут легко агрегировать со взвешенными твердыми частицами, такими как глинистые минералы или органические вещества, образуя агрегаты взвешенных твердых частиц нефти. Несколько лабораторных и полевых исследований зафиксировали взаимодействие между нефтью и взвешенными твердыми частицами. Пуарье и Тиль (Poirier and Thiel) [133], сообщили, что нефть, диспергированная в смеси отложений и морской воды, оседает и задерживается на дне отложениями.

Когда разлитая нефть достигает береговой линии, она иногда взаимодействует с минеральными частицами, взвешенными в толще воды, и нефть переходит в толщу воды [134]. Частицы минералов с приставшей к ним нефтью могут быть тяжелее воды и

опускаться на дно в виде осадка, или же нефть может отделиться и всплыть. Взаимодействие между нефтью и мелкими частицами обычно не играет существенной роли в судьбе большинства разливов нефти на их ранних стадиях, но может повлиять на долговременное восстановление загрязненных нефтью пляжей [113]. Некоторые варианты реагирования, такие как сжигание разлива нефти на месте, также оставляют более плотный остаток, который может опуститься [109]. В нескольких хорошо изученных случаях разливов нефти значительное количество (около 10%) нефти оседало на морском дне. Такое количество может быть очень вредным для биоты, которая неизбежно вступает в контакт с нефтью на морском дне. Из-за сложности изучения процесса седиментации данные ограничены [113].

1.5.9. Биodeградация

Большое количество микроорганизмов способно разлагать нефтяные углеводороды. Многие виды бактерий, грибов и дрожжей метаболизируют нефтяные углеводороды в качестве источника энергии для питания [135]. Биоразложение нефти местными микроорганизмами является одним из наиболее эффективных природных процессов, способных ослабить экологические последствия морских разливов нефти в долгосрочной перспективе. В литературе приводится несколько подробных обзоров этого процесса [136-138]. Скорость биоразложения нефти зависит от типа нефтяных углеводородов, температуры, вида микроорганизмов и наличия кислорода и питательных веществ [136-138]. Скорость биоразложения нефти зависит от типа нефтяных углеводородов, температуры, вида микроорганизмов и наличия кислорода и питательных веществ [136,139].

Скорость биodeградации нефти увеличивается с увеличением доступной поверхности раздела вода-нефть, которая для дисперсных капель нефти увеличивается по мере уменьшения размера капель [140]. Однако для некоторых сортов нефти биоразложение может быть относительно медленным процессом. Например, для биоразложения 50% дизельного топлива при оптимальных условиях могут потребоваться недели, а для 10% сырой нефти при аналогичных условиях - годы. По

этой причине биоразложение не считается жизненно важным процессом выветривания в краткосрочной перспективе [104].

1.6. Обзор моделирования нефтяных разливов

1.6.1. Определение и цель

Для начала рассмотрим проблему, связанную с определением понятия "моделирование нефтяных разливов". Хотя конкретное определение может варьироваться, общее определение моделирования разливов нефти таково: моделирование пространственной и временной динамики разлитой нефти, ее состава, выветривания и переноса в окружающей среде, а также оценка риска, уязвимости и потенциального воздействия на экосистемы, заинтересованные стороны и сообщества на пути разлива [141,142].

Модели разливов нефти – это численные инструменты, позволяющие предвидеть траекторию разлива, оценить время, которое потребуется нефти, чтобы достичь определенных регионов, представляющих интерес, и оценить состояние разлива после того, как он достигнет смоделированных мест [10,143]. Эти модели могут предсказать возможное движение фактического или гипотетического разлива нефти [114]. Модели нефтяных разливов можно разделить на два типа: эйлеровы и лагранжевы. Первый подход имеет дело с уравнениями сохранения массы и импульса, применяемыми к нефтяному пятну, или с уравнением конвекции-диффузии. В последнем случае диффузионная часть уравнения иллюстрирует распространение нефти, а конвективные условия описывают адвекцию нефти через течения и ветер [144].

С другой стороны, лагранжевы модели дискретизируют нефтяные пятна как большое количество частиц, адвектированных объединенным результатом ветров, волн и течений, но также переносимых посредством дисперсии [64]. Власти могут использовать модели разливов нефти для планирования действий в чрезвычайных ситуациях и экстренного реагирования на кризис, возникающий из-за случайных

выбросов нефти. Такое планирование в сочетании с моделью разлива нефти может привести к более глубокому пониманию влияния процессов выветривания нефти на ее разлив, на поверхности и в толще воды, и, таким образом, к улучшению методов мониторинга и очистки [19,145].

Задачи, стоящие в этой области. Существует несколько задач, стоящих в области математического моделирования нефтяных разливов. Одним из главных задач является сложность физических процессов, происходящих при разливе нефти. Нефть может перемещаться различными путями в зависимости от таких факторов, как ветер, волны и течения, и эти перемещения трудно предсказать. Кроме того, на поведение нефти может влиять широкий спектр факторов окружающей среды, таких как температура и соленость воды, наличие других химических веществ и рельеф прибрежной зоны. Еще одной проблемой является отсутствие данных о поведении нефти в окружающей среде. Многие нефтяные разливы происходят в отдаленных местах, и собрать точные данные о движении и рассеивании нефти может быть сложно. Кроме того, условия разлива нефти могут быстро меняться, что затрудняет сбор данных в режиме реального времени. Наконец, сложность компьютерных симуляций, используемых для моделирования нефтяных разливов, также может стать проблемой. Эти симуляции требуют больших вычислительных мощностей и могут занимать много времени. Кроме того, математические уравнения, используемые в моделировании, могут быть сложными для решения, что требует использования передовых математических методов.

1.6.2. Важность моделирования морских разливов нефти

Математическое моделирование нефтяных разливов важно по нескольким причинам. Во-первых, оно может использоваться для прогнозирования движения и рассеивания нефтяного разлива, что может помочь улучшить усилия по ликвидации последствий и минимизировать воздействие разлива на окружающую среду. Это может включать выявление зон повышенного риска воздействия нефти, таких как уязвимые места обитания или места размножения диких животных. Во-вторых, математическое моделирование нефтяных разливов может также использоваться для оценки различных

стратегий реагирования, таких как использование химических диспергентов или развертывание боновых заграждений и скиммеров. Это может помочь определить наиболее эффективные и действенные варианты реагирования. В-третьих, математическое моделирование нефтяных разливов также может помочь улучшить наше понимание воздействия нефтяных разливов на окружающую среду. Это может включать определение факторов, способствующих сохранению нефти в окружающей среде, и потенциальных долгосрочных последствий для дикой природы и прибрежных сред обитания. Наконец, математическое моделирование нефтяных разливов также имеет важные последствия для нефтяной промышленности и лиц, определяющих политику. Оно может быть использовано для оценки экологических рисков, связанных с различными видами разработки нефтяных месторождений, а также для разработки нормативных актов и рекомендаций по борьбе с разливами нефти. В целом, математическое моделирование нефтяных разливов играет важную роль в минимизации воздействия нефтяных разливов на окружающую среду и обеспечении защиты наших океанов и прибрежных сред обитания.

1.6.3. Примеры программного обеспечения для моделирования разливов нефти

Различные модели в литературе направлены на прогнозирование траектории и судьбы разливов углеводородов, происходящих на поверхности моря и в толще воды. Основными исходными данными в каждом случае являются не только данные о разливе нефти, такие как тип нефти и начальное место разлива, но и переменные метеоокеана (metocean), такие как трехмерное поле течений, температура моря, профили солёности и плотности, атмосферные ветры и батиметрия. Эти последние данные могут быть получены из различных оперативных систем океанографического прогнозирования, таких как CMEMS (Copernicus Marine Environmental Monitoring Service) и NOAA ((National Oceanic and Atmospheric Administration) [1]. В мире разработано несколько математических моделей нефтяных разливов для прогнозирования траектории и судьбы нефтяных разливов на поверхности моря и в толще воды; некоторые из этих моделей бесплатны для использования, другие имеют коммерческие лицензии, которые

необходимо приобретать. Ниже приведены некоторые из наиболее широко используемых моделей для прогнозирования направления и судьбы нефтяных разливов:

Общая среда оперативного моделирования Национального управления океанических и атмосферных исследований (The General NOAA Oil Modeling Environment) (**GNOME**) – это модель разлива нефти с открытым исходным кодом, разработанная в качестве инструмента реагирования для моделирования лагранжевой траектории движения нефти в двух измерениях [23]. **MOTHU** (modèle océanique de transport d'hydrocarbures), разработанная Météo-France [146]. представляет собой 3D-модель лагранжева дрейфа загрязнителей, предсказывающую судьбу и перенос нефтяных пятен на поверхности океана. Модель лагранжева разлива нефти **MOHID** (Modelo Hidrodinâmico) была разработана Техническим университетом Лиссабона [147]. Пакет приложений для моделирования воздействия разливов (**SIMAP**), подписанный (Applied Science Associates), представляет собой коммерческую модель разлива нефти, которая создает трехмерную траекторию, процессы деградации, взаимодействия нефти и отложений, биологические эффекты и другие воздействия разлитой нефти и топлива [33,148,149]. Applied Science Associates также разработала модель и систему анализа глубоководных разливов нефти (**OILMAPDEEP**) для оценки судьбы и переноса подводных выбросов, характеристик шлейфа вблизи месторождения и распределения размеров капель нефти для указанного выброса [32,150]. Комплексная глубоководная нефтегазовая модель (**CDOG**), представляет собой трехмерную модель, разработанную Япой и Ли (Yara and Li) [151], имитирующую нефть и газ, высвобождаемые в результате глубоководных аварий. Модель аварийности и реагирования на разливы (**OSCAR**) - это усовершенствованная трехмерная модель для планирования и реагирования на разливы нефти, разработанная SINTEF в Норвегии [152], вычисляющая судьбу и последствия поверхностных выбросов или выбросов / всплытия шлейфов нефти или газа [29]. **OILMAP** - это трехмерная модель реагирования на разливы нефти и планирования на случай непредвиденных обстоятельств, разработанная ассоциацией прикладных наук (Applied Science Associates). Она имеет дело с поверхностными и подземными выбросами углеводородов и предоставляет алгоритмы для распространения нефти,

испарения, эмульгирования, уноса, взаимодействия нефть-берег, нефть-дно и лед-нефть [30,153,154]. **Delft3D-PART**, разработанная Deltares, представляет собой модуль пакета моделирования Delft3D, который оценивает процессы переноса и простого качества воды с помощью метода отслеживания частиц, реализуя 2D или 3D данные о потоке с помощью Delft3D-FLOW (гидродинамический модуль) [22,91]. **MEDSLIK-II** - это модель разливов нефти с открытым исходным кодом для поверхностных разливов нефти в морской среде, предназначенная для прогнозирования переноса и выветривания нефтяного пятна и для выражения смещения плавающих частиц с использованием формализма Лагранжа в сочетании с эйлеровой моделью циркуляции океана [40]. Автоматизированный запрос данных о разливах нефти (**ADIOS2**) - это модель разливов нефти, разработанная NOAA. Стимулирует процессы, связанные с выветриванием нефти, включая испарение, естественную дисперсию и эмульгирование [50]. Судьба и поведение разлива нефти **SL Ross** предсказывает судьбу и транспортировку нефти с использованием базовой техники определения характеристик нефти (процедуры Американского общества по испытаниям и материалам), которая включает в себя процессы выветривания [62,63,155].

1.6.4. Предшествующие исследования

Численное моделирование стало важным инструментом для прогнозирования разливов нефти, которое позволяет проводить эффективные операции по очистке в режиме реального времени сразу после возникновения аварий на разливах нефти. Поэтому в последние годы быстро развиваются различные математические модели для моделирования и прогнозирования разливов нефти. Однако движение и изменение разлива нефти в море является сложным процессом, на который влияют физические, химические и биологические процессы, и связаны с морскими гидродинамическими, метеорологическими условиями и свойствами нефти [156]. До 1960-х годов найти математическую модель, которая предсказывала движение нефти, разлитой на воде, было сложно. Однако несколько событий привели к быстрому прогрессу в моделировании и исследованиях разливов нефти. В 1967 и 1968 годах произошла серия

«супер» разливов с танкеров, причем наиболее заметной была жертва с Торри-Каньон [157]. До сих пор многие ученые в мире создали и усовершенствовали множество моделей разливов нефти. В последние пять и шесть десятилетий многие исследователи изучали процессы разливов нефти, и были предложены различные модели разливов нефти [158]. Фэй (Fay) [111], разделил расширение нефтяной пленки на три стадии: инерционное расширение, вязкое расширение и расширение поверхностного натяжения, но не рассматривал влияние ветра на горизонтальную диффузию. Лер (Lehr) [159], рассмотрел влияние ветра и установил модифицированное уравнение распространения типа Фей. Эллиотт (Elliott) [160], впервые предложил метод нефтяных частиц, который рассматривает нефтяной разлив как большое количество нефтяных частиц и не требует решения уравнения диффузии. Все больше и больше моделей нефтяных разливов стали использовать алгоритм частиц Лагранжа, который стал основным методом прогнозирования траектории разлива нефти [156]. Многие исследователи разработали и смоделировали ход и судьбу инцидентов, связанных с разливами нефти в морской среде за последние два десятилетия.

Бигль-Краузе (Beegle-Krause) 1999 [161], создал новую модель траектории разлива, *The General NOAA Oil Modeling Environment* (GNOME), стандартную эйлеровскую/лагранжеву модель траектории разлива, разработанную для удовлетворения потребностей специалистов по планированию и экспертного реагирования. **Буранапратепрат (Buranapratheprat) 2000** [162], использовал модель траектории разлива нефти для Южно-Китайского моря и применил ее в верхней части Сиамского залива. Он предположил, что разлитая нефть будет действовать как плавающий объект на поверхности моря, движущийся в направлении чистого воздействия, состоящего из течения Экмана, дрейфового движения Стокса, остаточного течения и приливного течения. **Чао и др. (Chao) 2001** [163], создали двумерную и трехмерную модели разлива нефти в прибрежных водах Сингапура, используя алгоритм нефтяных частиц. В двумерной модели нефтяное пятно было разделено на ряд мелких сеток, и были изучены свойства каждой сетки в результате распространения, адвекции, турбулентной диффузии, испарения и растворения. На основе уравнения массового

переноса разработана трехмерная модель судьбы нефти, и распределение концентрации частиц нефти может быть решено, чтобы смоделировать распределение частиц нефти в толще воды. Эта модель может предсказать движение нефтяного пятна на поверхности воды. **Эткин и др. (Etkin) 2002** [149], использовали программу моделирования SIMAP для гипотетического разлива нефти в заливе Сан-Франциско, чтобы определить воздействие разлитой нефти и относительные затраты на ликвидацию последствий разлива. Моделирование траектории разлива нефти, судьбы и последствий было объединено с моделированием стратегий ликвидации последствий (обычные операции по механической локализации и восстановлению; применение диспергентов с одновременной механической локализацией и восстановлением; и сжигание на месте с одновременной механической локализацией и восстановлением). **Лима и др. (Lima) 2003** [154], применили модель OILMAP для моделирования аварийных разливов нефти вдоль побережья Бразилии. Реализация модели включала подробную метеорологическую и океанографическую характеристику каждого района исследования с обзором существующих данных и гидродинамическое моделирование, охватывающее более 9 000 км побережья Бразилии. **Бергейро и др. (Bergueiro) 2006** [164], смоделировали разлив нефти на нефтяной платформе Casablanca (Таррагона, Испания) при различных условиях окружающей среды с использованием моделей EUROSPILL, OILMAP, GNOME и ADIOS. Они определили наиболее вероятную траекторию разлива в соответствии с океанографическими и метеорологическими условиями, существовавшими во время разлива. Затем они изучили изменение в зависимости от времени физико-химических свойств углеводородной смеси. В частности, изменение испарившейся фракции разлитой нефти в зависимости от времени. **Пападимитракис и др. (Papadimitrakis) 2006** [165], представили математическую модель, которая имитирует зависящее от времени поведение разлива нефти вблизи прибрежных зон. В модели был решен полный набор дифференциальных уравнений, которые управляют переходными, двухфазными, турбулентными потоками и явлениями переноса тепла/массы. Модель была использована для прогнозирования последствий гипотетических разливов нефти, которые могут произойти вблизи прибрежной зоны

большой природной красоты и туристической привлекательности у острова Лесбос в Греции. **Ветамони и др. (Vethamony) [166]**, использовали модель анализа разливов MIKE 21 для моделирования реального разлива нефти, произошедшего в прибрежных водах Индии. Они создали карты траектории движения разлитой нефти и подтвердили гидродинамику и траекторию разлива с помощью полевых измерений и наблюдений. **Эльхаким и др. (Elhakeem) 2007 [167]**, представили моделирование траектории разлива нефти в Аравийском (Персидском) заливе с использованием 3-D прямолинейной гидродинамической модели и модели разлива нефти MIKE3. Типичные репрезентативные условия окружающей среды Персидского залива были сначала настроены на гидродинамическую модель циркуляции с использованием данных из различных источников. Модель анализа разлива была создана с использованием поля течения, полученного в результате гидродинамического моделирования. Далее ее эффективность была проверена на основе зарегистрированных случаев исторической катастрофы с разливом нефти в заливе Аль-Ахмади. **Диаз и др. (Díaz) 2008 [168]**, использовали вероятностную модель отслеживания частиц для моделирования распространения нефти после разлива нефти из затонувшего судна Prestige в Галисии, Испания. **Гуо и Ванг (Guo and Wang) 2009 [169]**, на основе алгоритма нефтяных частиц в сочетании с трехмерной гидродинамической моделью свободной поверхности и волновой моделью третьего поколения смоделировали выброс нефти в прибрежных водах Даляня. **Ляо и Ли (Liao and Li) 2010 [170]**, использовали алгоритм отслеживания частиц нефти Лагранжа для прогнозирования траектории движения разлитой нефти и процессов судьбы разлива нефти и применили его для моделирования инцидента с разливом нефти "Hyundai Advance", который произошел в устье Жемчужной реки, Китай. **Лю и др. (Liu) 2011 [171]**, реализовали систему моделирования траектории Лагранжа сразу после начала разлива в Мексиканском заливе, используя численную модель и ресурсы спутникового дистанционного зондирования, доступные в рамках существующих мероприятий по наблюдению за прибрежной зоной океана. **Мариано и др. (Mariano) 2011 [172]**, разработали две модели траектории движения нефтяных частиц и применили их к разливу нефти (Deerwater Horizon) 2010 года в Мексиканском

заливе. Обе модели использовали поля морских течений, полученные в результате имитации численной модели циркуляции океана высокого разрешения (HYCOM). Модели использовали метод Лагранжа для адвекции нефтяных частиц и схемы Монте-Карло для представления неопределенных биохимических и физических процессов. **Кукко и др. (Cucco) 2012** [173], использовали операционные численные модели конечных элементов с высоким пространственным разрешением, вложенные в операционную модель грубого открытого океана, основанную на методе конечных разностей, для воспроизведения гидродинамики и процессов переноса, происходящих в прибрежных районах, характеризующихся сложной геометрией. **Кванг и др. (Quang) 2013** [174], моделирование переноса разлива нефти у порта Лач Хуен на северо-востоке Вьетнама в результате столкновения судов с использованием MIKE 21 SA. Результаты моделирования показали, что траектория разлива и площадь пятна зависят от гидравлического режима анализа, направления ветра и волн в районе исследования. **Прабху и Канкара (Prabhu and Kankara) 2014** [175], разработали систему на базе MATLAB для моделирования траектории разлива нефти с использованием модели GNOME для побережья Индии. Система генерирует данные о течении, обрабатываемые различными моделями, такими как MIKE-21, ADCIRC, а также принимает данные о течении в нескольких форматах файлов (ASCII, netCDF) от различных типов моделей. разработанная система помогает выбрать оптимальные данные, необходимые для модели GNOME. **Лю и др. (Liu) 2015** [176], разработали модель траектории движения нефтяных частиц, которую затем применили к подповерхностному разливу нефти Penglai 2011 года в китайском Бохайском море. Трехмерная модель имитировала поля океанических течений и использовала метеорологические данные с местной измерительной станции для дрейфа разлитой нефти. **Мишра и Кумар (Mishra and Kumar) 2015** [19], смоделировали и проанализировали влияние начальных свойств нефти на ее поведение сразу после разлива. Они выбрали три различные нефти: тяжелую, промежуточную и легкую и использовали метод Рунге-Кутты четвертого порядка для одновременного решения процессов растекания, испарения, растворения и эмульгирования. Они обнаружили, что легкая и промежуточная нефть с течением

времени поглощает больше воды, чем тяжелая нефть. **Тоз и др. (Toz) 2016** [177], исследовали разлив нефти и спрогнозировали будущие аварии, которые могут произойти в районе залива Нью-Йорк, Америка. ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills), был проведен для расчетов естественной деградации, а GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), был проведен для моделирования поверхностного распространения. **Юй и др. (Yu) 2016** [178], предложили метод ретроспективного прогнозирования с параметризацией случайного блуждания и объединили его с данными дистанционного зондирования и моделями нефтяных разливов для Бохайского моря, Китай. **Тоз (Toz) 2017** [52], исследовали разлив нефти и спрогнозировали будущие аварии, которые могут произойти в районе Самсунского залива Черного моря. Они использовали ADIOS и OILMAP для моделирования движения и судьбы разлитой нефти. **Лу и др. (Lu) 2017** [179], смоделировали перенос и судьбу нефти после предполагаемого инцидента с разливом нефти в Баренцевом море с помощью модели OSCAR. Они рассчитали вероятность попадания разлитой нефти в открытое море и в район пряди. Зона влияния инцидента была рассчитана путем объединения результатов многих симуляций. **Ли и др. (Li) 2017** [180], разработали 3D-математическую модель для оценки скорости высвобождения нефти и моделирования дисперсионного поведения нефти. Метод Эйлера-Лагранжа используется для отслеживания траектории миграции капель нефти. **Кьяо и др. (Qiao) 2019** [181], создали связанную 3D модель для краткосрочного и долгосрочного моделирования и прогнозирования разлива нефти в Санчи примерно в 300 км от Шанхая, Китай. Модель состоит из двух частей: (1) связанная 3D система оперативного океанического прогноза для моделирования океанической среды и (2) 3D модель разлива нефти для моделирования траекторий движения частиц нефти на основе их свойств. **Сусси и др. (Soussi) 2019** [182], разработали модель для моделирования траекторий разлива нефти на море на основе лагранжева подхода, чтобы определить поведение нефтяных пятен на поверхности воды в пространстве и времени. Динамика распространения нефти на поверхности моря моделировалась с учетом фактических значений скорости ветра и интенсивности поверхностного течения. Модель была применена для моделирования распространения

нефтяного пятна в реальном случае столкновения у побережья Сен-Тропе, Франция. **Жэнь и др. (Zhen) 2020** [183], создали модель дрейфа нефтяных частиц и модель выветривания нефтяного пятна и использовали их для моделирования аварийных разливов нефти на морской акватории, вводя данные о местности, условиях окружающей среды и информацию о разливе нефти в гидродинамическую модель и модель разлива нефти. Они применили модель к заливу Дайя, Южно-Китайское море. **Прасад и др. (Prasad) 2020** [184], смоделировали траекторию разлива нефти в результате затопления торгового судна (ТСС) с помощью модели GNOME. GNOME была принудительно нагружена ветрами из Европейского центра прогноза погоды средней дальности (ECMWF) и океаническими течениями из Системы прогнозирования Индийского океана и Системы оперативного прогнозирования и реанализа океана высокого разрешения. **Лоуэн (Lawan) 2020** [185], смоделировал траекторию и судьбу разлива нефти на Багамском побережье Карибского моря, используя GNOME и модель ADIOS. **Хоссейнпур и др. (Hosseinpour) 2020** [186], провели трехдневное моделирование утечки нефти и ее распределения в различных объемах для пяти нефтяных операционных зон в нефтяном регионе Siri, который расположен в северо-западной части датского сектора Северного моря, используя модель GNOME для отслеживания разлива нефти. **Балогун и др. (Balogun) 2021** [187], использовали модель GNOME для разработки модели экологической уязвимости при разливе нефти для прогнозирования и картирования траектории движения нефтяного пятна в Кота Тинги, Малайзия. Полученный результат был интегрирован с прибрежными ресурсами, включающими биологические, социально-экономические и физические особенности береговой линии. Влияние сезонных колебаний на уязвимость прибрежных ресурсов к разливу нефти было смоделировано путем оценки количества прибрежных ресурсов, пострадавших в течение трех климатических сезонов. **Наз и др. (Naz) 2021** [188], смоделировали четыре случая разлива нефти в Индийском океане. Они использовали общую среду оперативного моделирования Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) (GNOME) и автоматизированный запрос данных о разливе нефти (ADIOS) для моделирования движения нефтяного пятна и расчета

процессов выветривания после разлива. **Гурумоорти и др. (Gurumoorthi) 2021** [10], оценили судьбу разлива нефти MV Wakashio после того, как японский балкер Wakashio сел на мель на коралловом рифе на юге Маврикия, и движущие силы, ответственные за возможные экологические последствия загрязненного прибрежного региона. Они использовали модель GNOME с учетом различных метеоокеанографических воздействий, таких как (i) ветры и морские течения, (ii) только ветры и (iii) только ветры с различными коэффициентами диффузии, а затем подтвердили результаты с помощью спутниковых снимков. **Прадхан и др. (Pradhan) 2022** [189], изучили воздействие гипотетических разливов нефти в прибрежной зоне Одиша, прибрежного штата на восточном побережье Индии, используя модель GNOME. Они смоделировали 10 000 баррелей средней сырой нефти в различных местах шельфа Одиша при различных погодных условиях. **Прасад и др. (Prasad) 2022** [95], использовали общую среду оперативного моделирования Национального управления океанических и атмосферных исследований (GNOME) для моделирования дрейфа тяжелого мазута (HFO) в результате столкновения судов в Бенгальском заливе. Они получили поля скорости ветра из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), а смоделированные океанические течения - из Системы оперативного океанического прогнозирования и реанализа высокого разрешения (HOOFs). **Грубешич и Нельсон (Grubestic and Nelson) 2022** [190], оценили потенциальную пространственную уязвимость береговых линий от разлива нефти с судна Nabarima, которое является плавучим хранилищем и разгрузочным судном в заливе Пария, между Венесуэлой и островом Тринидад. Они смоделировали траекторию и судьбу разлитой нефти с помощью модели Blowout and Spill Occurrence Model (BLOSOM). **Акинбамини и др. (Akinbamini) 2022** [191], использовали GNOME и ADIOS для прогнозирования траектории и судьбы разлива тяжелой нефти с платформы с плавучим накопителем на нефтяном месторождении на континентальном шельфе Великобритании в течение 5 дней в октябре при воздействии двух различных океанических моделей, а именно системы прогнозирования океана в реальном времени (RTOFS) и гибридной координатной модели океана (HYCOM).

Глава 2. Используемая методология и данные

Суэцкий залив (СЗ) является одним из самых оживленных судоходных путей в мире и основным источником сырой нефти для Египта. Поэтому залив очень уязвим для разливов нефти, которые могут угрожать прибрежной экосистеме и туристическим курортам. Целью данного исследования является прогноз траектории и судьбы разлива нефти с использованием общей среды оперативного моделирования NOAA (GNOME) и моделей автоматизированного поиска данных о разливах нефти (ADIOS2) для прогнозирования регионов, подвергшихся воздействию, определения времени достижения нефтью береговой линии и расчета наиболее важных процессов выветривания разлитой нефти (испарение, эмульгирование и дисперсия).

2.1. Суэцкий залив

Суэцкий залив, протянувшийся на 300 км от порта Суэц до острова Шадван, соединен с северной частью Красного моря проливами Губал и Средиземным морем через Суэцкий канал [192] (**Рисунок 2.1**). Эладави и др. (Eladawy) [193] описали СЗ как полузамкнутый мелководный бассейн со средней глубиной 40 м, максимальной шириной 19-32 км и общей площадью поверхности около 10510 км². СЗ может похвастаться обилием коралловых рифов и морских обитателей, что повышает его экономическую значимость [194]. СЗ также является основным источником сырой нефти в Египте. По словам Хусейна (Hussein) [61], добыча нефти в СЗ составляет 85% добычи сырой нефти в Египте на 26 морских месторождениях, включая 136 добывающих платформ и 570 нефтяных скважин, связанных 450-мильной подводной сетью трубопроводов, созданной более 20 лет назад (**Рисунок 2.2**). После завершения нового проекта Суэцкого канала в 2015 году значение GOS для египетской экономики значительно возросло. Этот проект улучшил статус региона Суэцкого канала в мировой торговле. Таким образом, ежедневное движение по каналам увеличилось более чем на 56 судов, с 18 830 в 2020 году до 20 694 в 2021 году [195] (**Рисунок 2.3**).

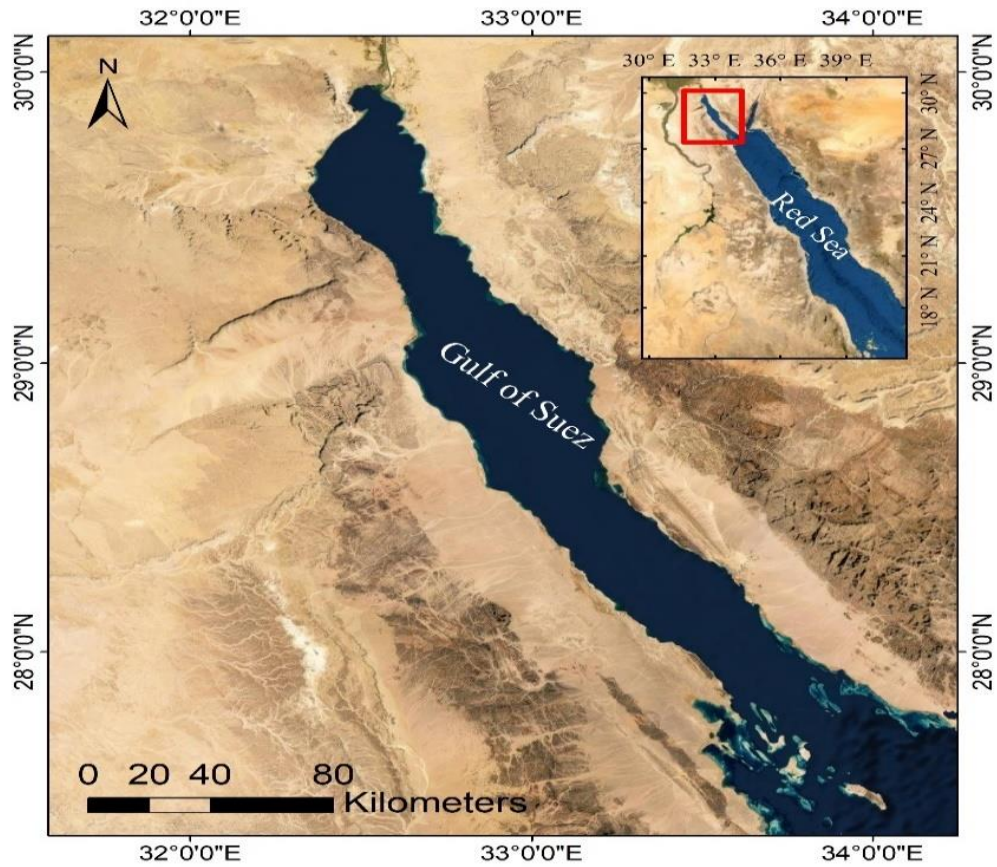


Рисунок 2.1 Топографическая карта Суэцкого залива

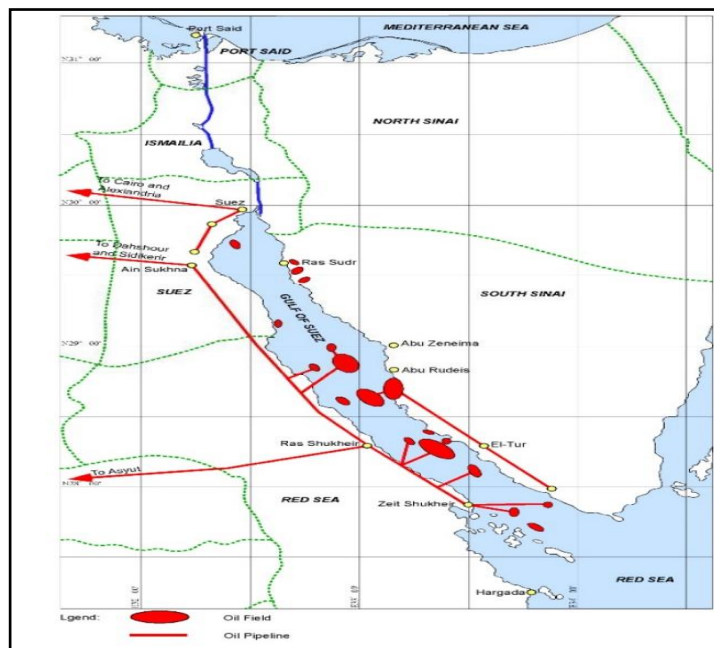


Рисунок 2.2 Местоположения нефтяных месторождений и трубопроводов в Суэцком заливе [200]

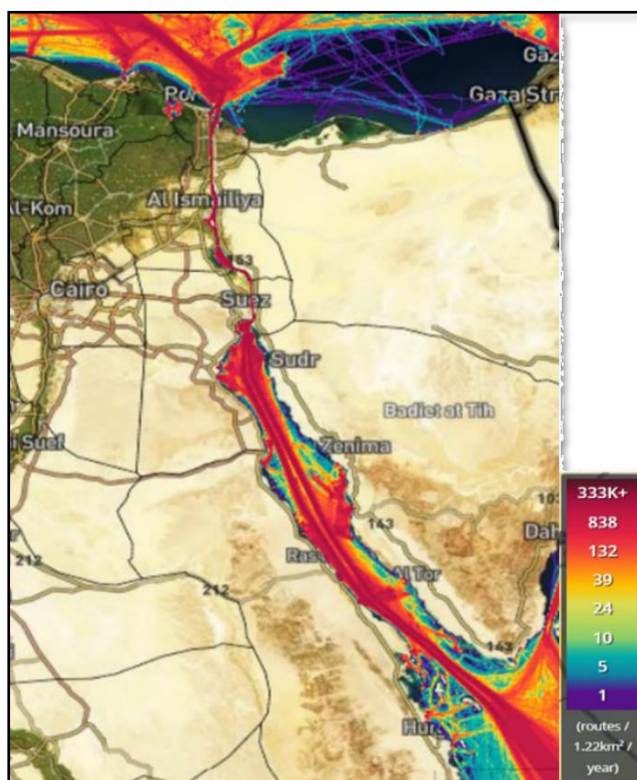


Рисунок 2.3 Контуры, изображающие плотность морских перевозок в Суэцком заливе для всех типов судов в 2021 году [201].

Учитывая массовый перенос нефти вдоль своей главной оси, СЗ постоянно подвергается риску случайных разливов нефти, худший из которых произошел в 1982 [196]. В течение 4–6 ч значительное количество сырой нефти было выброшено в море при погрузке танкера в Рас-Шухейре [197]. В июне 2010 года разлив нефти в северной части Красного моря загрязнил около 160 км береговой линии, включая туристические пляжные курорты в Египте и побережье Джебель аль-Зайт [198]. Следовательно, судовые перевозки и размеры танкеров увеличиваются с каждым днем, и эта тенденция, вероятно, сохранится [199].

Отдел управления прибрежными и морскими зонами Сектора рационального природопользования Египетского агентства по вопросам окружающей среды (Egyptian Environmental Affairs Agency) (ЕЕАА) располагает данными об инцидентах, связанных с разливами нефти в период с 1998 по 2005 год. Из 122 случаев разлива нефти были выявлены пятна 85 инцидентов. На **Рисунок 2. 4** показаны зоны, пострадавшие от

аварийных разливов нефти с 1998 по 2005 год. Этот рисунок также показывает, что в Суэцком заливе возможны разливы нефти во всей зоне. Однако следующие зоны страдали от частых инцидентов:

- 1) Хургада (15 инцидентов)
- 2) Порт Айн-Сухна (15 инцидентов)
- 3) Южный вход в Суэцкий канал (12 инцидентов)

Благодаря своему стратегическому положению между Средиземным морем и Индийским океаном, Красное море подвержено значительной судоходной активности, в частности, движению нефтяных танкеров. Поэтому оно является потенциально уязвимым местом для разливов нефти, вызванных непреднамеренными сбросами, которые могут нанести вред окружающей среде. Следовательно, выгодно обладать знаниями о механизмах транспортировки, которые происходят в Красном море, и технологиями прогнозирования, которые могут помочь в принятии решений при непреднамеренном разливе нефти. К сожалению, в литературе описано мало моделей нефтяных разливов для Красного моря.

Наср и Смит (Nasr and Smith) 2006 [62], провели компьютерное моделирование разливов нефти для четырех экологически чувствительных районов вдоль побережья Египта, используя модель разлива нефти S.L. ROSS, которая включает в себя основные переменные и процессы, влияющие на перенос нефти в морской воде. Они не приводят подробностей о том, как была получена циркуляция воды (основной движущий механизм переноса): только то, что карта течений воды была построена с учетом данных из различных источников, включая наблюдения морских капитанов. **Шехаде и др. (Shehadeh) 2012** [202], смоделировали разлив нефти в результате выброса нефти на буровой платформе в Суэцком заливе, регион Красного моря, используя канадскую модель прогнозирования разливов нефти S.L. ROSS. Модель описывает траекторию и поведение нефтяных разливов как функцию типа, размера, свойств нефти и преобладающих условий окружающей среды. Компонент траектории разлива основан

на вводе наилучших доступных данных о ветре и течении. Кроме того, модель имитирует результаты процессов выветривания разлива: растекание, испарение, естественное рассеивание и эмульгирование через регулярные промежутки времени. **Перианез (Perianez) 2020** [64], разработали модель разлива нефти для Красного моря. В ней используются подробные данные о циркуляции воды: мгновенные приливные течения, остатки приливов (оба показателя получены с помощью модели приливов, специально применяемой для Красного моря), а также бароклинная циркуляция, полученная с помощью океанической модели NUCOM. Модель также может включать прогнозы местных (в районе разлива) ветров. Лагранжева модель переноса включает адвекцию/диффузию плюс специфические процессы для нефти, такие как плавучесть, разложение и испарение. **Омар и др. (Omar) 2021** [65], смоделировали траекторию и судьбу двадцати четырех сценариев (12 обычных и 12 наихудших сценариев), используя канадскую прогностическую математическую модель разлива нефти S.L. Ross от предполагаемого источника нефтяной буровой установки вблизи района Рас-Гариб в регионе Красного моря. **Мона (Mona) 2021** [61], моделировала гипотетический разлив сырой нефти, используя модель GNOME и географические информационные системы (ГИС) для оценки уязвимости экологически чувствительных берегов к крупному разливу нефти в северной части Суэцкого залива. Она не исследовала, как на нефть влияет выветривание после разлива, и не определяла, какое количество нефти достигло береговой линии. **Хуинь и др. (Huynh) 2021** [46], смоделировали судьбу и траекторию разлива нефти с помощью моделей GNOME и ADIOS, а затем смоделировали непосредственное воздействие танкера Safer на здоровье населения. Танкер Safer — это разрушающийся нефтяной танкер, содержащий 1,1 млн баррелей нефти, который с 2015 года брошен у берегов Йемена и угрожает экологической катастрофой стране, находящейся в настоящее время в состоянии гуманитарного кризиса.

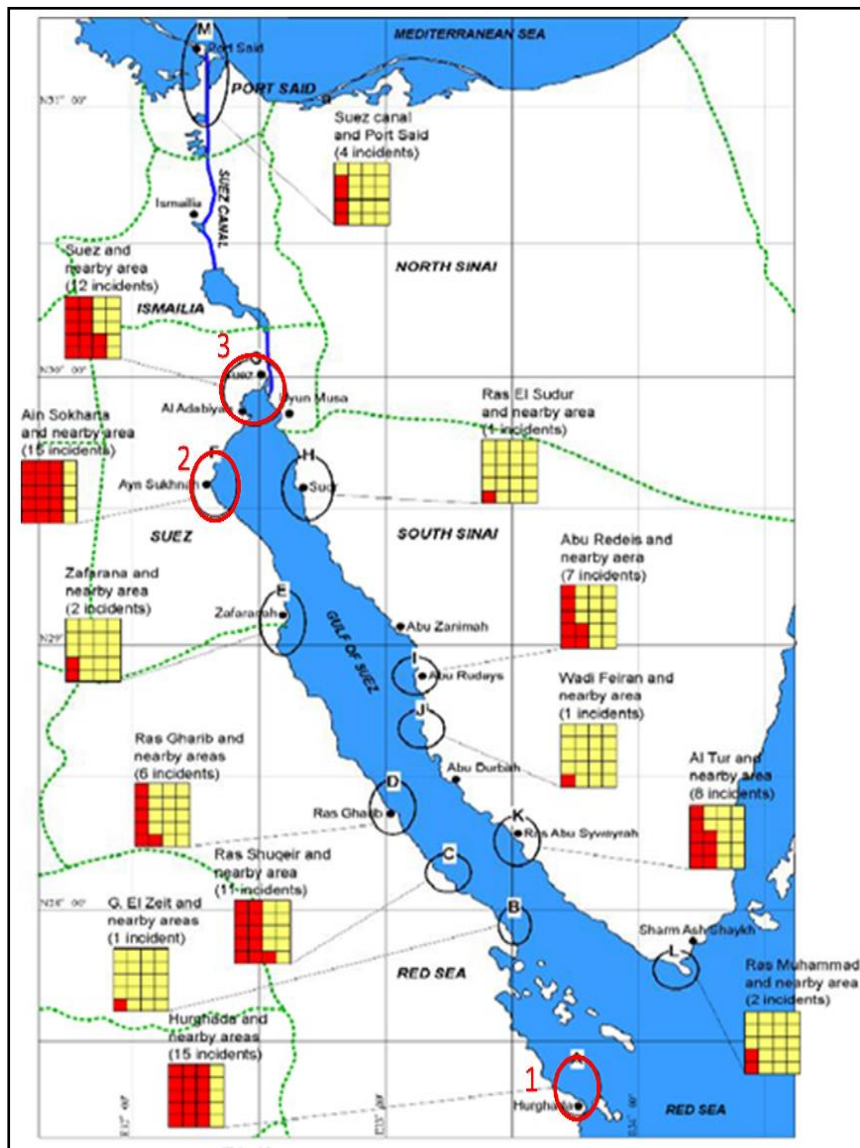


Рисунок 2. 4 Зональное распределение инцидентов с разливами нефти с 1998 по 2005 год в Суэцком заливе, наиболее частые зоны разливов нефти обведены красным цветом; 1) Хургада 2) Айн Сухна 3) южный вход в Суэцкий канал. (каждый красный кубик представляет один инцидент)

2.2. Модель разлива нефти GNOME

2.2.1. Обзор и описание модели

Модель General National Oceanic and Atmospheric Administration Operational Oil Modeling Environment (GNOME) была разработана NOAA's Hazardous Materials Response (HAZMAT) и дебютировала 16 марта 1999 года [43]. GNOME написан на C++,

тщательно используя классы и объекты языка, что облегчает обновление, расширение и улучшение модели. Модель также содержит графический интерфейс пользователя, проверенный на ясность и простоту использования. Модель GNOME является двумерной и часто используется в морской, прибрежной и речной среде для прогнозирования движения нефтяных пятен [44,45]. Модель GNOME использует метод отслеживания частиц Эйлера-Лагранжа для мониторинга дрейфа разливов нефти [203]. Нефтяное пятно рассматривается как набор частиц. По мере перемещения каждой частицы по воде рассчитывается маршрут, пройденный этой частицей. Скорость и направление движения каждой частицы, которые меняются со временем, также могут быть рассчитаны. Благодаря диффузии можно отслеживать состояние нефти в режиме реального времени [25,204].

Набор входных данных GNOME содержит: данные о береговой линии, направление и величину ветра и морских течений, местоположение разлива, и объем разлива. Кроме того, модель предоставляет выходные данные траектории с привязкой к географическим координатам, которые могут быть использованы в качестве входных данных для инструментов ГИС (Географической Информационной Системы) [47]. Мы выбрали инструмент моделирования GNOME из-за его истории оперативного внедрения и проверки на реальных экологических катастрофах и широкого использования среди организаций [1,46]. Кроме того, он более обобщаем, чем другие модели, и требует меньше параметров в качестве входных данных [44]. Более того, результаты GNOME для многих ситуаций продемонстрировали значительную степень согласия между моделированием, спутниковыми данными и экспериментальными наблюдениями, что было подтверждено несколькими исследованиями [45,48]. В результате Центр морской аварийной взаимопомощи рекомендовал использовать модель GNOME для моделирования разливов нефти в Персидском заливе [49].

В целом, преимущества использования GNOME следующие:

- Она бесплатная и с открытым исходным кодом, что делает ее доступной для широкого круга пользователей.

- Она широко используется и хорошо зарекомендовала себя, имеет большое сообщество пользователей, которые могут оказать поддержку и поделиться опытом.

- Она может включать в себя погодные и океанографические данные в режиме реального времени, что позволяет более точно прогнозировать движение и рассеивание нефти.

- Она позволяет пользователям включать данные ГИС, такие как береговая линия, среда обитания и батиметрия, которые могут быть использованы для определения зон повышенной экологической чувствительности.

- Она может моделировать поведение нефти в толще воды и на поверхности с учетом таких факторов, как ветер, волны, приливы и океанские течения.

- Она также может моделировать воздействие химических диспергентов и физических методов добычи, таких как использование боновых заграждений и скиммеров.

В целом, GNOME — это мощное и широко используемое программное обеспечение для моделирования разливов нефти, которое может предоставить ценную информацию для ликвидации разливов нефти и управления ими.

2.2.2. Движущие силы

Движущими силами являются любые физические факторы, вызывающие перемещение загрязняющего вещества (например, нефти) в воде - как правило, это течения, ветры и диффузия. Движущие силы делятся на две категории. Универсальные движители действуют везде и обычно состоят из ветра и диффузии. Все остальные движители действуют только на той карте, к которой они прикреплены. Использование нескольких карт на самом деле является наследием предыдущего воплощения модели, написанной в то время, когда компьютеры не имели достаточно памяти для считывания одной карты для всего прибрежного региона. По большей части, теперь достаточно

одной карты, и все движители могут быть размещены на этой карте. Чтобы получить общее движение, компоненты скорости u (восток-запад) и v (север-юг) от течений, ветра, диффузии и любых других движителей складываются вместе на каждом временном шаге i , используя прямую схему Эйлера (метод Рунге-Кутты 1-го порядка). Движителям дается точка (x, y, z, t) и возвращается смещение $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ при t , **уравнение (2.1)** (расчет зонального, меридионального и вертикального смещения под действием движущих сил).

$$\Delta x = \frac{u}{111,120.00024 \cdot \cos(y)} * \Delta t, \Delta y = \frac{v}{111,120.00024} * \Delta t, \text{ and } \Delta z = 0 \quad (2.1)$$

где $\Delta t = t - t_1$ - время, прошедшее между этапами времени i ; y — широта в радианах; 111,120.00024 - количество метров на градус широты (предполагается, что 1' широты = 1 морская миля везде); и $(\Delta x, \Delta y)$ — двумерное смещение по долготы и широте, соответственно, u и v - проекции морского течения на оси x и y соответственно на данном слое глубины z . В настоящее время движение в GNOME не может происходить между слоями глубины (поэтому вертикальное смещение, Δz , поддерживается равным нулю).

Расчет общего перемещения представляет собой простое векторное сложение перемещений данной частицы загрязняющего вещества под действием каждой движущей силы за временной интервал. Как правило, существует значительная неопределенность в точности входного прогноза и/или измеренных данных. Кроме того, в общем случае, эти входные данные для модели представляют собой данные сетки, которые приводят к негладким полям скоростей, что ограничивает полезность использования методов Рунге-Кутты (Runge-Kutta) более высокого порядка (если требуется дополнительная точность, уменьшение временного шага модели часто дает такое же улучшение, как и использование более сложного метода более высокого порядка). Каждая движущая сила, присутствующая в модельной установке, может быть

активной или неактивной в любой момент времени. При расчете модели будет использоваться только та движущая сила, которая отмечена как активная [23].

2.2.3. Движущие силы морского течения

GNOME принимает различные типы и форматы сетки для данных о морском течении. Выборка последних измеренных и прогнозируемых морских течений, совместимых с GNOME, доступна для загрузки из различных источников. GNOME принимает модели морских течений, зависящие от времени или находящиеся в постоянном состоянии. GNOME принимает данные модели на прямоугольных, криволинейных и треугольных сетках из различных моделей.

Для прямоугольных сеток GNOME позволяет задавать скорости в центре ячеек сетки или в узлах, но в любом случае используется одно и то же значение по всей ячейке сетки и не производится интерполяция. Прямоугольные сетки должны быть загружены на карту.

Для криволинейных и треугольных сеток GNOME создаст карту по границе сетки, если нет доступной карты береговой линии в формате (bna). При загрузке криволинейных сеток GNOME делит каждое поле сетки на два треугольника и предполагает, что скорость для обоих треугольников находится в левом нижнем углу поля сетки. GNOME также экстраполирует сетку вправо и вверх и применяет там значения скорости для первой строки и последнего столбца. Тип границы в расширенной строке и столбце принимается таким, каким он был в первой строке и последнем столбце.

2.2.4. Диффузия

Случайное распространение, т.е. диффузия, осуществляется простым случайным блужданием (random walk) с квадратной единичной вероятностью. Случайная прогулка основана на заданном в модели значении диффузии, D , которое представляет собой горизонтальную вихревую диффузию в воде. Низкое значение составляет $1\ 000\ \text{см}^2\text{с}^{-1}$, а

высокое - от 100 000 до 1 000 000 см²с⁻¹. По умолчанию в модели установлено значение 100 000 см²с⁻¹. В GNOME диффузия и распространение рассматриваются как стохастические процессы. Эффекты гравитации и поверхностного натяжения игнорируются, так как они важны только в первые моменты разлива. Сложное представление подсеточной диффузии и эффектов распространения игнорируется. GNOME использует классическую диффузию, как указано в **уравнении (2.2)** (Уравнение классической диффузии используется GNOME) и **уравнении (2.3)**.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (2.2)$$

где C - концентрация материала, а D - вышеупомянутый коэффициент диффузии.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y * \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

где D_x и D_y являются скалярными коэффициентами диффузии в направлениях x и y .

Среднее положение остается нулевым, но дисперсия линейно растет со временем. Можно показать, что длинная серия случайных шагов будет сходиться к гауссовскому распределению с дисперсией, линейно растущей со временем. Точная форма распределения вероятности перехода не имеет значения, пока его второй момент равен $2D \Delta t$. Распределение вероятности перехода — это распределение смещений на каждом шаге случайного блуждания (random walk), а D — коэффициент диффузии в уравнении диффузии. Таким образом, диффузия может быть смоделирована случайным блужданием с любым распределением, при этом результирующий коэффициент диффузии равен половине дисперсии распределения каждого шага, деленной на шаг времени, **уравнение (2.4)**.

$$D_x = \frac{1}{2} * \frac{\sigma_x^2}{\Delta t} \quad (2.4)$$

В GNOME мы вычисляем $(\Delta x, \Delta y)$ из входного коэффициента диффузии D , и на каждом шаге времени диффузии dx и dy выбираются случайным образом из

равномерного распределения (чисел с плавающей запятой) между -1 и 1 таким образом, что $-\Delta x \leq dx \leq \Delta x - \Delta y \leq dy \leq \Delta y$, и $\Delta x = \Delta y$. В результате получается распределение точек, разбросанных по всей площади. Дисперсия (σ_x^2) этого распределения задается **уравнением (2.5)** (Дисперсия распределения рассеянных точек), и аналогично для σ_y^2 . Следовательно, расчет зонального и меридионального смещения за счет диффузии дается **уравнением (2.6)**.

$$\sigma_x^2 = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} \frac{x^2}{2 * \Delta x} dx = \frac{\Delta x^2}{3} \quad (2.5)$$

$$\Delta x = \frac{dx * \sqrt{\frac{6 * \frac{D}{10,000} * \Delta t}{111,120.00024}}}{\cos(y)}, \quad \Delta y = dy * \sqrt{\frac{6 * \frac{D}{10,000} * \Delta t}{111,120.00024}} \quad (2.6)$$

GNOME также имеет алгоритм диффузии, зависящий от глубины (z), **Уравнение (2.7)**, но на данный момент он доступен только для файлов местоположения или сценариев, управляемых командной строкой [23].

$$D = 10^{1+e^{(1-\frac{10}{z})}} \quad (2.7)$$

2.2.5. Выбрасывание на берег

После перемещения элементов Лагранжа (LE) на каждом временном шаге GNOME проверяет карту (т.е. растровое изображение), чтобы увидеть, находятся ли новые позиции элементов Лагранжа на суше или в воде. Алгоритм причаливания проверяет всю линию на растровом изображении между старой и новой точками, чтобы убедиться, что LE не перепрыгнул через сушу, и причаливает элементы Лагранжа в первой попавшейся точке суши. Местоположение в воде непосредственно перед достижением суши также сохраняется для использования в качестве начальной точки при повторном всплытии частицы. Если флажок "предотвращать прыжки на сушу" не установлен,

упрощенный алгоритм рассматривает, находится ли новая точка в воде или на суше, и игнорирует путь, пройденный элементами Лагранжа. По умолчанию опция "предотвратить прыжки на сушу" включена. Взаимодействие загрязнителя с отложениями и биотой не моделируется.

2.2.6. Траектории разливов нефти

После того как карта, движители и разливы заданы, модель запускается, и решение выдается в виде траекторий. GNOME предлагает два решения для сценария разлива нефти:

1. "решения с наилучшей оценкой" "best estimate solutions" - черные точки
2. "решение с минимальным сожалением" "minimum regret solutions" или траектория неопределенности.

Решение "наилучшей оценки" показывает результат моделирования при условии, что все входные данные считаются верными. Однако модели, наблюдения и прогнозы редко бывают совершенными. Поэтому мы включили в GNOME наше понимание неопределенностей (таких как колебания ветра или течений), которые могут иметь место. Это второе решение позволяет модели предсказывать другие возможные траектории, вероятность которых меньше, но которые могут иметь более высокие связанные с ними риски. Мы называем траекторию, учитывающую эти неопределенности, "решением с минимальным сожалением", поскольку оно дает вам информацию об областях, которые могут пострадать, если, например, ветер будет дуть с несколько иного направления, чем вы указали, или если течения в районе будут протекать несколько быстрее или медленнее, чем ожидалось. В некоторых случаях территории, находящиеся в пределах решений с минимальным сожалением, могут быть особенно ценными или чувствительными к нефтяному загрязнению.

Обе траектории представлены LE, которые являются статистически независимыми частями моделируемого загрязняющего вещества. Они появляются как маленькие

"частицы загрязнителя" на карте при запуске разлива. Траектория "наилучшего предположения" представлена черными "пятнами"; траектория "минимального сожаления" представлена красными "пятнами". [23].

2.3. ADIOS2 Модель выветривания разливов нефти

Выветривание нефти представляет собой набор процессов, которые влияют на химические и физические свойства разлитой нефти, наиболее значительными из которых являются испарение, эмульгирование и естественная дисперсия [101,102,104,205]. Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) разработало модель (ADIOS2) для расчета процессов выветривания нефти [50]. В своих вычислениях модель ADIOS2 использует данные об окружающей среде в режиме реального времени, такие как скорость ветра, а также физические и химические свойства разлитой нефти из своей библиотеки нефти. Он сочетает библиотеку из около 1000 масел с краткосрочной моделью судьбы и очистки нефти для оценки стойкости разлитой нефти в морской среде и предложения стратегий очистки [51]. Модель может вычислять процессы выветривания нефти, разлитой в различных водных средах, таких как прибрежные районы, открытое море, полуограниченные прибрежные воды и реки [52]. В нескольких исследованиях модель ADIOS2 использовалась для моделирования поведения нефти при разливе в морскую среду [24,25,46,52,67,191]. **Рисунок 2.5** иллюстрирует структуру программы.

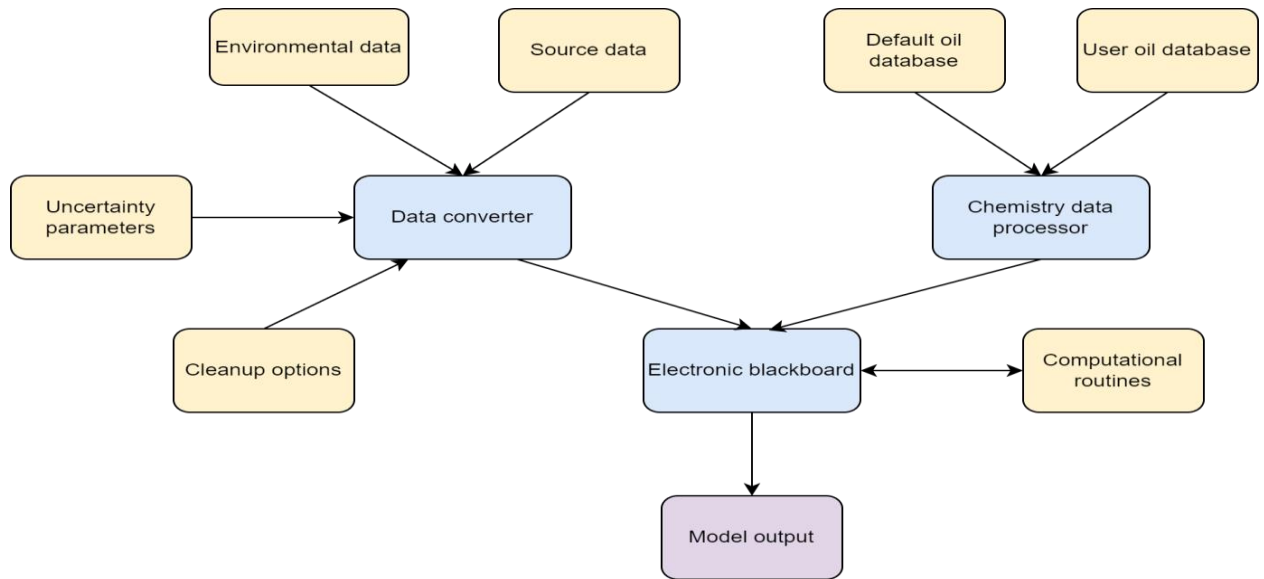


Рисунок 2.5 Структура программы ADIOS2 [50]

2.3.1. Испарение нефти

ADIOS2 содержит псевдо-компонентную модель испарения [206]. При псевдо-компонентном подходе сырая нефть и продукты нефтепереработки моделируются как относительно небольшое количество дискретных, невзаимодействующих компонентов. Каждый псевдо-компонент рассматривается как отдельное вещество с соответствующим давлением пара и относительной мольной долей. Общая скорость испарения пятна представляет собой сумму индивидуальных скоростей. Однако индивидуальная скорость для конкретного компонента связана с другими псевдо-компонентами относительной мольной долей. Для создания псевдо-компонентов используются отрезки перегонки из базы данных нефти. Объемная скорость испарения для одного псевдо-компонента может быть записана как функция объема нефти, мольной доли и молярного объема компонента, Error! Reference source not found.):

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_j \propto \frac{U^{7/9} V (P_v v f_m)_j}{d} \quad (2.8)$$

Здесь j указывает конкретный псевдо-компонент, f_m — изменяющаяся во времени молярная доля псевдо-компонента, V — объем нефти, U — скорость ветра, d — толщина

пятна. Она оценивается путем рассмотрения псевдо-компонента как совокупности алканов (ациклических углеводородов) и использования эмпирической зависимости молярного объема алканов от их температуры кипения. Давление пара каждого псевдо-компонента основано, P_v основано на уравнении Антуана, как обсуждалось в [207]. Множество связанных (по молярной фракции) дифференциальных **уравнений (2.8)** решено приблизительно с использованием распространения метода испарительного воздействия Маккея (MacKay) [208] на несколько компонентов.

2.3.2. Эмульгирование нефти

В серии лабораторных экспериментов с сырой нефтью Элей и др. (Eley) 1988 [209] обнаружили, что скорость образования эмульсии лучше всего описывается законом первого порядка для межфазной площади, а не для содержания воды. Их формулировка была использована в ADIOS2 для описания того, как содержание воды и распределение капель по размерам изменяются со временем Error! Reference source not found.):

$$\frac{dS}{dt} = K_s \left(1 - \frac{S}{S_{max}} \right) \quad (2.9)$$

где межфазный параметр, K_s , чувствителен к волновой энергии. Здесь S и S_{max} — нефтеводная межфазная зона и максимальная межфазная площадь соответственно. Доля воды в водонефтяной эмульсии Y связана с межфазной площадью и средним диаметром капель воды d_w , по **уравнению (2.10)**.

$$Y = \frac{S d_w}{6 + S d_w} \quad (2.10)$$

2.3.3. Дисперсия нефти

В ADIOS2 дисперсия нефти в толще воды оценивается с помощью гидравлической модели, разработанной Дельвинь и Суини (Delvigne и Sweeney) 1988 [120]. Они измерили количество и распределение по размерам капель нефти, загнанных в толщу

воды разбивающимися волнами. Вертикальный унос нефти прямо пропорционален диссипации энергии одной разбивающейся волны, общей скорости диссипации для данного спектра волн и объему нефти, впрыскиваемой в поверхностный слой при каждом разбивании волны. Формула Дельвинь и Суини объемного уноса нефти, Q , дается следующим образом, **Уравнение (2.11)**:

$$Q = C_{disp} D_e^{0.57} f_{bw} V_{disp} \quad (2.11)$$

Здесь находится C_{disp} экспериментально определенный параметр, f_{bw} , представляющий собой долю разрывных волн на волновой период на единицу площади, и V_{disp} объем нефти, захваченной на единицу объема воды. Его получают (в пределах константы) (с точностью до константы) путем интегрирования произведения объема капель и частотного распределения капель по объему нефти. Диссипация волновой энергии на единицу площади поверхности, D_e , оценивается по **уравнению (2.12)**:

$$D_e = 0.0034 P_w g H_{rms}^2 \quad (2.12)$$

где H_{rms} — среднеквадратичная высота волны в метрах, а P_w плотность воды в килограммах на кубический метр. Определение f_{bw} является сложным и подвержено большой неопределенности [210]. Дельвинь и Суини (Delvigne и Sweeney) (1988) [120] использовали полевые наблюдения Холтуйсен и Херберс (Holthuijsen and Herbers) (1986) [211] и Тоба и др. (Toba) (1971) [212] для оценки доли морской поверхности, покрытой белыми каплями, как функции скорости ветра на десятиметровой высоте. ADIOS2 предполагает, что формирование белой шапки начинается со скоростью 3 м/сек и линейно увеличивается до 5% покрытия при 4 м/сек, где применяется вторая линейная зависимость, использующая более поздние наблюдения Динг и Фармер (Ding and Farmer) (1994) [213], применяется в **уравнении (2.13)**:

$$f_w = 0.01 U + 0.01 \quad (2.13)$$

Здесь f_w фракция «белой шапки». В настоящее время рассматриваются альтернативные формулировки, особенно для условий высокой энергии, когда рост белого пятна может быть более быстрым, чем описывается **уравнением (2.13)**. Доля разрушающихся волн в единицу времени рассчитывается путем деления доли белого колпака (как определено в терминах определения активного акустического покрытия, данного Дингом и Фармером) на соответствующую постоянную времени для формирования белого колпака [214].

2.4. Формулирование модели и ввод данных

Для моделирования распределения и судьбы нефтяных пятен в Суэцком заливе мы использовали модели GNOME и ADIOS2 вместе. Наборы входных данных содержат данные о береговой линии, данные о ветре, данные о морских течениях, местоположение разлива нефти, тип нефти, количество нефти и температуру морской воды. Блок-схема входных и выходных данных модели представлена в кратком виде на рисунке на **Рисунок 2. 6**.

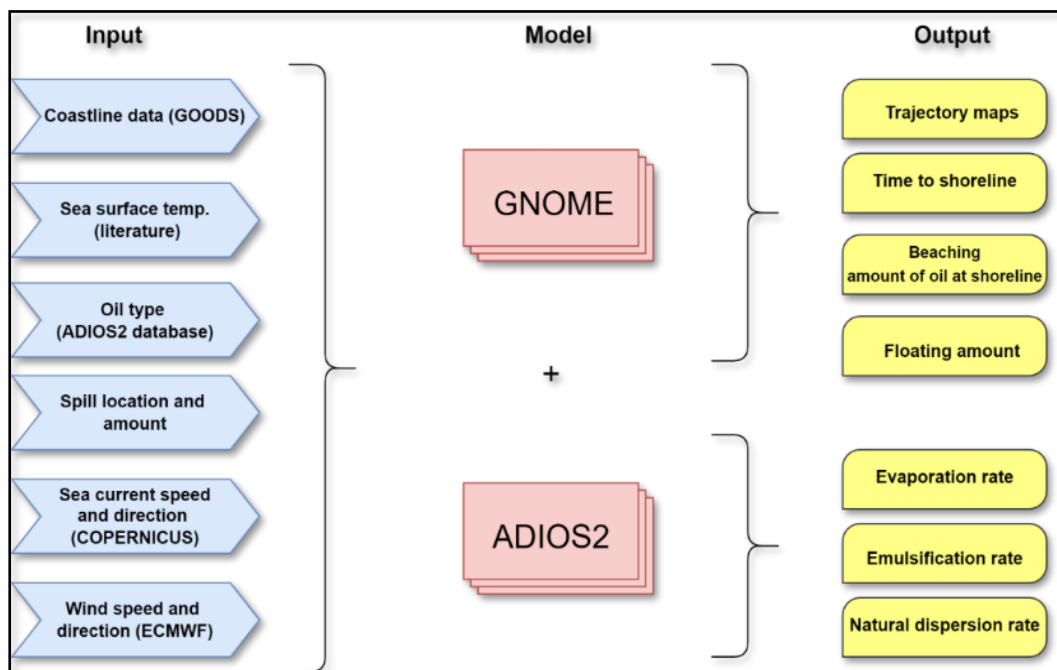


Рисунок 2. 6 Структура диаграмм входных и выходных данных моделей GNOME и ADIOS2

2.4.1. Данные о береговой линии и температуре поверхности моря

Модель GNOME работает только с данными береговой линии в формате (bna), которые могут быть получены из глобальной самосогласованной, иерархической базы данных береговой линии высокого разрешения (GSHHS), а затем преобразованы в формат (bna) с помощью сервера океанографических данных GNOME Online (GOODS) (https://gnome.orr.noaa.gov/goods/tools/GSHHS/coast_subset) **Рисунок 2.7.** Благодаря комплексной обработке набора данных GSHHG, любые ошибки или выбросы должны быть устранены. Береговые линии состоят из иерархически замкнутых многоугольников [17,215]. Данные береговой линии для имитационной модели в нашем исследовании простираются от 32°E до 35,5° E и от 26,5°N до 31° N, охватывая северную часть Красного моря, включая заливы Суэц и Акаба. Температура морской воды, используемая в этом исследовании, была извлечена из предыдущих исследований для каждого места.

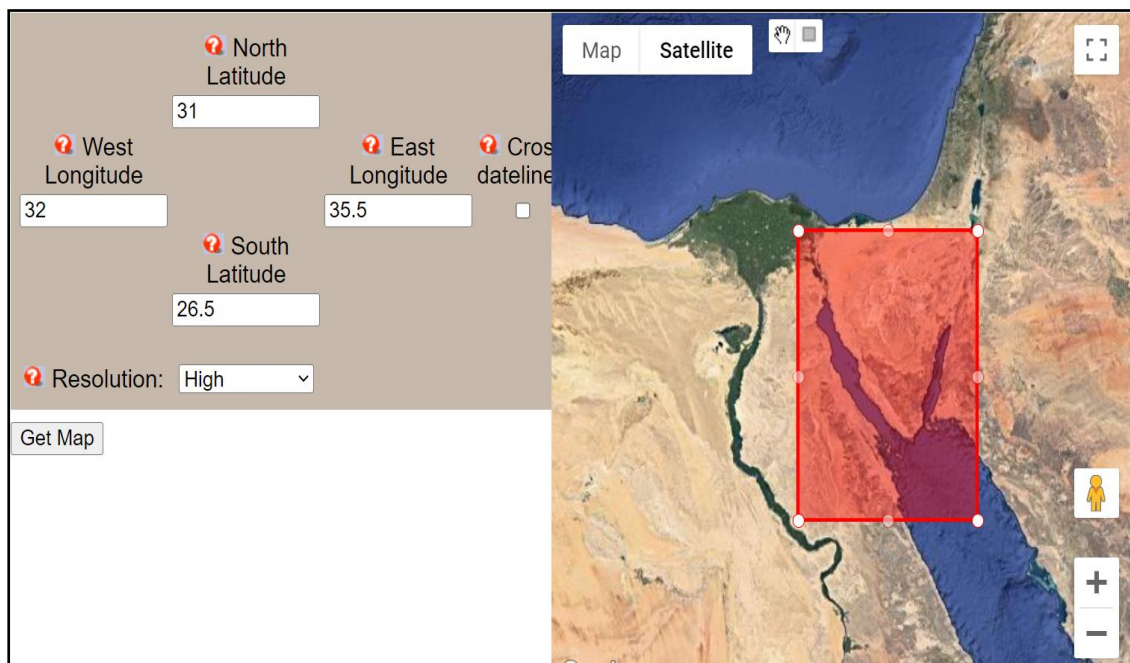


Рисунок 2.7 Извлечение данных о береговой линии исследуемого района с веб-сайта GOODS

2.4.2. Данные о ветре

Ветры могут быть введены как постоянный временной ряд или как регулярная сетевая зависящая от времени модель $\vec{U}_{wind}(x, y, t)$. Форматы NetCDF и ASCII поддерживаются для данных ветровых моделей [23]. Почасовые данные о ветре были извлечены из реанализа Европейского центра среднесрочного прогнозирования погоды (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasting ECMWF) (ERA5) (<https://www.ecmwf.int/>) в формате файла Network Common Data Form (NetCDF). Область действия имитационной модели установлена в пределах от 32° до 35,5° восточной долготы и от 31° до 26,5° северной широты, охватывая Суэцкий залив и Акабу. Парусность - это движение нефти под действием ветра, которое обычно составляет около 3% от скорости ветра на поверхности [10]. Модель GNOME предлагает коэффициент ветра от 1% до 4% в качестве значения по умолчанию, наряду с ветрами и течениями.

2.4.3. Данные о морском течении

К сожалению, исследуемый район не имеет данных о морских течениях в течение всего периода моделирования. Поэтому данные о морских течениях были собраны из глобальной системы анализа и прогнозирования океана (<https://doi.org/10.48670/moi-00016>) Operational Mercator в формате NetCDF. Это модель ассимиляции и прогнозирования данных об океане и атмосфере, которая предлагает ежедневные трехмерные глобальные прогнозы океана 1/12°. Схема ассимиляции данных, используемая для океана, представляет собой вариационную схему ассимиляции данных Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO). Метод ассимилирует данные in situ и спутниковые данные SST, данные спутникового альтиметра аномалий уровня моря (SLA) и профили температуры и солености (in situ) из различных источников. [216].

2.4.4. Объем разлива и тип нефти

В данном исследовании мы предположили, что в результате аварии танкера произошла утечка около 1000 метрических тонн аравийской легкой сырой нефти (Arabian light crude oil). Выбор арабской легкой нефти был основан на частоте, с которой танкеры перевозят ее через Суэцкий канал и трубопровод Сумед [62]. Кроме того, библиотека ADIOS2 Model включает базу данных параметров для данного типа нефти и характеристические константы, необходимые для решения конститутивных уравнений (Таблица 2-1).

Таблица 2-1 Характеристики легкой сырой нефти в Аравии (база данных библиотеки нефти ADIOS2)

API°	33.4
Плотность	0,878 г/см ³ при 0 С°
Вязкость	12 cSt при 0 С°
Температура застывания	- 53 С°
Адгезия	0,14 г/м ²
Ароматический	39 весовых%

(API) American Petroleum Institute gravity, (cSt) centistokes

Глава 3. Моделирование траектории и судьбы разлива нефти у города Хургада

3.1. Район исследований

Хургада является одним из самых красивых туристических городов на побережье Красного моря. Он охватывает около 40 км участка вдоль западного берега Красного моря на долготе $33^{\circ} 48'E$ и широте $27^{\circ}15'N$. Набережная Хургады характеризуется параллельными коралловыми рифами и является одним из самых влиятельных туристических регионов по национальному доходу. В дополнение к местам обитания коралловых рифов, шельф Хургады содержит разнообразные морские среды обитания, включая защищенные мелководные лагуны, мангровые заросли, водоросли и открытые глубоководные места обитания [217,218].

Город Хургада граничит на севере с Рас-Шукейром, на юге с Сафагой, на востоке с побережьем Красного моря и на западе с горами Красного моря. Перед пляжами Хургады находятся несколько значительных островов, которые присоединились к охраняемым островам Красного моря, таким как Шадван, Абу-Рамада, Малый и Большой Гифтунс и Абу-Минкар. Севернее Хургады на Губальской полосе (у северного входа в Красное море), острова; Были найдены Тавила, Ашрафи, Ганим, Малый Губал, Северный Гейсум, Южный Гейсум, Северный Умм-Эльхимат и Южный Умм-Эльхимат [219] (**Рисунок 3. 1**). Ежегодно около 15% мировой морской торговли и 10% мировой морской нефти проходит через Суэцкий залив по Суэцкому каналу, а после 2015 года восстановление нового Суэцкого канала привело к увеличению судоходства [196]. **На Рисунок 3. 2** показано движение судов вдоль побережья и морских курортов Хургады и северных островов. С увеличением количества судов возрастает и риск разливов нефти, что увеличивает нагрузку на египетское побережье Красного моря и туристические города, такие как Хургада, которые обеспечивают значительную часть иностранной валюты страны. По данным Egypt Independent [220], пляжи Хургады постоянно подвергаются авариям, связанным с разливом нефти.

Интересно отметить, что, несмотря на важность региона, наличие нескольких разливов нефти и вероятность потенциальных аварий, не существует справочной информации для прогнозирования траектории разлива нефти в исследуемом районе (Хургада), что делает данное исследование первым в своем роде.

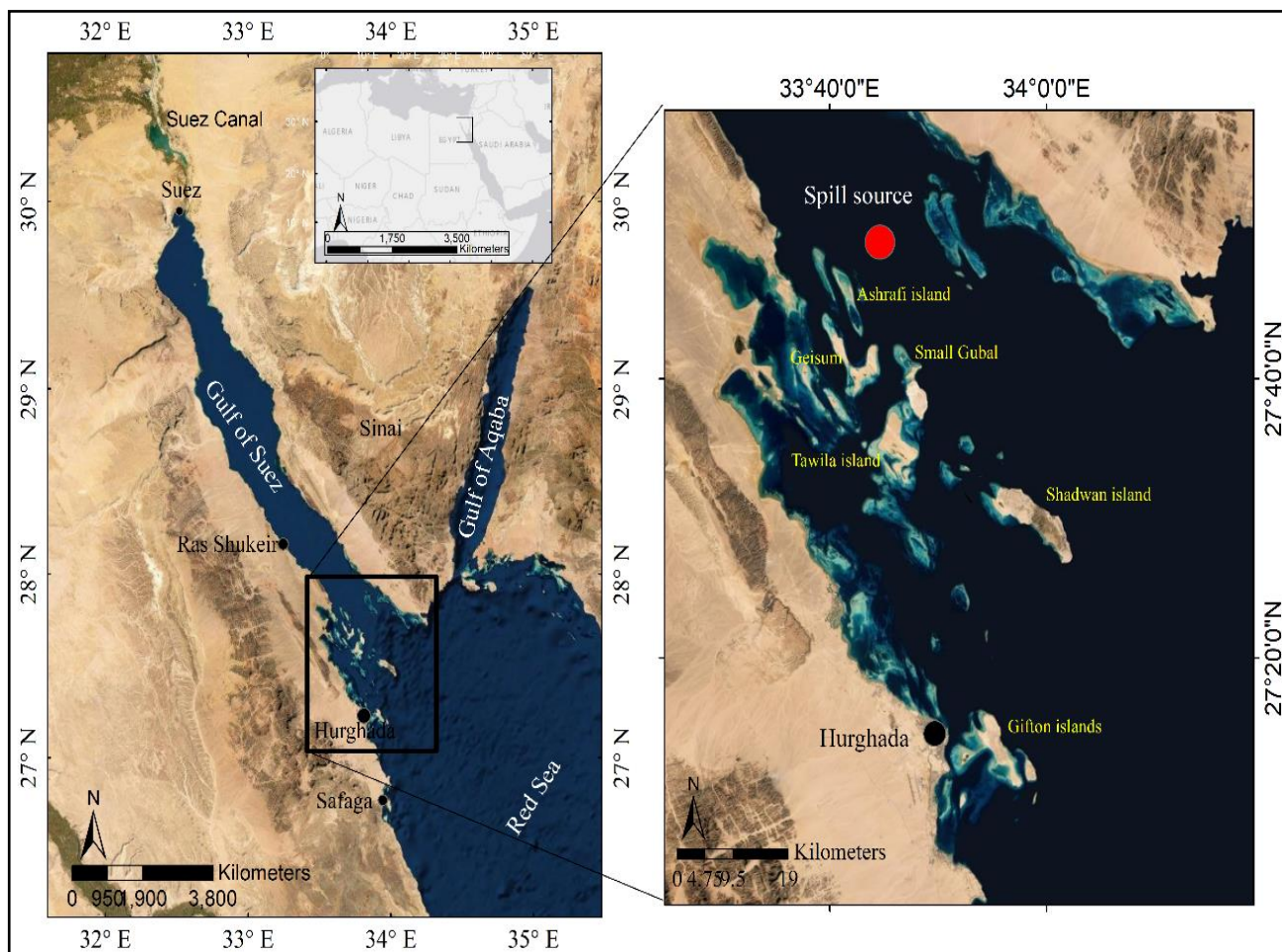


Рисунок 3. 1 Общая карта Красного моря Египта с указанием пляжей Хургады, островов и источника разлитой нефти, обозначенного красной точкой

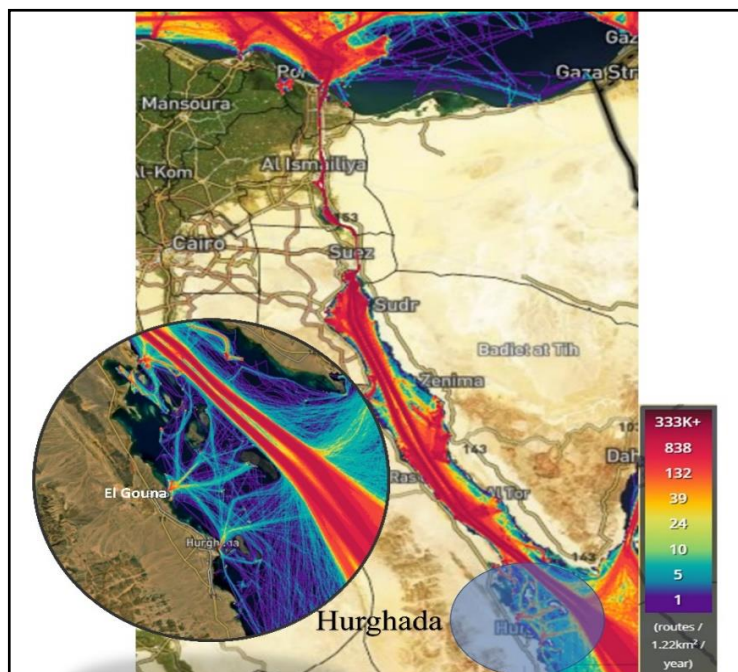


Рисунок 3. 2 Плотность движения судов между Суэцким заливом и Средиземным морем через Суэцкий канал. Кружок изображает активность судов у побережья Хургады [201].

3.2. Формулирование модели и допущения

В этом тематическом исследовании мы моделируем возможный мгновенный разлив нефти в результате инцидента с танкером в губальском проливе ($27^{\circ}48'55.10''$ N $33^{\circ}44'11.85''$ E.). Как показано на **Рисунок 3. 1**, источник разлива нефти расположен на главной судоходной трассе, примерно в 50 км к северу от Хургады. Два сценария были смоделированы в феврале и августе 2021 года в течение 108 ч с шагом 0,25 часа. Использование шага вычислений 0,25 ч повышает точность модели [23]. Данные о береговой линии для имитационной модели простираются от 30° E до 36° E и от 27° N до 31° N, охватывая северную часть Красного моря. Температура морской воды, используемая в этом исследовании, была извлечена из предыдущих исследований, которые показали, что средняя температура морской воды вокруг береговой линии Хургады составляет $20,20^{\circ}$ C ($68,36^{\circ}$ F) в феврале и $29,20^{\circ}$ C ($84,56^{\circ}$ F) в августе [221,222]. Европейский центр среднесрочного прогнозирования погоды (ECMWF) Reanalysis (ERA5) (<https://www.ecmwf.int/>) использовался для извлечения почасовых данных о ветре в формате network Common Data Form (NetCDF). Модель GNOME

предложила коэффициент ветра между 1 и 4% в качестве значения по умолчанию и парусность, которая представляет собой движение нефти, управляемое ветром, примерно 3% от скорости поверхностного ветра [10]. **Рисунок 3.3** показывает данные о ветре с 2011 по 2020 год в Хургаде. Ветер двигался в основном в направлениях NW, N и NNE, а средняя скорость ветра достигала 5,4 миль в час. Данные о морских течениях были собраны из (the Operational Mercator global ocean analysis and forecast system) (<https://doi.org/10.48670/moi-00016>) в формате NetCDF. Это модель ассимиляции и прогнозирования данных об океане и атмосфере, которая предлагает ежедневные трехмерные глобальные прогнозы океана 1/12°. Параметры разлива, предусмотренные для данного исследования, приведены в **Таблица 3-1**.

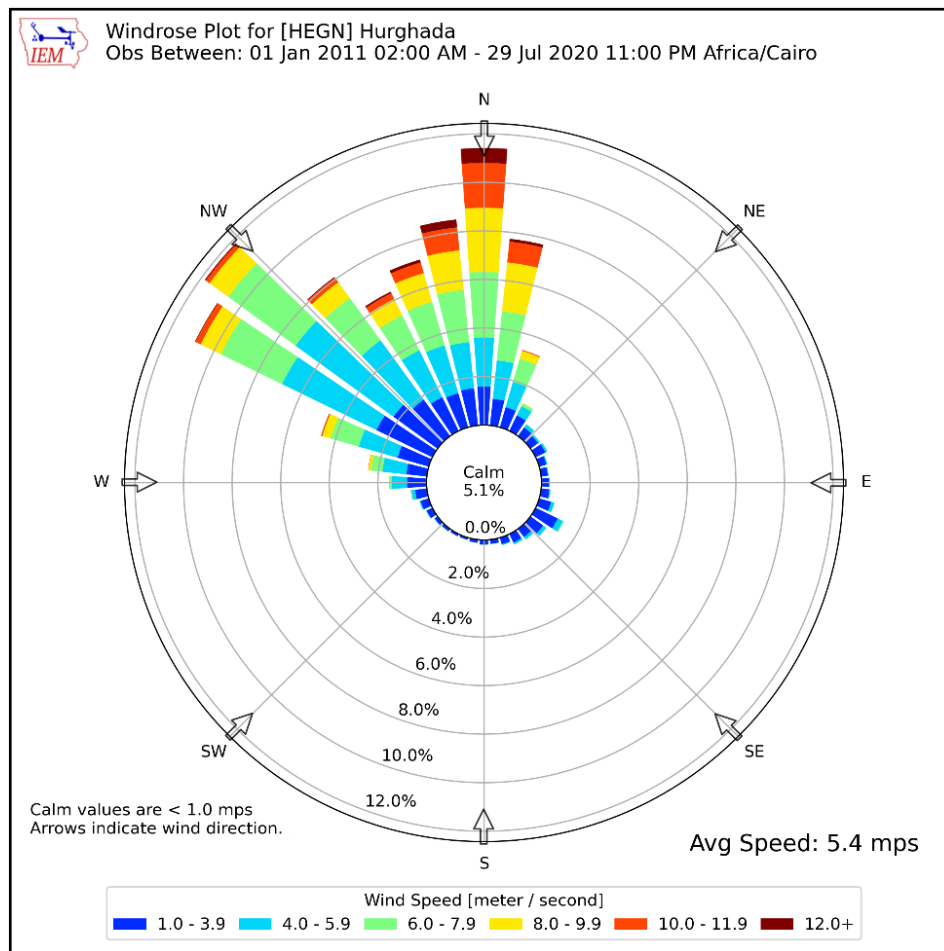


Рисунок 3.3 Диаграмма розы ветров в городе Хургада с 2011 по 2020 год

Таблица 3-1 Параметры разлива нефти в исследуемом случае

Переменные	Значения
Место разлива	27°48'55.10" N. 33°44'11.85" E.
Высвобождение нефти	1000 метрических тонн (тонн)
Тип выпуска	Мгновенный
Тип нефти	Арабская легкая сырая нефть
Время начала	Сценарий №1: 09-02-2021 /12 PM Сценарий №2: 09-08-2021 /12 PM
Температура морской воды	Сценарий №1: 20.20 °С Сценарий №2: 29. 20 °С
Длительность	108 ч
Временной шаг	0,25 ч
Количество частиц нефти	1000
По течению неопределенность	10%
Неопределенность перекрестного течения	10%

3.3. Результаты

3.3.1. Сценарий №1 траектория и выветривание

В этом сценарии мы предположили, что в результате аварии танкера произошла утечка 1000 метрических тонн арабской сырой нефти вблизи Губальского пролива. Модель стартовала в 12:00 09 февраля 2021 года и просуществовала 108 часов до 12:00 14 февраля 2021 года. Разлив показан в виде коллекции черных и красных точек. Черные точки показывают наилучшее решение, предполагая, что нет уверенности во входных параметрах. Красные точки, напротив, представляют собой минимальное решение сожаления, которое учитывает неопределенность ветра и волны. На **Рисунок 3. 4** представлены карты, изображающие результаты моделирования движения разливов с интервалом в 12 часов.

Когда моделирование началось, нефтяное пятно переместилось на юго-восток с черными и красными точками. Через сорок два часа после начала моделирования в 18:00

11 февраля менее одной тонны разлитой нефти достигло острова Малый Джубал ($33^{\circ}47'51.05''\text{E } 27^{\circ}40'45.01''\text{N}$), который находится примерно в 16 километрах к югу от основного места разлива. Затем нефть прошла расстояние в 20 километров от острова Малый Джубал до острова Шадван, примерно в 36 километрах от источника разлива, примерно за 72 часа в 12:00 13 февраля. В течение следующих 30 часов до окончания моделирования на восточном берегу острова Шадван было накоплено в общей сложности 434 тонны нефти, охватывающей всю восточную береговую линию острова примерно в 17 километрах от $33^{\circ}55'26.39''\text{E } 27^{\circ}31'40.06''\text{N}$ до $34^{\circ} 2'23.23''\text{E } 27^{\circ}27.37''\text{N}$. После 108 часов продолжительности моделирования значительное количество нефти, около 276 тонн, все еще плавало в море и текло к южному городу Хургада на западном берегу Красного моря.

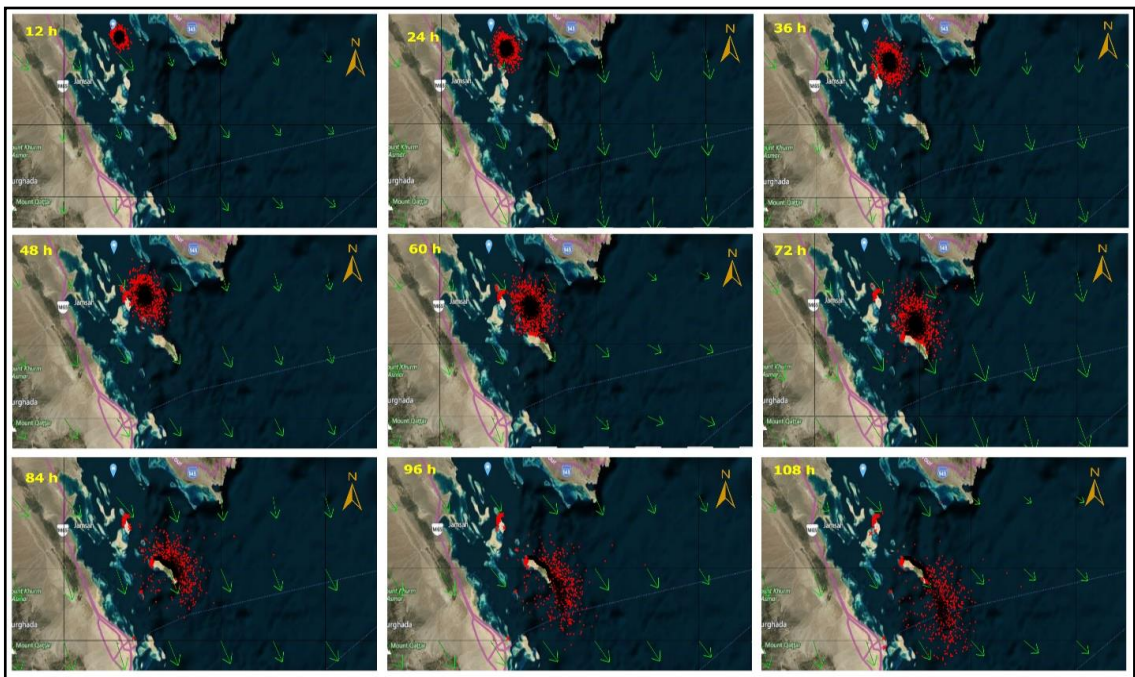


Рисунок 3. 4 Моделирование траектории сценария №1, зеленые стрелки представляют направление ветра, а большая синяя точка представляет местоположение разлива.

Процессы выветривания (испарение, естественная дисперсия и эмульгирование) происходят с различной скоростью после разливов нефти. Процесс испарения начался вскоре после того, как нефть попала в воду. Около 54 тонн (5,4%) нефти испарилось в первый час, и скорость испарения продолжала увеличиваться примерно до 277 тонн

(27,7%) через 108 часов. Естественная дисперсия, с другой стороны, началась через шесть часов после инцидента с разливом и достигла 12,6 м в конце сценария (**Рисунок 3. 5,**

Таблица 3-2). Как показано **Рисунок 3. 6,** в первый час разлива нефти в море содержание воды в эмульсии быстро увеличивалось и через два дня достигало 90%. Эта пропорция сохранялась до конца симуляции. Объем поверхности, включая эмульсию, уменьшился в течение первых шести часов с 1000 метрических тонн до менее чем 800 метрических тонн; после этого он увеличивался, пока не достиг более 1350 метрических тонн 13 февраля, а затем снова начал уменьшаться примерно до 425 метрических тонн через 108 часов.

Таблица 3-2 Сценарий №1 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Испарение	дисперсия	Выброшен на берег	Плавучий
1	54.3	0	0	946
2	168	0.01	0	832
3	222	0.03	0	778
4	240	0.11	0	760
5	243	0.3	0	756
6	246	0.68	0	754
9	251	3.9	0	745
12	255	8.75	0	736
15	257	11.3	0	731
18	258	12	0	729
21	260	12.3	0	728
24	261	12.4	0	726
30	262	12.6	0	724
36	264	12.6	0	723
42	265	12.6	0.72	721
48	266	12.6	0	721
60	268	12.6	0	719
72	271	12.6	16.5	699
84	274	12.6	431	282
96	275	12.6	461	251
108	277	12.6	434	276

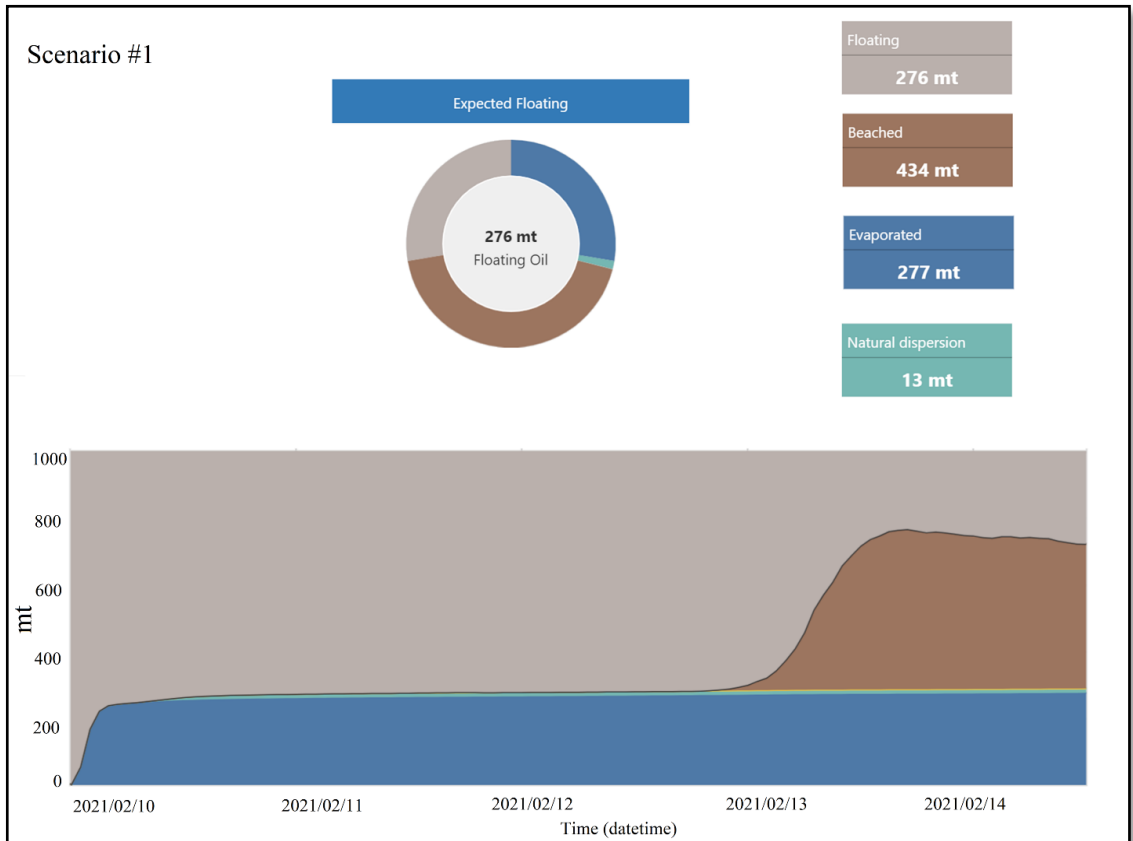


Рисунок 3. 5 Бюджет легкой аравийской нефти в Сценарии №1

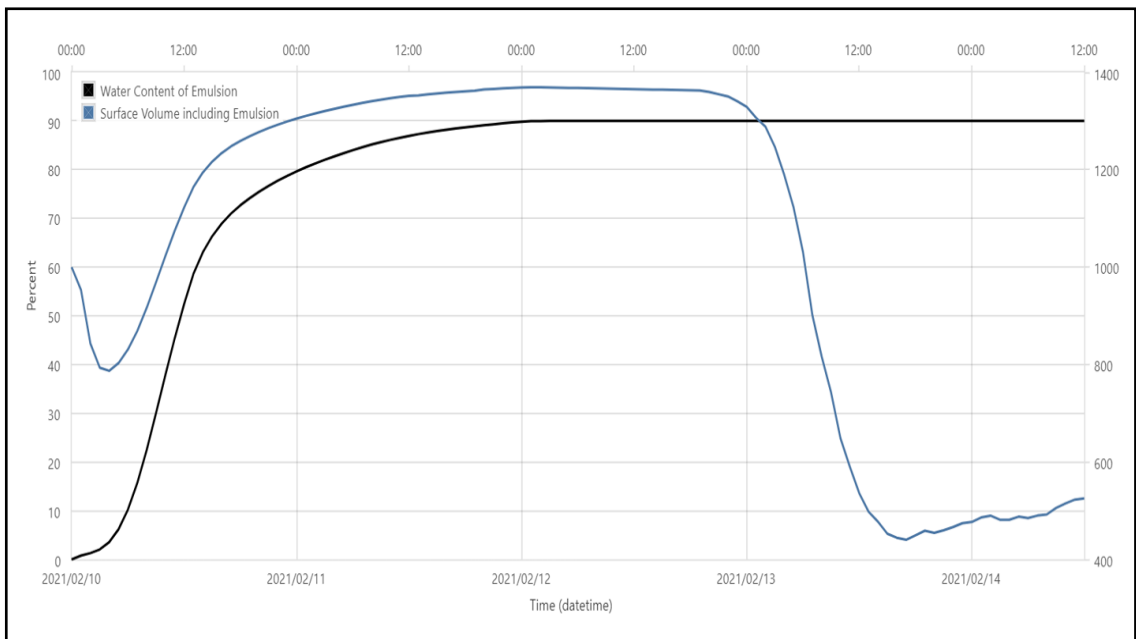


Рисунок 3. 6 Скорость эмульгирования сценария №1

3.3.2. Сценарий №2 траектория и выветривание

Данные о ветре и морских течениях за август 2021 года были использованы в сценарии №2. Тип, количество и источник нефти такие же, как и в сценарии №1. Сценарий начался в 12:00 09 августа 2021 года и продолжался 108 часов до 12:00, 14 августа 2021 года. Плавучая нефть первоначально дрейфовала в юго-юго-западном направлении SSW, и около трех метрических тонн достигло острова Ашрафи ($33^{\circ}41'58.61''\text{E } 27^{\circ}46'19.62''\text{N}$), в 6 километрах от первоначального места разлива за 21 час в 9:00 вечера. После этого частицы нефти дрейфовали на юг и накапливались на островах Малый Губаль, Гейзум и Тавила (**Рисунок 3. 7**). В течение следующих 87 часов до конца моделирования на эти острова потекло около 610 метрических тонн нефти. В конце моделирования около 96 метрических тонн нефти остались на плаву по юго-юго-западной траектории, двигаясь к острову Гифтун и пляжам Хургады.

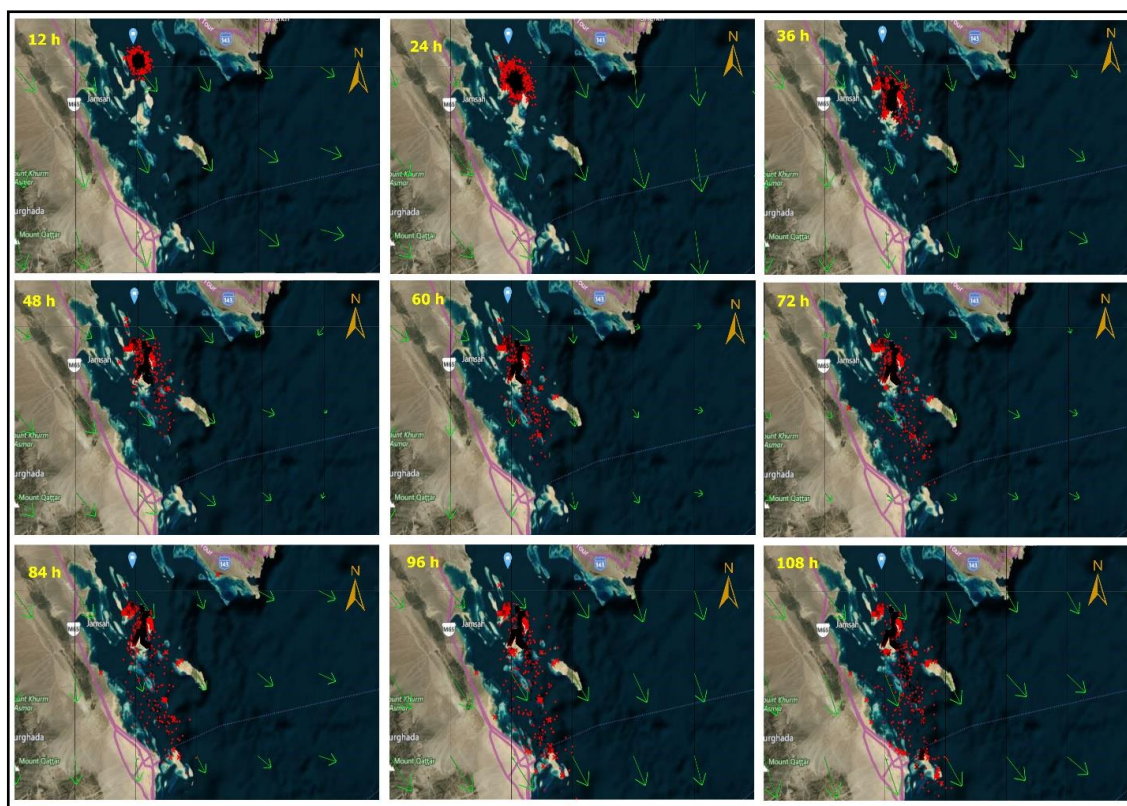


Рисунок 3. 7 Моделирование траектории сценария №2, зеленые стрелки представляют направление ветра, а большая синяя точка представляет местоположение разлива.

Как показано **Рисунок 3. 8, Таблица 3-3** испарение началось сразу после того, как нефть была разлита в морскую воду. В первый час разлива испарилось почти 100 тонн (10%) нефти, и во втором часе этот показатель удвоился. После этого скорость испарения постепенно увеличивалась, пока не достигла 280 тонн (28%) в 12:00 утра 14 августа 2021 года. Напротив, естественная скорость дисперсии была медленной, начиная с первого часа возникновения разлива и достигая около 12,9 мт в конце моделирования. На **Рисунок 3. 9** показана норма эмульгирования в период с 10 по 24 августа 2021 года. Было замечено, что в первый час разлива нефти в море содержание воды в эмульсии постепенно увеличивалось и достигало 90% через 36 ч, и эта пропорция сохранялась до конца моделирования. Объем поверхности, включая эмульсию, вырос до более чем 1300 13 февраля, а затем снова уменьшился примерно до 225 в конце сценария.

Таблица 3-3 Сценарий №2 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Испарение	дисперсия	Выброшен на берег	Плавучий
1	101	0.36	0	899
2	222	2.09	0	776
3	242	3.58	0	755
4	245	4.97	0	750
5	248	6.27	0	746
6	250	7.47	0	742
9	255	10.3	0	735
12	258	12	0	729
15	260	12.6	0	726
18	262	12.7	0	725
21	264	12.8	2.89	720
24	265	12.8	52	670
30	267	12.8	212	507
36	269	12.8	401	317
42	270	12.9	578	139
48	270	12.9	618	98.3
60	272	12.9	643	71.4
72	274	12.9	596	117
84	276	12.9	623	87.4
96	278	12.9	613	96.1
108	280	12.9	610	96.5

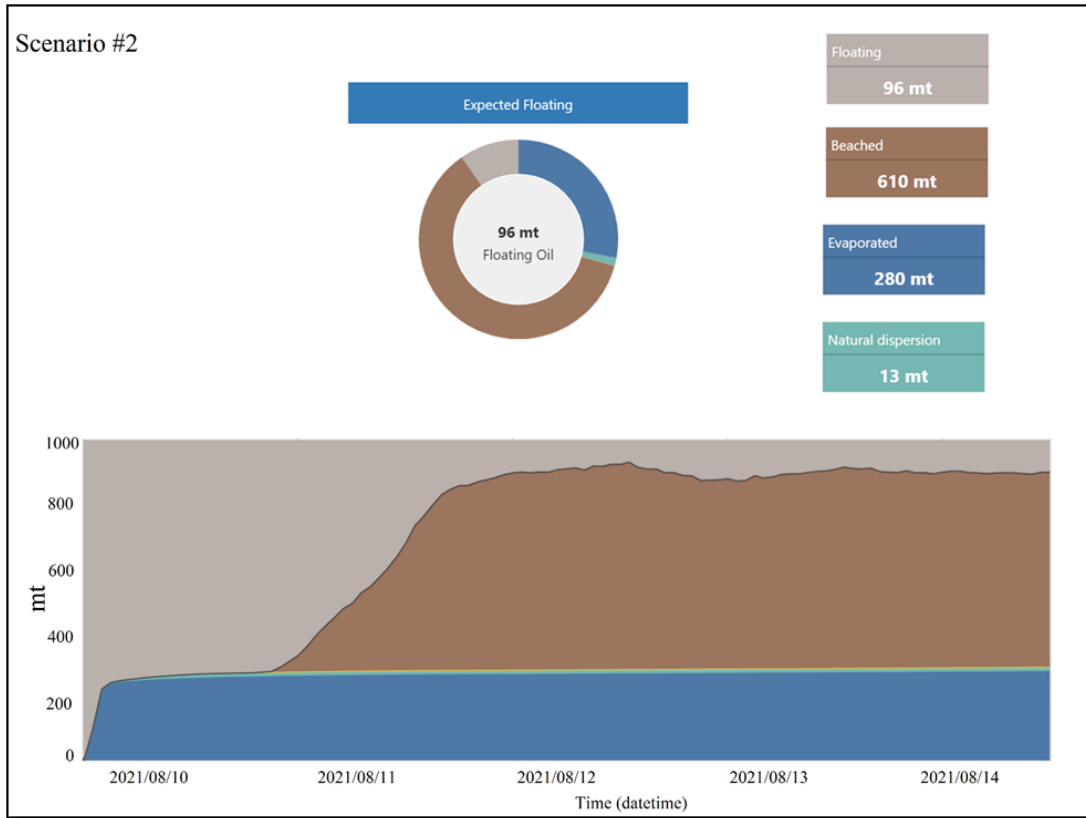


Рисунок 3. 8 Бюджет легкой аравийской нефти в Сценарии №2

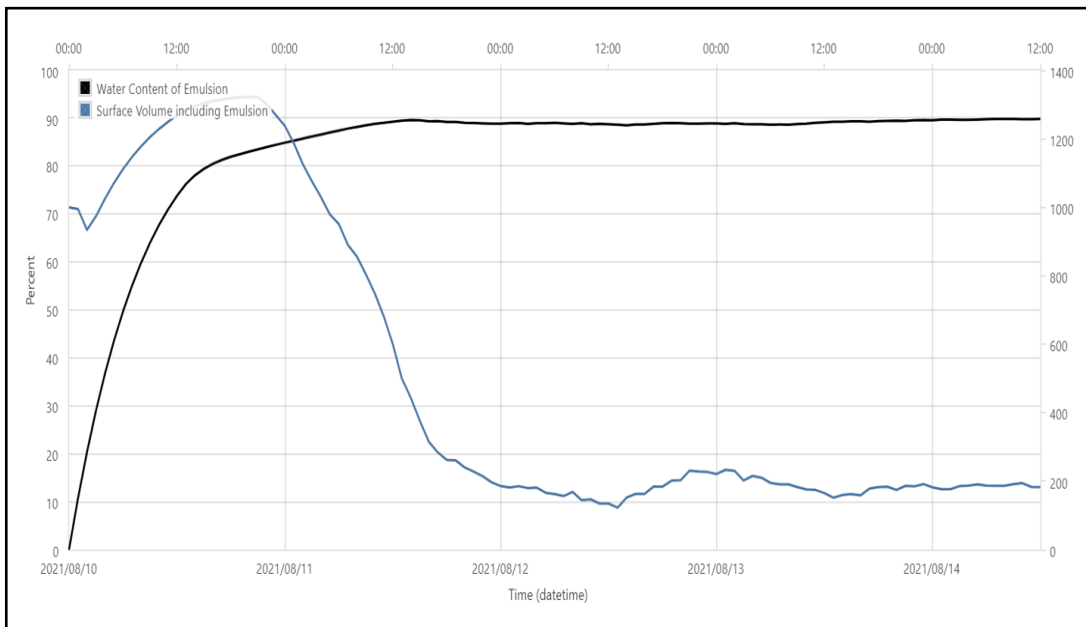


Рисунок 3. 9 Скорость эмульгирования сценария №2

3.4. Обсуждение

Разливы нефти в морскую воду могут иметь катастрофические последствия для морской экосистемы. Для восстановления экосистемы могут потребоваться десятилетия, и она никогда не сможет вернуться к своему первоначальному состоянию [223]. В глобальном масштабе модели разливов нефти широко используются для прогнозирования судьбы и переноса разливов нефти. Результаты могут служить основой для оценки экологических, экономических и медицинских последствий [224]. Это исследование направлено на выявление вероятных мест, на которые повлияет разлив нефти, путем моделирования двух сценариев в результате аварии танкера у берегов Хургады.

Карты траекторий модели GNOME показали, что нефть, разлитая в сценарии №2, двигалась в юго-западном направлении и заняла 21 час, чтобы достичь острова Ашрафи, а затем до островов Малый Губал, Гейсум и Тавила, что вдвое меньше, чем в сценарии №1, двигаясь в юго-восточном направлении, чтобы достичь острова Малый Губал, а затем до острова Шадван. Такой результат можно объяснить тем, что преобладающее направление ветра в сценарии №2, которое произошло в августе, было северо-восточным (NE), толкая нефть к острову Ашрафи. Напротив, первый сценарий произошел в августе; следовательно, преобладающие северо-западные ветры (NW) в этом месяце привели к тому, что утечка нефти переместилась к острову Малый Губал. Поэтому скорость и направление ветра сильно влияют на направление разлива нефти в регионе. Это объяснение совместимо с Эладави и др. (Eladawy) [193] данные, которые указывают на то, что преобладающим ветром в Суэцком заливе является северо-западный поверхностный ветер зимой, и, согласно Хусейну [61] другим доминирующим ветром летом является северо-восточный ветер (NE).

Карты траекторий разлитой нефти в обоих сценариях показывают движение нефти в целом в южном направлении, которое является тем же направлением, что и движение морских течений в Суэцком [225]. Поэтому ветры и океанские течения повлияли на траекторию нефти. Многочисленные глобальные исследования показали, что ветровые

и морские течения существенно влияют на движение и направление нефти, разлитой в морскую среду [10 156 158 225 226]. Результаты подчеркивают, что, хотя два сценария были в разное время (февраль и август), разлитая нефть угрожала островам у входа в Суэцкий залив. Эти острова имеют огромное экономическое и стратегическое значение и были объявлены охраняемой территорией Министерством окружающей среды Египта в соответствии с Законом 102/1983. (природоохранный сектор) [228]. Поэтому это исследование предупреждает, что будущие утечки нанесут вред этим островам.

Сразу после разлива нефти процессы выветривания превращают разлитую нефть в новые соединения с различными физическими и химическими свойствами. Первым процессом выветривания нефти, который происходит, является испарение. Во время этого процесса большая часть летучих частей нефти удаляется в течение нескольких часов после разлива [16,74]. В этом исследовании результаты показывают, что в первые часы моделирования процент испарившейся нефти в сценарии №2 был в два раза выше, чем в сценарии №1, поскольку сценарий №2 произошел в августе, а температура была выше, чем в феврале для сценария №1. По мнению Омара и др. [65], высокая температура, как правило, увеличивает скорость испарения и долю потерянной нефти. Хотя ожидалось, что скорость испарения будет значительно выше в сценарии №2 (август), чем в сценарии №1 (февраль), в конце моделирования процент испарения нефти в обоих сценариях был близок (27,7% и 28%). Это может быть связано с тем, что количество нефти, которая достигла островов в сценарии №2, было большим (610 тонн), и только минимальное количество нефти оставалось плавающим (96 тонн), подверженным испарению. В то время как в сценарии №1 большое количество нефти оставалось плавающим в воде (276 тонн) и было подвержено испарению. Это объяснение совместимо с Тоз и др. (Toz) [177] который пришел к выводу, что поведение нефти, вылитой в морскую воду, зависит от многих факторов, одним из которых является то, остается ли нефть в море или вымывается на берег.

Естественная дисперсия — это распад нефтяных пятен волнами, течениями и энергией ветра на микроскопические, нейтрально плавучие капли и распределение их

по толще воды [105] Результаты показывают, что, хотя естественный процесс дисперсии сценария №1 начался после шести часов моделирования, в то время как сценарий №2 начался в первый час, естественная скорость дисперсии была низкой для обоих сценариев. Кроме того, в обоих случаях количество естественно дисперсной нефти составило 13 млн тонн (1,3%) в конце моделирования. Эти результаты меньше, чем у Nasr and Smith [62], которые обнаружили, что скорость естественной дисперсии того же нефти составляла 8%. Это расхождение связано с использованием ими другой математической модели (SL Ross model).

Эмульгирование представляет собой процесс, который образует жидкость, известную как эмульсия, содержащую крошечные капли жира или нефти, взвешенные в жидкости, обычно воде [229,230]. Результаты показали, что в обоих сценариях процент воды в эмульсии увеличивался, как только нефть поступало в воду в течение первого часа после разлива, достигая 90% к концу моделирования. Кроме того, объем поверхности, включая эмульсию, увеличивался со временем, пока не начался процесс высадки на берег, и уменьшался после того, как нефть достигла берега. К концу моделирования поверхность, включая эмульсию, была в два раза больше в сценарии No 1, чем в сценарии No 2, поскольку количество нефти, плавающей в сценарии No 1, было больше, чем в сценарии No 2. Процесс эмульгирования увеличивает вязкость пятна и его объем, затрудняя его удаление, и вызывает образование муссов и смоляных шариков, что затрудняет очистку [223,231]. Поэтому результаты изучения процессов выветривания при разливах нефти в морской среде необходимы членам групп реагирования для определения оптимального метода удаления нефти и смягчения ее последствий [7,66,232].

3.5. Выводы

Модели GNOME и ADIOS2 были использованы для моделирования двух потенциальных сценариев разлива нефти в феврале и августе 2021 года в результате инцидента с танкером в проливе Губал, примерно в 50 км к северу от Хургады, чтобы определить вероятные пострадавшие регионы, оценить, когда нефть достигнет

береговой линии, и рассчитать процессы выветривания нефти (испарение, естественное рассеивание и эмульгирование). Результаты показали, что ветер и морские течения существенно влияют на движение и направление нефти, разлитой в морской среде. Разлив нефти в Сценарии №2 (август) двигался в юго-западном направлении под влиянием северо-восточного ветра NE и через 21 час прибыл на остров Ашрафи, а затем на острова Джубал, Гейсум и Тавила. В то время как в Сценарии №1 (февраль) нефть двигалась в юго-восточном направлении под воздействием северо-западных NW ветров, и ей потребовалось 42 часа, чтобы достичь острова Малый Джубал, а затем острова Шадван. Таким образом, при любом просачивании нефти в этом регионе северные острова Красного моря, имеющие огромное стратегическое и экономическое значение, будут наиболее подвержены загрязнению.

Результаты моделирования процессов выветривания разлитой нефти показали, что около 27% нефти Arabian Light испарилось, а естественный уровень дисперсии был скромным, около 1,3% в обоих сценариях в конце моделирования. Более того, количество воды в эмульсии увеличилось сразу после попадания нефти в воду, достигнув 90% через 108 ч. В результате объем поверхности нефти, включая эмульсию, увеличивался до начала отбивания, а затем уменьшился. Результаты данного исследования могут послужить основой для разработки эффективного плана действий в чрезвычайных ситуациях для смягчения последствий будущих инцидентов с разливом нефти в проливе Губал. Ограничением данного исследования является то, что в текущей версии модели отсутствует модуль для прогнозирования разрушения пятна из-за волн, которые могут повлиять на его боковое движение. Однако прогнозируемая общая траектория течи должна быть достаточной для немедленного принятия мер экстренного реагирования. Следовательно, необходимо провести дополнительные исследования с использованием различных моделей разлива для сравнения траекторий движения нефти после инцидента с разливом у берегов Хургады.

Глава 4. Моделирование движения и судьбы разливов нефти у порта Айн-Сухна

4.1. Район исследований

Порт Айн Сухна расположен в городе Айн Сухна, регионе Суэцкого губернаторства Египта. Порт Айн Сухна, являющийся крупным международным портом-шлюзом для Египта, Персидского залива и Азии, расположен на западном побережье Суэцкого залива, в 43 км к югу от города Суэц **Рисунок 4. 1**. Занимая площадь 22,3 км², он имеет глубину 18 м. Благодаря обилию прилегающих земель порт быстро превращается в крупный промышленный центр, обслуживающий международный и внутренний рынки [233]. Порт Айн Сухна может принимать танкеры дедвейтом до 500,000 тонн и перерабатывает более 80% нефти, экспортируемой из Персидского залива в Европу, которая впоследствии перекачивается из резервуаров для хранения по паре 42-дюймовых трубопроводов, соединяющих Суэцкий залив со Средиземным морем [61]. Районом с наибольшим риском аварий танкеров является транспортная развязка на шельфе нефтепроводного терминала Сумед вблизи порта Айн-Сухна.

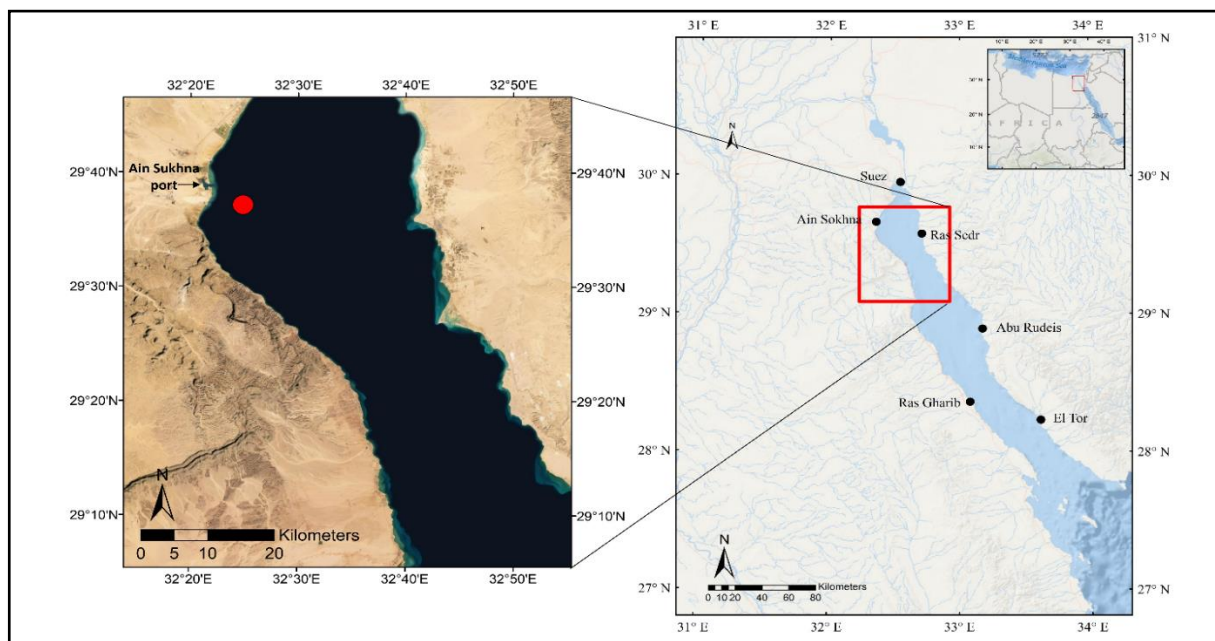


Рисунок 4. 1 Карта Суэцкого залива, показывающая гипотетическое место разлива нефти в виде большой красной точки у порта Айн-Сухна

4.2. Формулирование модели и допущения

Мы рассматриваем гипотетический разлив нефти, вызванный аварией танкера примерно в 5 километрах от порта Айн-Сухна, как показано **Рисунок 4. 1**. По оценкам, тысяча метрических тонн арабской легкой сырой нефти разлилась 10.02.2020 и 08.07.2020 в 12.00. Модели GNOME и ADIOS2 используются для моделирования траектории и поведения разлива. Как указывалось ранее, входные наборы данных GNOME и ADIOS2 содержат данные о береговой линии, данные о ветре, данные о морских течениях, месте разлива нефти, типе нефти, количестве нефти и температуре морской воды. Данные береговой линии были извлечены из базы данных GSHHS сервером GOODS. Данные о ветрах были загружены из (ECMWF Reanalysis ERA5), в то время как данные о морских течениях были взяты из модели GLO-CPL. Данные о ветре для исследуемой территории с 2015 по 2020 год показаны на (**Рисунок 4. 2**). Показано, что ветер движется в основном в направлениях SW-SE. Максимальная скорость ветра за указанный период достигла 12 м/с.

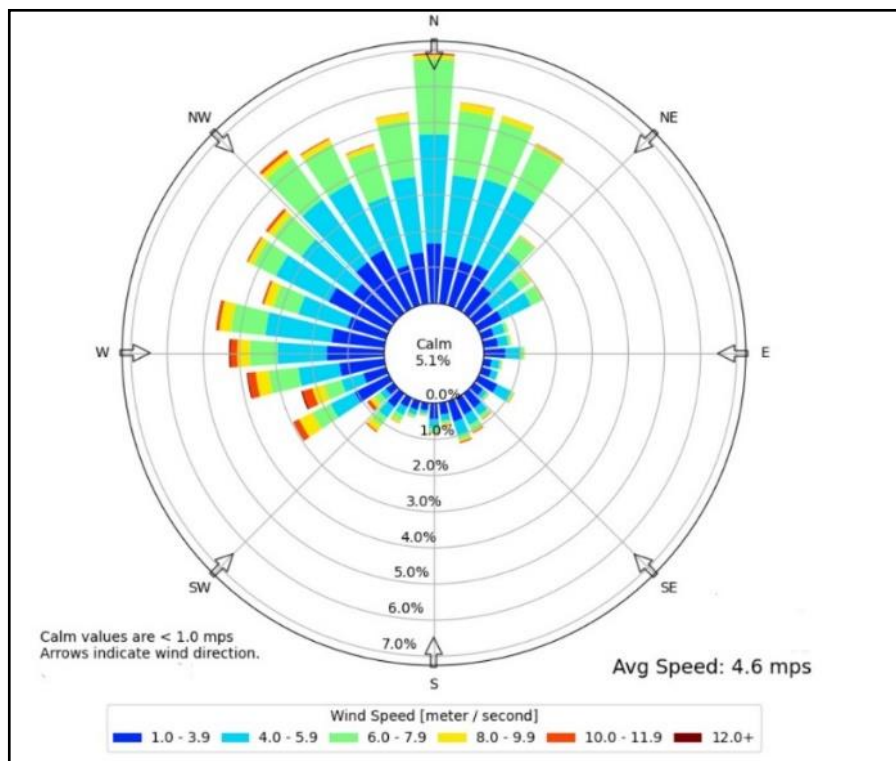


Рисунок 4. 2 Диаграмма розы ветров в исследуемом районе с 2015 по 2020 год

Температура морской воды, о которой сообщалось в предыдущих исследованиях, составляет 18,7 °С зимой и 29,75 °С летом [234]. Период моделирования составил 72 ч с шагом 0,25 ч. Модели обеспечивают вывод траектории с географической привязкой, который можно использовать в качестве входных данных для инструментов Географической информационной системы (ГИС) [47]. Значения неопределенности по течению и неопределенности перекрестного течения для данных о морских течениях были скорректированы до 10% для учета вероятных неопределенностей значений течений. По данным Зеленке и др. (Zelenke) [23], неопределенность вдоль течения — это неопределенность в значениях прямого и обратного токов. Напротив, неопределенность перекрестного тока относится к неопределенности левого и правого направления. Параметры разлива, предусмотренные для данного исследования, приведены в (Таблица 4-1).

Таблица 4-1 Параметры разлива нефти в тематическом исследовании 2

Переменные	Значения
Место разлива	29.618 N – 32.415 E
Высвобождение нефти	1000 метрических тонн (тонн)
Тип выпуска	Мгновенный
Тип нефти	Арабская легкая сырая нефть
Время начала	Сценарий №1: 07-02-2020 /12 PM Сценарий №2: 09-07-2020 /12 PM
Температура морской воды	Сценарий №1: 18,7 °С Сценарий №2: 29,75 °С
Длительность	72 ч
Временной шаг	0,25 ч
Количество частиц нефти	1000
По течению неопределенность	10%
Неопределенность перекрестного течения	10%

4.3. Результаты

4.3.1. Сценарий №1 траектория и выветривание

Данные о ветре и морских течениях от февраля 2020 года были использованы для сценария №1. Моделирование модели началось в 12:00, 7 августа 2020 года, а продолжительность запуска составила 72 часа. Считается, что авария танкера привела к утечке 1000 метрических тонн арабской сырой нефти на месте разлива. Разлив представлен в виде точек, которые являются либо черными, либо красными. Черные точки представляют собой наилучшее решение, предполагая, что входные параметры не имеют неопределенностей. Напротив, красные точки отражают минимальное решение сожаления, которое учитывает неопределенность ветра и волны.

Результаты модели GNOME представлены на **Рисунок 4. 3** в виде карт за каждые 12 ч. В начале моделирования частицы нефти дрейфовали в юго-восточном направлении (SE), параллельно западному побережью Суэцкого залива. Через 42 часа, в 18:00, 9 февраля 2020 года, нефть высадилась на берег в Рас-Абу-Дараге, в 22,7 км от места разлива. Примерно 29.7 тонн разлитой нефти осели на береговой линии в течение следующих 18 часов, покрывая примерно 14,2 км западной береговой линии ($32^{\circ}29'58.40''\text{E}$ $29^{\circ}25'45.86''\text{N}$ до $32^{\circ}35'38.68''\text{E}$ $29^{\circ}20'27.67''\text{N}$). В то же время остальная часть нефти (709 тонн) плыла на юго-восток, пока моделирование не закончилось.

Процессы выветривания происходят после разливов нефти с разной скоростью (**Таблица 4-2**). В этом сценарии скорость испарения со временем возросла, достигнув 25,4% (254 тонны) после трех дней разлива, (**Рисунок 4. 5**). Содержание эмульсионной воды следовало той же схеме испарения и достигало примерно 90% в конце моделирования, (**Рисунок 4. 6**). Напротив, скорость естественного рассеивания была постепенной, начиналась после часа разлива и достигала 0,7% через 72 часа (**Рисунок 4. 7**).

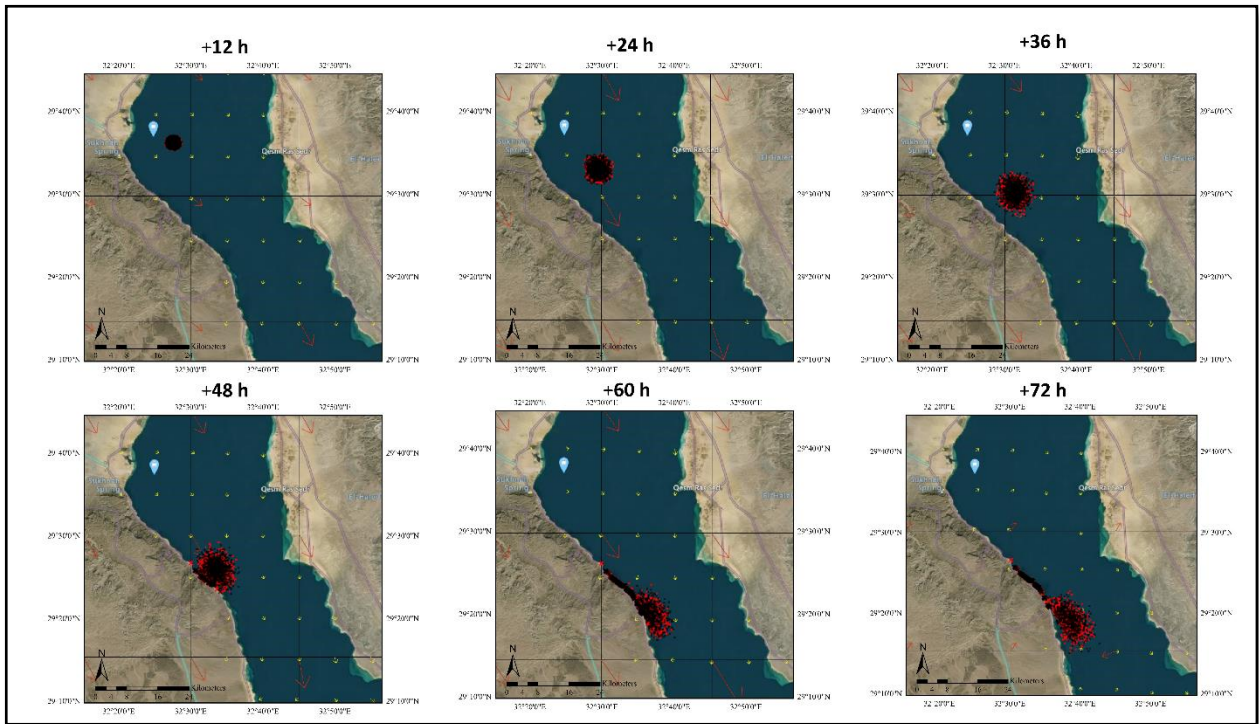


Рисунок 4. 3 Карты траекторий движения нефтяного пятна для Сценария №1, длинные красные стрелки представляют скорость и направление ветра, а короткие желтые стрелки - поверхностное течение.

Таблица 4-2 Сценарий №1 Поведение и судьба разлива нефти с течением времени (метрические тонны)

Время (часы)	Сгущенный	Естественная дисперсия	Выброшен на берег	Плавающая нефть
1	88.4	1.19	0	910
2	153	2.69	0	844
3	191	3.6	0	805
4	212	4.19	0	783
5	224	4.6	0	771
6	231	4.89	0	764
9	239	5.4	0	755
12	242	5.61	0	752
15	244	5.76	0	751
18	245	5.99	0	749

Продолжение таблицы 4-2

21	246	6.34	0	747
24	247	6.75	0	746
30	249	7	0	744
36	249	7.01	0	743
42	250	7.01	4.46	738
48	251	7.01	24.5	717
60	253	7.02	46	694
72	254	7.02	29.7	709

4.3.2. Сценарий №2 траектория и выветривание

Данные о ветровых и морских течениях за июль 2020 года были использованы для сценария 2. Источник разлива, тип нефти и количество сохраняются аналогично сценарию №1. Время запуска модели было установлено в 12:00⁹ июля и продолжалось в течение трех дней подряд. Как показано **Рисунок 4. 4**, разлив переместился на юго-запад (SW) к западным берегам GOS. Частицам нефти потребовался 21 час, чтобы добраться до пляжа около 21:00 вечера и преодолеть расстояние 10,5 км от места разлива. В **Таблица 4-3** показаны результаты разлива нефти и их судьба с течением времени. В конце моделирования вдоль западного берега скопилось около 705 тонн частиц нефти. Вся нефть выброшена на берег без плавающей нефти в воде, охватывая расстояние в десять километров от 32°23'32.71"E 29°31'11.17"N до 32°28'44.56"E 29°26'52.81"N. Процесс испарения начался сразу после утечки нефти, и в течение 72 часов испарилось около 28,6% (268 мт) от общего разлива нефти (**Рисунок 4. 5**). По мере дрейфа нефти содержание эмульсионной воды достигало приблизительно 76,4% (**Рисунок 4. 6**). Естественный процесс дисперсии начался через 3 часа и составил 0,8% (8,2 мт) в конце моделирования (**Рисунок 4. 7**).

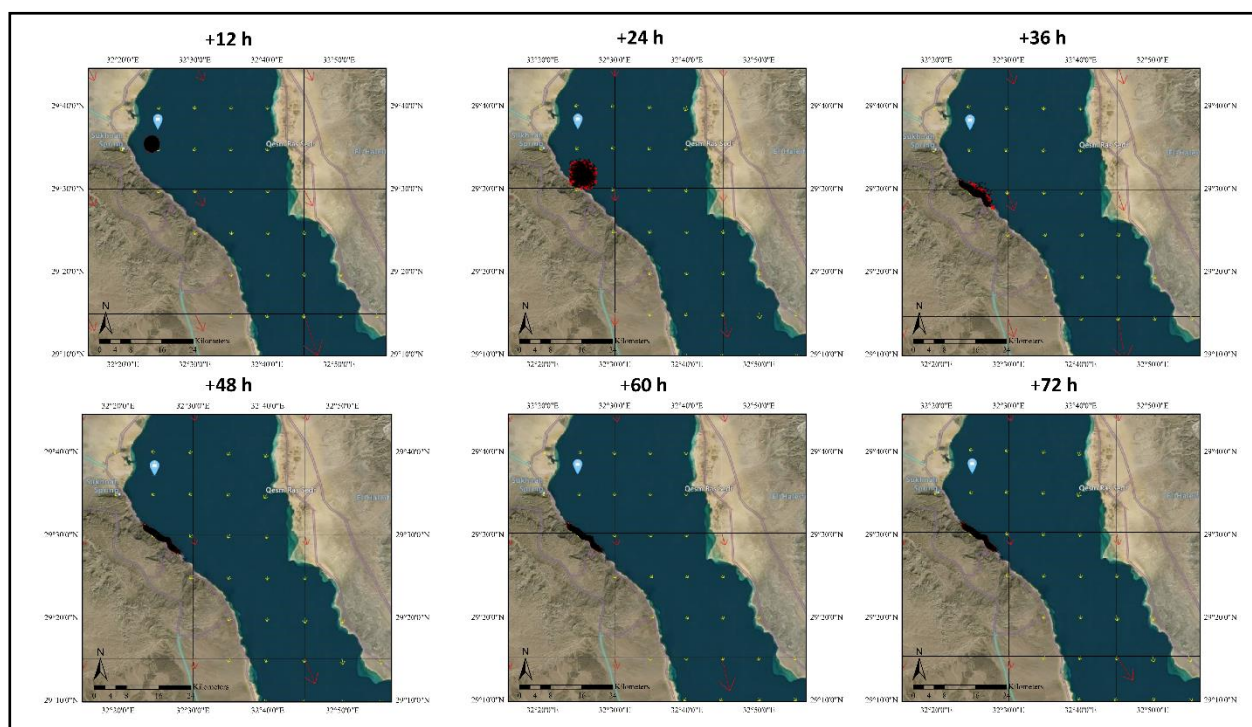


Рисунок 4. 4 Карты траекторий разлива нефти для сценария №2, длинные красные стрелки представляют скорость и направление ветра, а короткие желтые стрелки представляют поверхностный ток.

Таблица 4-3 Сценарий №2 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Сгущенный	Естественная дисперсия	Выброшен на берег	Плавающая нефть
1	81.8	0.03	0	918
2	200	0.21	0	800
3	236	0.42	0	764
4	244	0.7	0	756
5	247	1.06	0	752
6	249	1.52	0	749
9	256	3.06	0	741
12	261	4.25	0	735
15	266	5.45	0	729
18	270	6.77	0	723
21	273	7.54	2.16	717
24	275	7.7	13.6	703
30	280	7.86	182	530
36	282	8.02	527	183

Продолжение таблицы 4-3

42	283	8.08	679	29.3
48	284	8.09	690	18.3
60	285	8.14	673	33.6
72	286	8.2	705	0

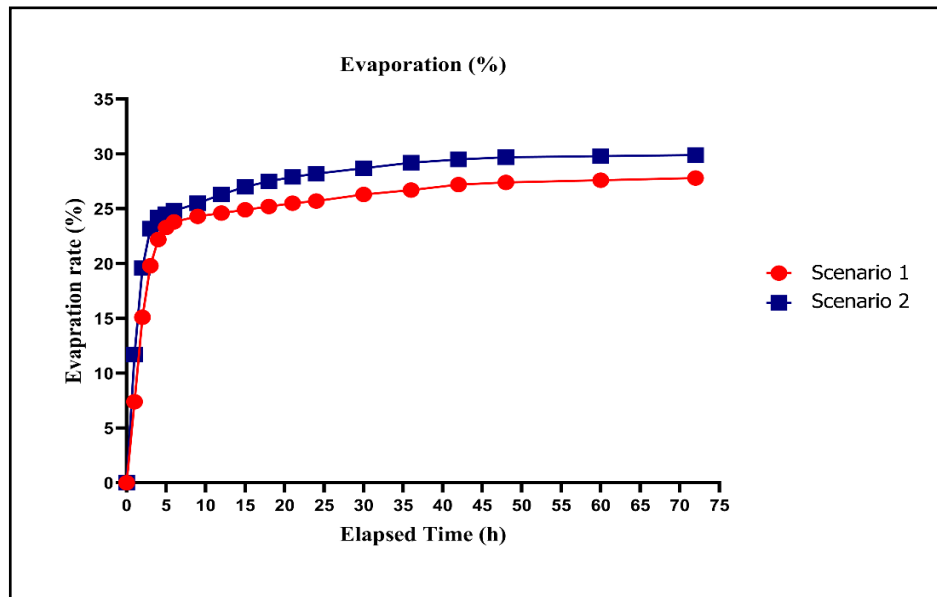


Рисунок 4.5 Скорость испарения (%)

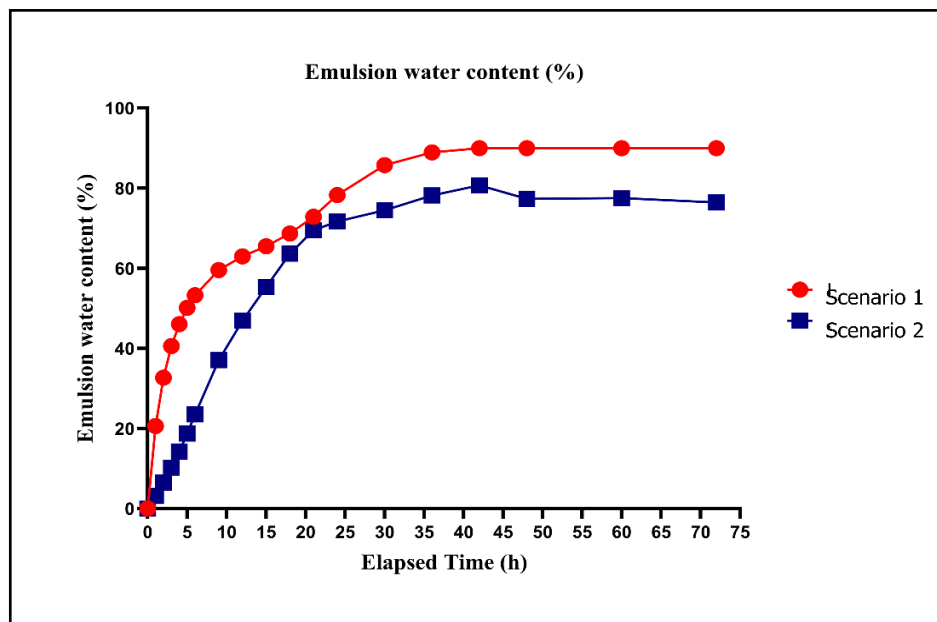


Рисунок 4.6 Содержание эмульсионной воды (%)

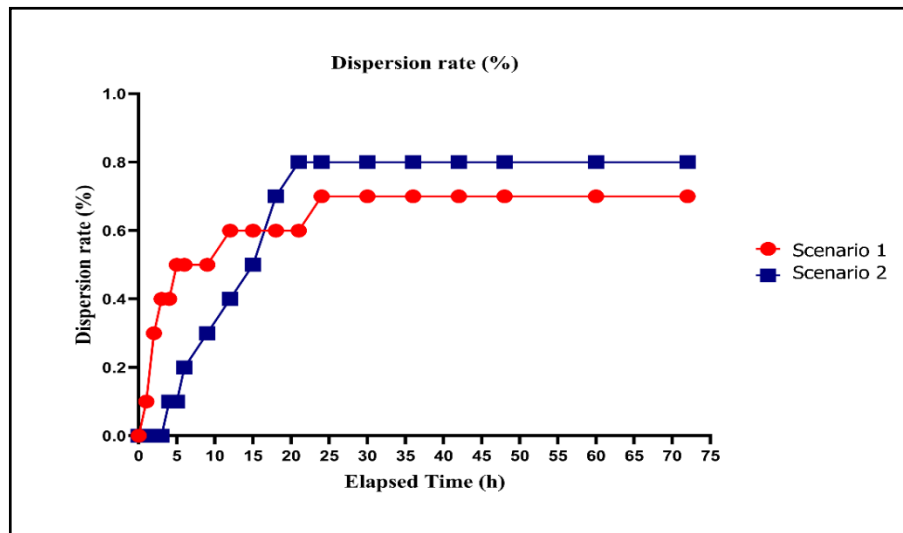


Рисунок 4.7 Коэффициент дисперсии (%)

4.4. Обсуждение

В данном исследовании моделируются два возможных сценария утечки нефти в результате аварии танкера у порта Айн Сухна на западном побережье Суэцкого залива. Во-первых, модель траектории GNOME была использована для прогнозирования движения нефтяного пятна и его времени для достижения пляжа. Кроме того, Автоматизированный запрос данных о разливах нефти (ADIOS2) был использован для определения того, как нефть разрушается естественным образом (путем испарения, эмульгирования и распространения) по мере ее движения.

Карты моделирования показывают, что в Сценарии №2 частицы нефти прошли небольшое расстояние на юго-запад и достигли берега через 21 час. В то время как в Сценарии №1 частицы нефти прошли большое расстояние на юго-восток и достигли береговой линии через 42 часа. Возможным объяснением этого может быть то, что в Сценарии №2, который произошел в июле, преобладающим ветром был северо-восточный (NE), который гнал нефть прямо к берегу. Напротив, в Сценарии №1, имевшем место в феврале, преобладающим направлением ветра было северо-западное (NW), что заставляло нефть некоторое время двигаться в юго-восточном направлении параллельно побережью, прежде чем достичь его. Это объяснение согласуется с

наблюдениями Хуссейна [61], который показал, что преобладающим ветром в северной части Суэцкого залива является поверхностный ветер NW, на который приходится приблизительно 45% частоты. Другим преобладающим ветром является СВ, с месячной частотой от 28 до 1 процента. Полученные результаты согласуются с данными Омар и др. (Omar) [65], который смоделировал некоторые ожидаемые сценарии разлива нефти с буровой установки в Суэцком заливе, используя канадскую прогностическую математическую модель разлива нефти SL-Ross. Когда преобладал ветер на северо-западе, все траектории утечки нефти текли в юго-восток и юго-юго-восток. Поэтому, если у берегов порта Айн-Сухна произойдет утечка нефти и ветер будет северо-восточным, у групп реагирования будет ограниченное время для ликвидации разлива, так как эти ветры ускоряют движение нефти к западному побережью Суэцкого залива.

Другое возможное объяснение движения разлитой нефти на юг в обоих сценариях заключается в том, что на него повлияло преобладающее южное направление морских течений. Фрихи и др. (Frihy) [225] сообщили, что морские течения в Суэцком заливе обычно направлены на юг. Кроме того, Наср и Смит (Nasr and Smith) [62] смоделировали гипотетический разлив в точке судоходного пути в Суэцком заливе и пришли к выводу, что морские течения определяют траекторию движения пятна. Результаты показывают, что в случае утечки нефти из источника напротив порта Айн Сухна на западной стороне Суэцкого залива, регион к югу от порта Сукна будет наиболее уязвим для загрязнения. В этом районе расположены различные туристические курорты, а также коралловые рифы. Любая последующая утечка существенно повлияет на эти курорты и морскую среду.

После разлива нефти процессы выветривания происходят с разной скоростью. Испарение - это первый процесс выветривания, который происходит после разлива нефти. В ходе этого процесса большинство летучих компонентов сырой нефти удаляются в течение нескольких часов после разлива, что существенно влияет на плотность и вязкость нефтяного пятна [19]. В результате определение скорости испарения имеет решающее значение. Результаты показывают, что значительные

объемы нефти были потеряны из-за испарения в обоих сценариях, что можно объяснить тем, что сырая нефть Arabian Light имеет более высокий процент легких и растворимых фракций, чем другие виды нефти [62]. Кроме того, в июле (сценарий №2) скорость испарения была более значительной, чем в феврале (сценарий №1); это может быть связано с высокими летними температурами. Эти результаты совместимы с результатами Fingas [143] который также сообщил, что скорость испарения разлитой нефти в морской среде увеличивается с повышением температуры.

Эмульгирование – это процесс включения воды в нефть [19]. Негативным последствием эмульгирования является увеличение объема пятна, что значительно повышает затраты на очистку. Следовательно, эмульгирование - это процесс, играющий важную роль в моделировании нефтяных разливов [1]. В данном исследовании результаты показали, что в отличие от скорости испарения, скорость эмульгирования в сценарии №1 была выше, чем в сценарии №2. Это может быть связано с тем, что сценарий №1 был реализован зимой, когда турбулентность на поверхности воды была максимальной. Эти результаты подтверждают выводы Бозкуртоглу (Bozkurtoğlu) [235] который предположил, что турбулентность на поверхности моря способствует эмульсии. В обоих сценариях было показано, что скорость испарения и эмульгирования очень высока.

Естественная дисперсия происходит, когда нефть разбивается на мелкие частицы под действием волн [41]. Этот процесс непосредственно влияет на увеличение площади поверхности, что ускоряет процессы биodeградации [52,236]. Удивительно, но естественное рассеивание разлитой нефти было скромным в обоих сценариях (0,7% и 0,8%). Этот вывод противоречит данным Nasr and Smith [62] которые смоделировали естественное рассеивание того же типа нефти с помощью модели SL Ross и обнаружили, что около 8% нефти рассеялось через 10 ч. Это расхождение может быть связано с использованием различных моделей разлива нефти. Основными процессами удаления нефти из морской воды являются испарение и естественное рассеивание, в то время как эмульгирование приводит к ее сохранению и повышению концентрации загрязнителя

[66,232]. Поэтому эти результаты о поведении нефти после разлива имеют решающее значение для специалистов по ликвидации разливов.

4.5. Выводы

Мы смоделировали разлив тысячи метрических тонн арабской легкой сырой нефти в морскую воду на судоходном маршруте в 5 километрах от порта Айн Сухна в 2020 году. Модели GNOME и ADIOS2 были использованы для моделирования двух сценариев с целью прогнозирования пострадавших районов, расчета времени, когда нефть достигнет береговой линии, и вычисления процессов выветривания разлитой нефти (испарение, эмульгирование и рассеивание). Исследование показало, что направление ветра и морских течений играет существенную роль в определении траектории движения разлива. В Сценарии №1 около 46 метрических тонн разлившейся нефти достигли Рас Абу Дараг, расположенного примерно в 22,7 км от места разлива, покрыв почти 14,2 км западной береговой линии Суэцкого залива. В то время как в Сценарии №2 разлив двигался на юго-запад (SW), и через 21 час около 705 метрических тонн частиц нефти покрыли расстояние в 10 км вдоль западного побережья, примерно в 10,5 км от места разлива. В Сценарии №2 нефть быстрее достигает берега из-за влияния северо-восточных ветров. Поэтому, если произойдет утечка нефти у побережья порта Айн Сухна и преобладающий ветер будет СВ, у групп реагирования будет ограниченное время для ликвидации разлива. Результаты также показывают, что регион к югу от порта Сухна, где расположено множество туристических курортов и различных коралловых рифов, будет наиболее уязвим для загрязнения. Согласно результатам ADIOS2, скорость испарения и эмульгирования была высокой, в то время как естественное рассеивание было скромным в обоих сценариях. Полученные результаты показывают, что на поведение разлитой нефти влияют тип нефти и условия окружающей среды (температура и турбулентность моря). Результаты настоящего исследования поведения нефтяного пятна и карты траекторий могут помочь организациям, участвующим в операциях по ликвидации последствий, и лицам, принимающим решения, в разработке более эффективных планов действий в чрезвычайных ситуациях.

Глава 5. Моделирование пути и поведения разлива нефти у южного входа в Суэцкий канал

5.1. Район исследований

Суэцкий канал представляет собой искусственный водный путь протяженностью 193 км, идущий от Порт-Саида на север до Суэцкого залива на юге, соединяя таким образом Средиземное и Красное моря, как показано **Рисунок 5. 1**. Это один из самых важных и интенсивно используемых водных путей в мире; судоходство по нему началось 17 ноября 1869 г [196].

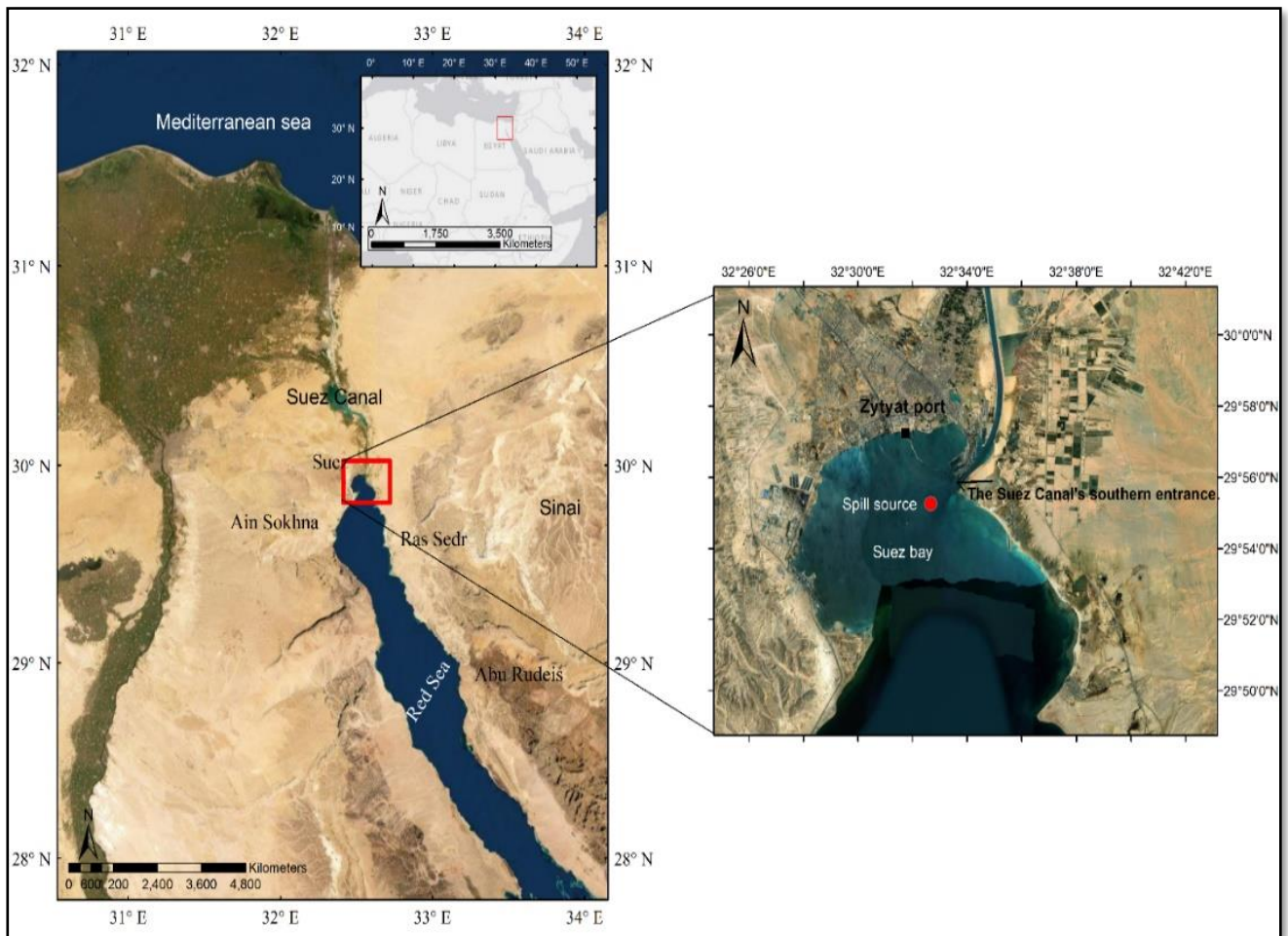


Рисунок 5. 1 Карта Суэцкого залива, показывающая гипотетический источник разлива нефти в виде большой красной точки у южного входа в Суэцкий канал и порт Зайтят.

По данным Управления Суэцкого канала [237], на канал приходится около 10% мирового морского трафика, и он обеспечивает Египет столь необходимыми иностранными денежными средствами. 5 августа 2014 года президент Египта Абдель Фаттах эль-Сиси объявил о начале реализации нового египетского проекта Суэцкого канала. Вследствие этого движение по каналу увеличилось с 18830 судов в 2020 году до 20694 в 2021 году, или более чем на 56 судов в день [195]. Таким образом, вероятность аварий с разливом нефти в египетских водах возросла из-за судоходства, проходящего через Суэцкий канал в Средиземное море, что может затруднить морской путь и нанести вред морской экосистеме [196]. **Рисунок 5. 2** показывает плотность морского движения в Суэцком заливе и Суэцком канале для всех типов судов в 2021 году [201]. Согласно Костяная и др. (Kostianaia) [196], в Суэцком канале уже было много случаев разливов нефти. В результате аварий нефтяных танкеров в 2004 году произошла утечка около 4000 тонн сырой нефти, а в 2006 году - 9000 тонн [61].

Суэцкий залив, который является южным входом в Суэцкий канал, представляет собой мелководное продолжение Суэцкого залива, грубо закрученной формы, с центральной осью, направленной на северо-северо-запад [238]. Поэтому бухта всегда перегружен грузами и танкерами, ожидающими транзита через канал в Средиземное море, что может привести к авариям с утечкой нефти. Еще одним фактором, способствующим вероятности разлива нефти в регионе, является порт Зитят. Этот порт является одним из старейших и крупнейших специализированных портов Египта. Он используется нефтяными корпорациями Суэца для приема нефтеналивных танкеров с нефтью и газом из Красного моря и губернаторства Южный Синай [239]. Несмотря на высокую судоходную активность и потенциальную возможность подвергнуться воздействию разливов нефти в водах Египта, в настоящее время не существует рекомендаций по прогнозированию движения разливов нефти в исследуемом районе (южный вход в Суэцкий канал), что делает данное исследование первым в своем роде.

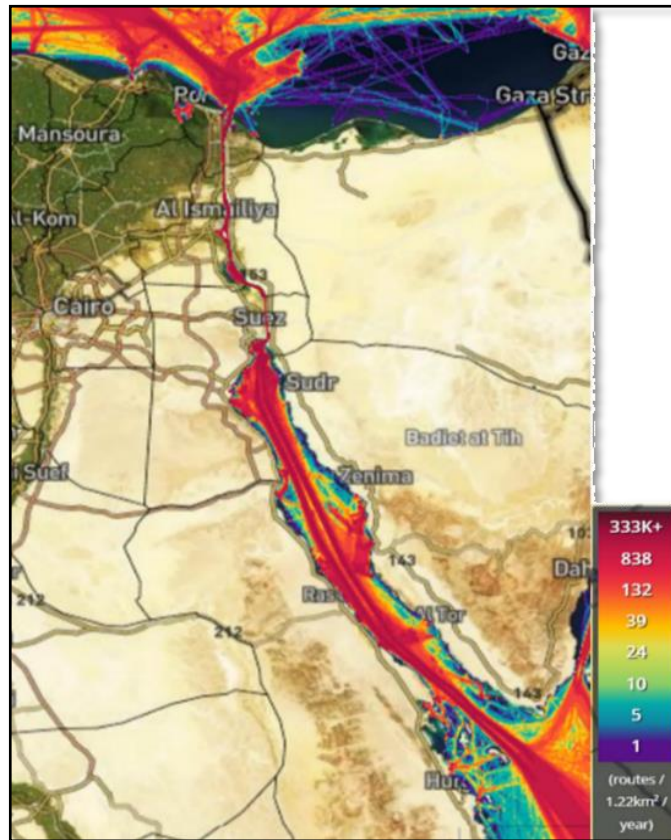


Рисунок 5. 2 Интенсивное движение в Суэцком заливе и Суэцком канале, источник морского трафика [201]

5.2. Формулирование модели и допущения

Гипотетический разлив нефти, вызванный аварией танкера в Суэцком бухте у южного входа в Суэцкий канал, рассматривается для настоящего дела. Этот возможный источник разлива нефти находится на судоходном пути примерно в 2 километрах от береговой линии, как показано **Рисунок 5. 1**. Предполагается, что одна тысяча метрических тонн арабской легкой сырой нефти разлилась 10-го февраля 2021 года в 12.00 am. Для моделирования траектории и поведения разлива были использованы модели GNOME и ADIOS2. Как упоминалось ранее, наборы исходных данных GNOME и ADIOS2 содержат данные о береговой линии, ветре, морских течениях, местоположении разлива нефти, типе нефти, количестве нефти и температуре морской воды. Сценарии разлива в данном исследовании включают как фактические, так и гипотетические параметры окружающей среды. Фактические данные о ветре были

загружены из ECMWF Reanalysis ERA5, а данные о морских течениях - из Copernicus. Скорость ветра предполагается постоянной на уровне 4 м/с, что является средней скалярной скоростью для февраля в Суэце, а направление ветра манипулируется для представления трех преобладающих направлений ветра: NW, составляющего 22,4% частоты; N (17,3%); и NE (7,0%) [61]. Температура морской воды была извлечена из предыдущих исследований, где средняя температура морской воды зимой составляет 18,7 °С [234]. Данные о береговой линии были получены из базы данных GSHHS сервером GOODS. Период моделирования составил 72 ч с шагом 0,25 ч. Значения неопределенности по течению и поперечному течению для данных о морских течениях были скорректированы до 10% для учета неопределенностей вероятного значения течений. Четыре различных параметра сценария представлены в **Таблица 5-1**.

Таблица 5-1 Сценарии моделей GNOME с различными параметрами

Сценарий	Место разлива	Объем разлива	Течение морской воды	Скорость и направление волны
Сценарий № 1	Поздно: 29.9214 N Длинный: 32.5493 E	1000 метрических тонн	Переменная	Переменная
Сценарий № 2	Поздно: 29.9214 N Длинный: 32.5493 E	1000 метрических тонн	Переменная	4 м/с от NW
Сценарий № 3	Поздно: 29.9214 N Длинный: 32.5493 E	1000 метрических тонн	Переменная	4 м/с от N
Сценарий № 4	Поздно: 29.9214 N Длинный: 32.5493 E	1000 метрических тонн	Переменная	4 м/с от NNE

5.3. Результаты

5.3.1. Сценарий №1 траектория и выветривание

Переменные данные о ветре и морских течениях используются для сценария №1. Моделирование для модели началось в 12:00 10 февраля 2021 года. Результаты сценария

№1 из модели GNOME показаны на в виде карт каждые шесть часов. Когда началось моделирование, частицы нефти дрейфовали в юго-восточном направлении на юго-восток. Через три часа после начала моделирования в 3 часа ночи около 0,84% (177 метрических тонн) нефти начали достигать южного входа в Суэцкий канал и продолжали накапливаться на восточной стороне Суэцкого залива. Через 72 часа примерно 37,2% нефти покрыло около 34 километров восточного побережья Суэцкого залива от (29°56'17.50"N 32°33'14.24"E до 29°42'29.57"N 32°41'20.83"E) как для черных точек (лучше всего) и красных точек (минимальное решение сожаления). В то же время примерно 35,9% (359 млн тонн) нефти прошло 30 км от источника разлива и оставалось плавающим. Процессы испарения и эмульгирования начались сразу после разлива нефти. В течение 72 часов испарилось около 26% (260 тонн) от общего разлива нефти, а содержание эмульсионной воды достигло примерно 84,8%, (Рисунок 5.4) (Таблица 5-2)

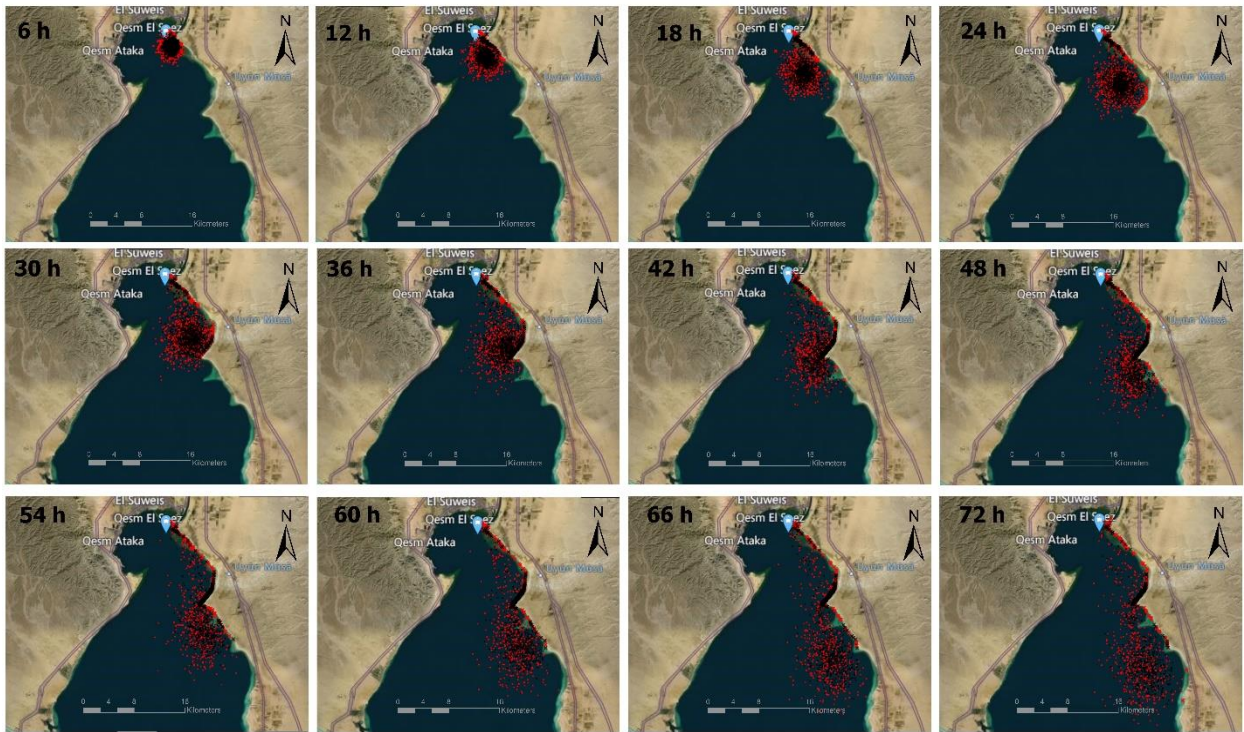


Рисунок 5.3 Положение нефтяных частиц для Сценария №1 (переменная скорость и направление ветра и морских течений). Черные точки представляют BGS, а красная точка - MRS). Источник разлива показан большой синей точкой.

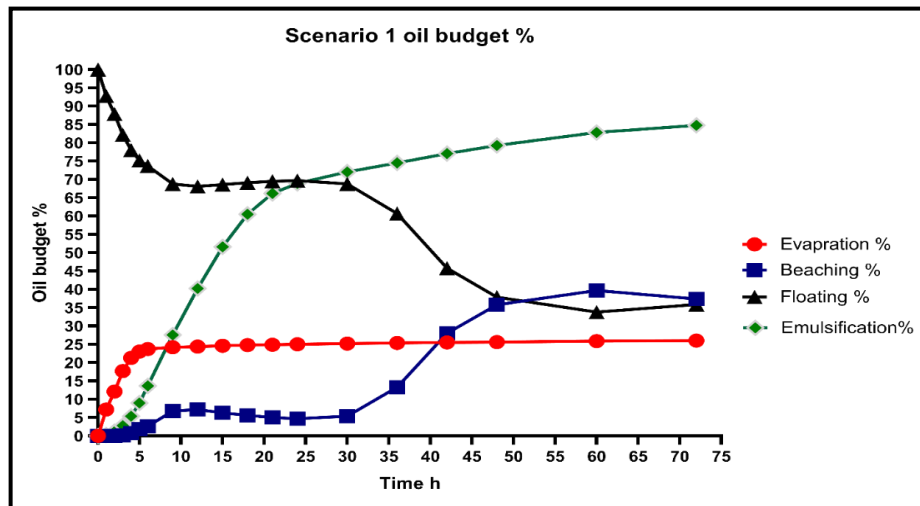


Рисунок 5.4 Испарение, выбрасываются на берег, плавание и эмульгирование разлитой нефти в период моделирования сценария №1.

Таблица 5-2 Сценарий №1 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Испарившаяся нефть	Выброшен на берег	Плавающая нефть	Эмульгирование
1	72.2	0	928	2.7
2	121	0	879	11.7
3	177	0.84	822	28.0
4	213	7.28	780	53.7
5	230	18.2	752	90.0
6	237	25.8	737	136.5
9	242	68.2	688	275.5
12	244	71.8	681	402.5
15	246	63.3	686	516.3
18	248	56.4	691	605.4
21	249	50.3	695	661.8
24	250	47.2	697	689.5
30	252	54.3	688	720.6
36	254	133	607	745.4
42	255	280	458	770.5
48	256	358	379	793.0
60	259	397	338	828.3
72	260	374	359	848.1

5.3.2. Сценарий №2 траектория и выветривание

Смоделирован сценарий №2 с постоянной скоростью ветра 4 м/с от северо-западного направления и переменным морским течением. Модель отправляется в 10.2.2021 в 12:00. Здесь мы видели, как скользкое начало двигаться в направлении ESE с лучшей догадкой и минимальной зоной покрытия сожаления, **Рисунок 5.5**. В этом сценарии высадка на берег началась через два часа в 2 часа ночи; было обнаружено, что почти одна метрическая тонна нефти была выброшена на берег вдоль южного входа в Суэцкий канал. В конце моделирования примерно 70,5% всей нефти было выброшено на берег вдоль восточной береговой линии Суэцкого залива, к югу от Суэцкого канала. В этом случае черные точки покрывали около 16,5 км ($29^{\circ}55'46.04''\text{N}$ $32^{\circ}33'36.28''\text{E}$ до $29^{\circ}48'56.49''\text{N}$ $32^{\circ}35'52.46''\text{E}$), в то время как красные точки влияют более чем на 38 км ($29^{\circ}56'17.43''\text{N}$ $32^{\circ}33'27.54''\text{E}$ до $29^{\circ}39'33.62''\text{N}$ $32^{\circ}39'45.01''\text{E}$). Через 72 часа скорость испарения составила около 25,2%, а количество эмульгирования составило 73,3% (**Рисунок 5. 6**) (**Таблица 5-3**).

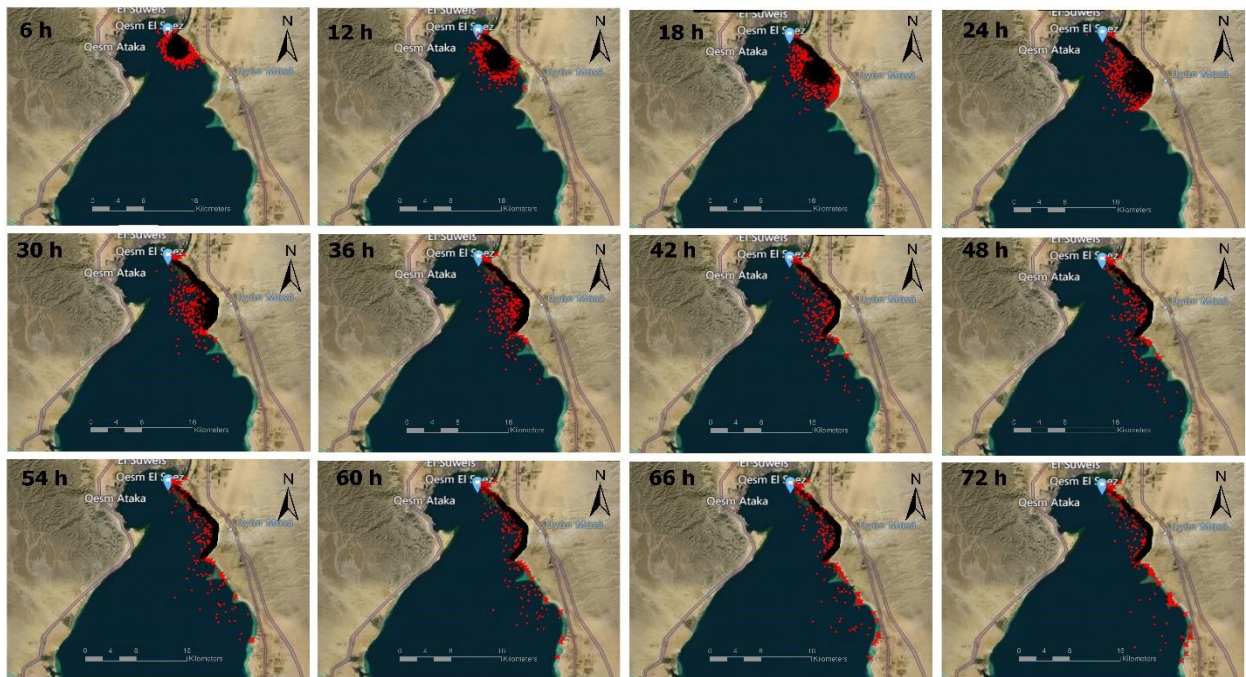


Рисунок 5.5 частиц нефти для сценария №2 (постоянная скорость ветра 4 м/с от северо-западного направления). Черные точки представляют BGS, а красная точка представляет MRS). Источник разлива показан в виде большой синей точки.

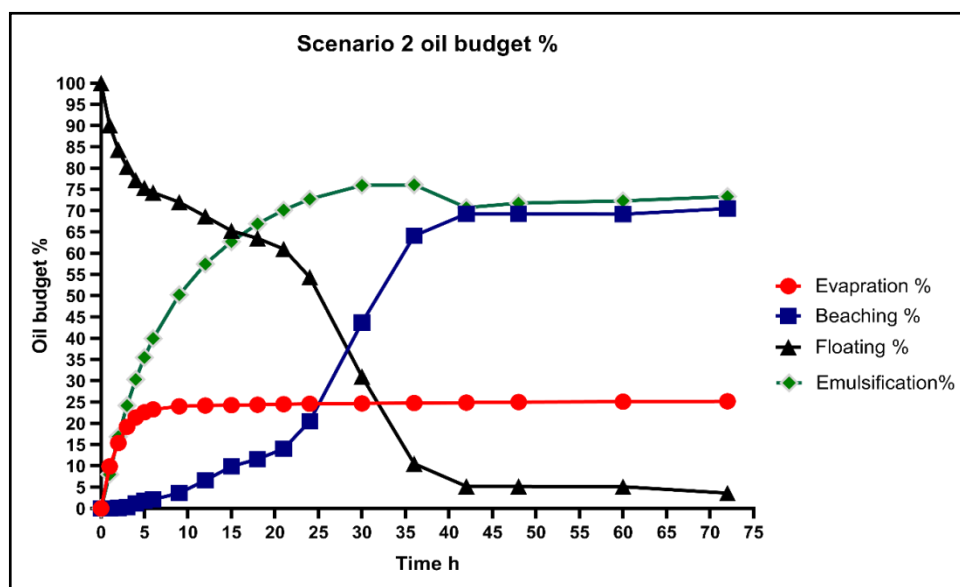


Рисунок 5. 6 Испарение, выбрасываются на берег, плавание и эмульгирование разлитой нефти в течение периода моделирования сценария №2.

Таблица 5-3 Сценарий №2 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Испарившаяся нефть	Выброшен на берег	Плавающая нефть	Эмульгирование
1	98.9	0	901	80.2
2	154	0.87	844	169.0
3	192	3.31	803	242.0
4	214	12.1	772	303.3
5	226	17.6	754	355.3
6	233	21.3	743	399.7
9	240	36.4	720	502.4
12	242	66.5	687	575.0
15	243	98.6	653	627.4
18	244	116	635	669.3
21	245	140	610	701.4
24	246	205	544	727.6
30	247	437	310	759.6
36	248	641	105	761.3
42	249	693	52	707.5
48	250	693	51.8	718.0
60	251	692	50.8	723.6
72	252	705	35.9	733.2

5.3.3. Сценарий №3 траектория и выветривание

В сценарии №3 моделирование выполняется с постоянной скоростью ветра 4 м/с от направления N. Когда моделирование началось в 12 часов ночи, разлив переместился в южном направлении с черными (лучшее решение для угадывания, BGS) и красными (минимальное решение сожаления, MRS) точками, (Рисунок 5. 7). Через 9 часов незначительное количество нефти в 0,1% достигло восточных и западных пляжей Суэцкого залива. В то время как в конце моделирования большая часть нефти, около 73,8 процента, оставалась плавающей в центре вод Персидского залива и продолжала двигаться в южном направлении. Через 72 часа количество нефти, потерянного из-за испарения, достигло 25,6%, а содержание эмульсионной воды достигло примерно 76,4%, (Рисунок 5. 8) (Таблица 5-4).

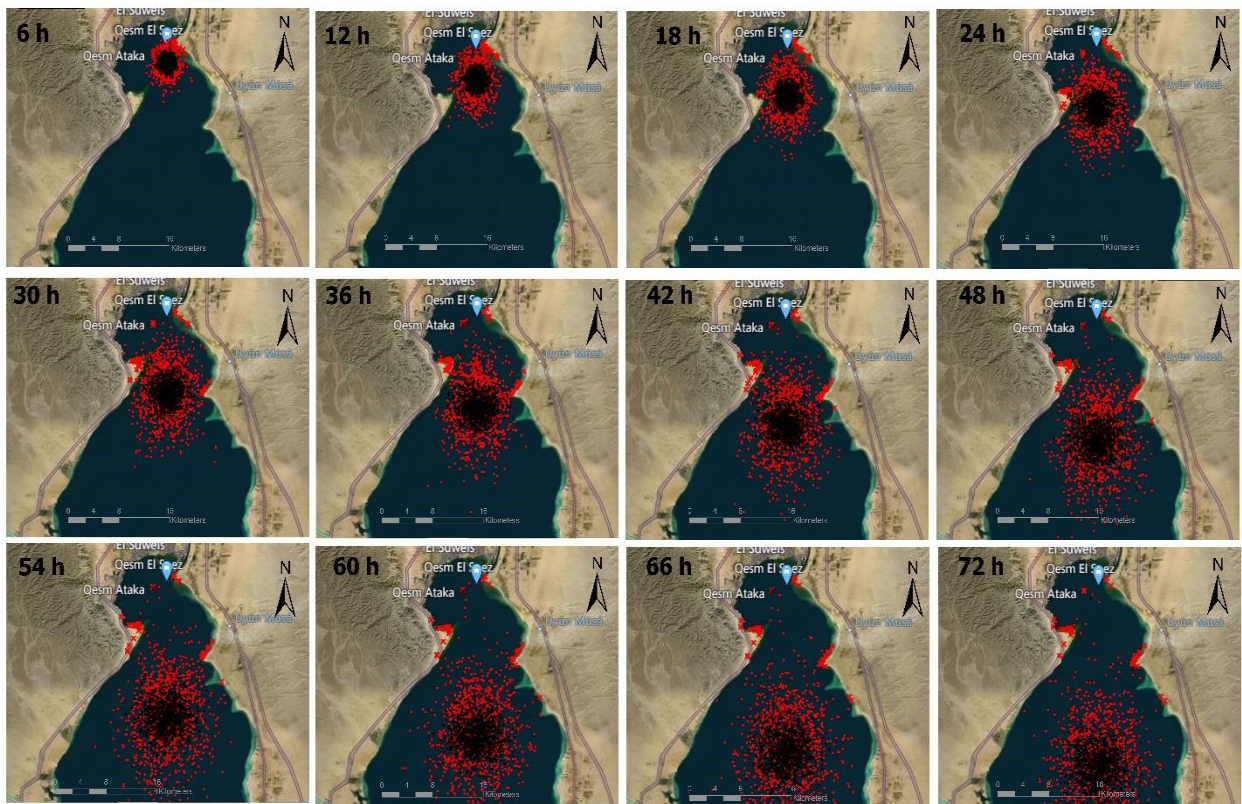


Рисунок 5. 7 частиц нефти для сценария №3 (постоянная скорость ветра 4 м/с от направления N). Черные точки представляют BGS, а красная точка представляет MRS). Источник разлива показан в виде большой синей точки.

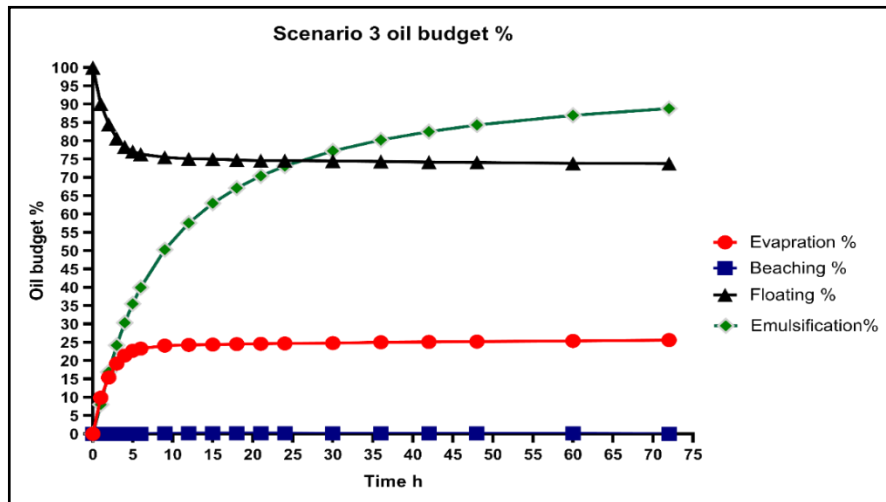


Рисунок 5. 8 Испарение, выброс на берег, плавание и эмульгирование разлитой нефти в течение периода моделирования сценария №3.

Таблица 5-4 Сценарий №3 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Испарившаяся нефть	Выброшен на берег	Плавающая нефть	Эмульгирование
1	98.9	0	901	80.2
2	154	0	845	169.0
3	192	0	807	242.1
4	214	0	784	303.3
5	227	0	771	355.3
6	233	0	764	400.0
9	241	0.76	755	503.1
12	243	1.51	751	575.7
15	244	1.51	750	629.7
18	245	2.26	748	671.3
21	246	2.26	746	704.4
24	247	1.5	746	731.1
30	248	0.75	745	772.3
36	250	0.75	744	802.4
42	251	0.75	742	825.4
48	252	0.75	741	843.4
60	254	0.75	739	869.9
72	256	0	738	888.3

5.3.4. Сценарий №4 траектория и выветривание

Четвертый сценарий смоделирован с постоянной скоростью ветра 4 м/с с северо-восточной северо-восточной части, (**Рисунок 5. 9**). Когда моделирование начинается в 12 часов ночи, нефтяное пятно начинает двигаться в юго-западном направлении к западному побережью Суэцкого залива. Сразу после 2 часов в 2 часа ночи примерно 1,4% (140 м) начинает выбрасываться на берег на Зеленый остров, примерно в 2 км от места разлива. Через 18 часов в 6 часов вечера слизьяк проехал около 9 км и достиг западного побережья Суэцкого залива в порту Аль-Адабия. Через 72 часа примерно 60,3% всей разлитой нефти накопилось на Зеленом острове и покрыло около 40 км западного побережья Суэцкого залива от $29^{\circ}54'31.20''$ с.ш. $32^{\circ}27'43.70''$ в.д. до $29^{\circ}39'11.66''$ с. ш. $32^{\circ}21'54.20''$ в. д. для черных и красных точек. При этом примерно 13,7% остались в воде и продолжали плавать. Как показано в **Рисунок 5. 10** и **Таблица 5-5** количество нефти, потерянной из-за испарения, составляло около 25,3% (253 тонны), а содержание эмульсионной воды достигало примерно 80,1% в конце моделирования.

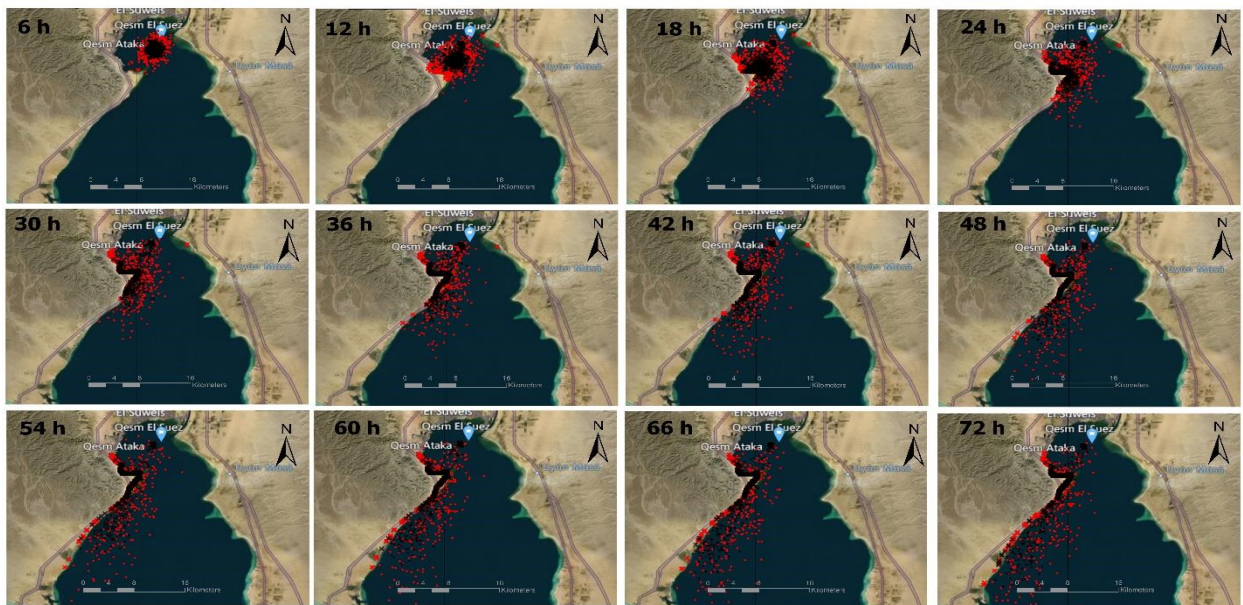


Рисунок 5. 9 частиц нефти для сценария 4 (постоянная скорость ветра 4 м/с от северо-восточного направления). Черные точки представляют BGS, а красная точка представляет MRS). Источник разлива показан в виде большой синей точки.

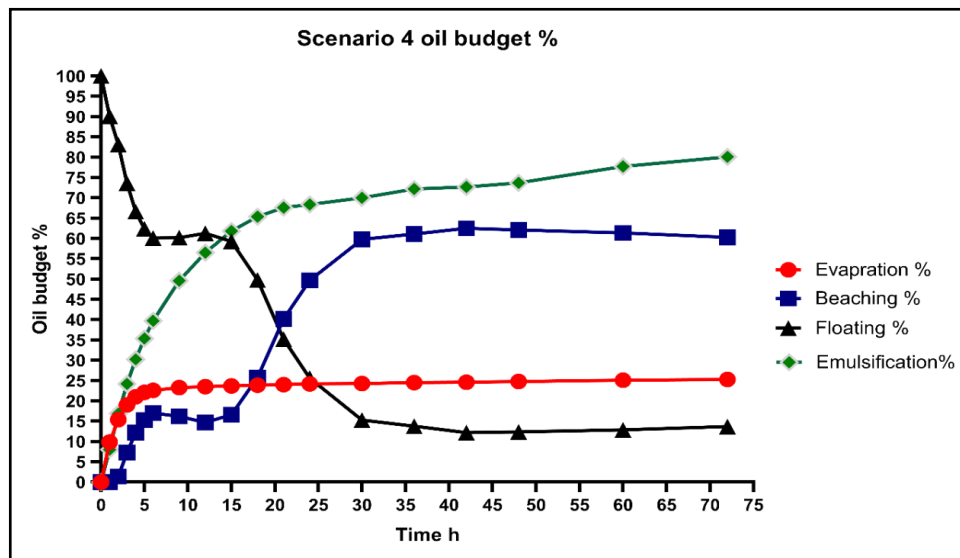


Рисунок 5.10 Испарение, выбрасывание, плавание и эмульгирование разлитой нефти в период моделирования сценария №4.

Таблица 5-5 Сценарий №4 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны)

Время (часы)	Испарившаяся нефть	Выброшен на берег	Плавающая нефть	Эмульгирование
1	98.9	0	901	80.2
2	154	13.8	831	169.0
3	190	72.6	736	242.0
4	210	122	666	302.4
5	221	153	624	354.1
6	226	170	601	397.6
9	233	162	602	496.0
12	235	147	613	565.3
15	237	166	593	618.6
18	239	258	498	653.8
21	240	402	352	676.1
24	242	497	256	684.0
30	243	598	153	700.4
36	245	611	138	722.2
42	246	625	122	727.1
48	248	621	124	736.8
60	251	614	129	777.3
72	253	603	137	801.2

5.4. Обсуждение

В данном исследовании моделируются четыре возможных сценария разлива нефти, который может быть вызван аварией судна у южного входа в Суэцкий канал. Таким образом, траекторная модель GNOME имитировала движение нефтяного пятна и время его достижения пляжа. Кроме того, был использован автоматизированный запрос данных о разливах нефти (ADIOS2), чтобы определить, как нефть разрушается естественным образом по мере распространения (через испарение и эмульгирование).

Карты траекторий в данном исследовании показывают, что скорость и направление ветра значительно влияли на перемещение разлитой нефти во всех четырех сценариях. Эти результаты согласуются с результатами предыдущих исследований. Многочисленные предыдущие исследования показали, что скорость и направление ветра во время и после разлива нефти существенно влияют на подвижность нефти в морской среде [240–243]. Другая потенциальная причина течения разлитой нефти в южном направлении во всех сценариях заключается в том, что на него может влиять преобладающее южное движение морских течений. Согласно Фрихи (Frihy) [225], морские течения в Суэцком заливе в основном движутся в южном направлении.

Результаты показывают, что в сценариях №1,2 разлитая нефть двигалась на юго-восток. Хотя в сценарии №1 мы использовали фактические данные о ветре в феврале, полученные из модели ERA5 реанализа ECMWF, во втором сценарии мы использовали постоянную скорость ветра 4 метра в секунду и постоянное направление с северо-запада. Это объясняется тем, что северо-западный ветер преобладает в этом районе в течение февраля и заставляет нефть двигаться в юго-восточном направлении. На режим северо-западного ветра приходится около 24% частоты февральских ветров в северной части Суэцкого залива [244]. Текущие выводы согласуются с Хусейном [61], которая использовала модель разлива нефти GNOME для моделирования нескольких предполагаемых сценариев разлива нефти под влиянием различных режимов ветра в

северной части Суэцкого залива. Она обнаружила, что когда преобладающий ветер дует с северо-запада, все траектории разлива нефти направляются в юго-восточном направлении к восточной береговой линии залива. В данном исследовании разлитая нефть в обоих сценариях №1,2 достигла навигационной полосы Суэцкого канала в течение двух-трех часов. Кроме того, загрязнение нефтью угрожало примерно 30-38 километрам пляжей к югу от Суэцкого канала. Таким образом, в случае разлива нефти из источника у южного входа в Суэцкий канал, навигационная полоса через Суэцкий канал и территория к югу от Суэцкого канала будут наиболее уязвимы для загрязнения. В этом районе находятся различные важнейшие проекты, такие как электростанция Аюн Мусс и несколько туристических курортов. Поэтому персонал по ликвидации разливов нефти в этом регионе должен постоянно быть начеку.

В случае третьего сценария преобладающие ветры дули с севера, разлив направился на юг, и почти три четверти всей разлитой нефти продолжали плавать в воде в течение 72 часов до конца периода моделирования. Поэтому у групп реагирования могло быть достаточно времени, чтобы выбрать подходящий метод для смягчения последствий разлива нефти до того, как она загрязнит береговую линию. Продолжая четвертый сценарий, мы предположили, что преобладает северо-восточный ветер. В этом сценарии разлитая нефть двигалась в юго-западном направлении к западному побережью Суэцкого залива. Направление движения нефти в этом сценарии согласуется с данными Прадхан и др. (Pradhan) [17], которые смоделировали разлив нефти в Бенгальском заливе, Индия. Они наблюдали, что нефть двигалась в юго-западном направлении, когда дули северные ветры. В данном исследовании Сценарий 4 представляет собой значительную угрозу для Зеленого острова и западного побережья Суэцкого залива, от порта Аль-Адабия на севере до порта Айн Сухна на юге. Эта территория характеризуется чувствительными и хрупкими природными ресурсами, средой обитания, обширной прибрежной равниной, обширной приливной полосой, туристическими курортами, а также водной средой, где расположен жизненно важный коралловый риф [245].

После разлива нефти процессы выветривания происходят с разной скоростью. Испарение - это первый процесс выветривания, который происходит после разлива нефти. В ходе этого процесса большинство летучих компонентов сырой нефти удаляются в течение нескольких часов после разлива, что существенно влияет на плотность и вязкость нефтяного пятна [19]. В результате определение скорости испарения имеет решающее значение. Результаты показывают, что примерно четверть разлитой нефти была потеряна из-за испарения во всех сценариях. Нефть Arabian Light имеет более высокий процент легких и растворимых фракций, чем другие типы нефти [62].

Эмульгирование – это процесс включения воды в нефть [19]. Негативным последствием эмульгирования является увеличение объема пятна, что значительно повышает затраты на очистку. Следовательно, эмульгирование - это процесс, играющий важную роль в моделировании нефтяных разливов [1]. Результаты показывают, что содержание воды в эмульсии было чрезвычайно высоким во всех сценариях. Это может быть связано с тем, что период моделирования пришелся на февраль, и турбулентность на поверхности воды была максимальной. Эти результаты подтверждают выводы Vozkurtoğlu [235], который предположил, что турбулентность на поверхности моря способствует эмульгированию. Эмульгирование вызывает рост концентрации загрязняющих веществ. Поэтому эти результаты о поведении нефти после разлива имеют решающее значение для специалистов по ликвидации разливов [66,232].

5.5. Выводы

Поскольку Суэцкий канал является одним из самых оживленных судоходных маршрутов в мире, особенно для транзита сырой нефти, он уязвим для разливов нефти, которые могут нарушить транспортное сообщение, нанести ущерб морским и прибрежным экосистемам, а также угрожать инфраструктуре и туристическим курортам в Суэцком заливе. В данном исследовании моделируется разлив 1 000 метрических тонн арабской легкой сырой нефти в морскую воду 10 февраля 2021 года в 12:00 в судоходном канале примерно в 2 км от южного входа в Суэцкий канал. Четыре сценария были

смоделированы с помощью моделей GNOME и ADIOS2 при различных ветровых условиях, чтобы определить потенциально пострадавшие регионы, определить, когда нефть достигнет побережья, сколько нефти останется в воде и рассчитать процессы выветривания разлитой нефти (испарение и эмульгирование). Исследование показало, что на движение разлитой нефти влияло направление ветра в каждом сценарии и направление течения морской воды в регионе. Движение разлитой нефти в сценарии №1 происходило под влиянием северо-западного северного ветра и дрейфовало в направлении восточной береговой линии Суэцкого залива и достигло берега в течение двух-трех часов. В результате под угрозой загрязнения нефтью оказались судоходная трасса Суэцкого канала и примерно 30-38 километров пляжей к югу от Суэцкого канала, где расположено несколько проектов и туристических курортов. Северный ветер в Сценарии № 3 заставил разлитую нефть двигаться в южном направлении, и большая часть нефти (73,8 %) оставалась на плаву до конца моделирования и не угрожала пляжам. В Сценарии № 4 разлив двигался в юго-западном направлении к западному побережью Суэцкого залива под воздействием северо-восточного ветра NE. Разлитая нефть достигла Зеленого острова в течение двух часов, а через 72 часа примерно 60,3% частиц нефти прошли расстояние в 40 км к югу от порта Аль-Адабия до порта Айн Сухна. Согласно результатам ADIOS2, во всех сценариях значительная часть разлитой нефти, почти четверть нефти, испарилась, а более двух третей нефти эмульгировалось.

Заключение

Суэцкий залив является объектом значительной судоходной активности, особенно танкерных перевозок нефти, из-за его стратегического положения между Средиземным и Красным морями. Поэтому он является потенциально уязвимым местом для разливов нефти, вызванных авариями танкеров, которые могут иметь разрушительные последствия для прибрежных районов Египта, нанести ущерб морской среде, коралловым рифам, туристическим курортам и затруднить морской путь. Три случая разлива аравийской легкой сырой нефти в результате аварии нефтяных танкеров вдоль морского маршрута в Суэцком заливе (перед тремя важнейшими районами: Хургада, порт Айн Сухна и южный вход в Суэцкий канал) были смоделированы с использованием общей среды оперативного моделирования нефти Национального управления океанических и атмосферных исследований (GNOME) и моделей автоматизированного поиска данных о разливах нефти (ADIOS2). В заключение основные результаты, полученные при математическом моделировании траектории и поведения разлива нефти в трех районах, можно сформулировать следующим образом:

- Во всех случаях направления ветра и морских течений играют существенную роль, определяя движение траектории разлива в Суэцком заливе.

- В Хургаде, были смоделированы два возможных сценария разлива нефти в феврале и августе 2021 года в результате инцидента с танкером в проливе Губал, примерно в 50 км к северу от Хургады. Результаты показали, что частицы нефти в Сценарии №1 (февраль) двигались в юго-восточном направлении под воздействием северо-западных ветров NW, и потребовалось 42 часа, чтобы достичь острова Малый Джубал, а затем острова Шадван. В то время как в сценарии №2 (август) разлившееся вещество двигалось в юго-западном направлении под воздействием северо-восточного NE ветра и через 21 час прибыло на остров Ашрафи, а затем на острова Джубал, Гейсум и Тавила. Результаты моделирования процессов выветривания разлитой нефти показали, что около 27% нефти Arabian Light испарилось, а естественная скорость рассеивания

была скромной, около 1,3% в обоих сценариях в конце моделирования. Более того, количество воды в эмульсии увеличивалось сразу после попадания нефти в воду, достигая 90% через 108 ч в обоих сценариях. Северные острова Красного моря (Ашрафи, Малый Губал, Гейсум, Тавила, Шадван и Гифтон), имеющие огромное экономическое и стратегическое значение, будут наиболее уязвимы к загрязнению.

- В Айн Сухне, в феврале и августе 2020 года по двум сценариям аравийская легкая сырая нефть вылилась в морскую воду на судоходном пути примерно в 5 километрах от порта Айн Сухна. Исследование показало, что в Сценарии №1 около 29.7 метрических тонн разлитой нефти двигались в юго-восточном направлении (SE), параллельно западному побережью ГОС и достигли Рас Абу Дараг, примерно в 22,7 км от места разлива, покрыв почти 14,2 км западной береговой линии Суэцкого залива. В сценарии №2 разлив двигался в юго-западном (SW) направлении, и через 21 час примерно 692 тонны нефтяных частиц покрыли расстояние в 10 км вдоль западного побережья, примерно в 10,5 км от места разлива. Согласно результатам ADIOS2, скорость испарения и эмульгирования была высокой, в то время как естественное рассеивание было скромным в обоих сценариях. Регион к югу от порта, где расположено множество туристических курортов и различных коралловых рифов, будет наиболее уязвим для загрязнения.

- У южного входа в Суэцкий канал, четыре сценария разлива арабской легкой сырой нефти произошли примерно в 2 км от южного входа в Суэцкий канал в феврале 2021 года. В этом случае предполагается, что скорость ветра постоянна и составляет 4 м/с, что является средней скалярной скоростью для февраля в Суэце, а направлением ветра манипулируют, чтобы представить три преобладающих направления ветра: NW, N и NNE. Движение разлитой нефти в сценариях №1 и №2 происходило под влиянием северо-западного СЗ ветра и дрейфовало в направлении восточной береговой линии Суэцкого залива и достигло пляжа в течение двух-трех часов. В результате под угрозой загрязнения нефтью оказались судоходная трасса Суэцкого канала и примерно 30-38 километров пляжей к югу от Суэцкого канала, где расположено несколько проектов и

туристических курортов. Северный ветер в Сценарии № 3 заставил разлитую нефть двигаться в южном направлении, и большая часть нефти (73,8 %) оставалась на плаву до конца моделирования и не угрожала пляжам. В Сценарии № 4 разлив двигался в юго-западном направлении к западному побережью Суэцкого залива под воздействием северо-восточного ветра NE. Разлитая нефть достигла Зеленого острова в течение двух часов, а через 72 часа примерно 60,3% частиц нефти прошли расстояние в 40 км к югу от порта Аль-Адабия до порта Айн Сухна. Согласно результатам ADIOS2, во всех сценариях значительная часть разлитой нефти, почти четверть нефти, испарилась, а более двух третей нефти эмульгировалось.

В заключение, моделирование разлива нефти в Суэцком заливе с помощью математических моделей разлива нефти может быть значимым в нескольких отношениях:

Улучшение планирования реагирования: Исследование может помочь улучшить планирование реагирования на потенциальные разливы нефти в Суэцком заливе, предоставляя информацию о том, как нефть будет двигаться и распространяться в случае разлива. Это позволит улучшить планирование готовности и реагирования, чтобы минимизировать последствия разлива.

Оценка риска: Исследование также может быть использовано для оценки риска разлива нефти в Суэцком заливе. Понимая, как нефть будет перемещаться и распространяться в случае разлива, заинтересованные стороны могут оценить вероятность и серьезность разлива нефти и принять необходимые меры для снижения риска.

Информирование политики: Исследование может предоставить ценную информацию для лиц, ответственных за разработку политики, для принятия обоснованных решений о нормативных актах и политике, связанных с предотвращением и ликвидацией разливов нефти. В конечном итоге это может привести к улучшению защиты окружающей среды и средств к существованию людей в этом районе.

Оценка воздействия на окружающую среду: Исследование может внести вклад в оценку воздействия на окружающую среду потенциальных нефтегазовых проектов в Суэцком заливе. Моделируя разливы нефти в различных условиях, исследование может помочь оценить потенциальное воздействие разлива на окружающую среду и помочь в принятии обоснованных решений о целесообразности реализации нефтегазовых проектов в регионе.

В целом, практическая значимость исследования по моделированию разливов нефти в Суэцком заливе с использованием математических моделей разливов нефти может иметь решающее значение для улучшения планирования реагирования, оценки риска, информирования политики и внесения вклада в оценку воздействия на окружающую среду.

Список рисунков

Рисунок 1.1 Мировая добыча нефти с 1998 по 2021 год в сутки [71].	138
Рисунок 1.2 Количество зарегистрированных разливов нефти в сумме по десятилетиям, по источникам разливов, за почти пять десятилетий, с 1970 по 2010–2018 [77].	140
Рисунок 1.3 Основные причины крупных и незначительных разливов танкеров.....	140
Рисунок 1.4 Карта крупных и мелких разливов нефти в мире с 1970 по 2020 год [58].	142
Рисунок 1.5 Основные процессы разлива морской нефти после разлива [1].....	146
Рисунок 1.6 Относительные временные шкалы процессов выветривания и судьбы. Толщина столбиков отражает относительную важность каждого процесса в определенное время после первоначального разлива [105].	146
Рисунок 1.7 Влияние различных направлений ветра и течения на результирующее движение нефтяного пятна [113].	149
Рисунок 2.1 Топографическая карта Суэцкого залива.....	168
Рисунок 2.2 Местоположения нефтяных месторождений и трубопроводов в Суэцком заливе [200]	168
Рисунок 2.3 Контурные, изображающие плотность морских перевозок в Суэцком заливе для всех типов судов в 2021 году [201].	169
Рисунок 2. 4 Зональное распределение инцидентов с разливами нефти с 1998 по 2005 год в Суэцком заливе, наиболее частые зоны разливов нефти обведены красным цветом; 1) Хургада 2) Айн Сухна 3) южный вход в Суэцкий канал. (каждый красный кубик представляет один инцидент)	172

Рисунок 2.5 Структура программы ADIOS2 [50]	181
Рисунок 2. 6 Структура диаграмм входных и выходных данных моделей GNOME и ADIOS2	184
Рисунок 2.7 Извлечение данных о береговой линии исследуемого района с веб-сайта GOODS	185
Рисунок 3. 1 Общая карта Красного моря Египта с указанием пляжей Хургады, островов и источника разлитой нефти, обозначенного красной точкой	189
Рисунок 3. 2 Плотность движения судов между Суэцким заливом и Средиземным морем через Суэцкий канал. Кружок изображает активность судов у побережья Хургады [201].	190
Рисунок 3. 3 Диаграмма розы ветров в городе Хургада с 2011 по 2020 год.....	191
Рисунок 3. 4 Моделирование траектории сценария №1, зеленые стрелки представляют направление ветра, а большая синяя точка представляет местоположение разлива.....	193
Рисунок 3. 5 Бюджет легкой аравийской нефти в Сценарии №1	195
Рисунок 3. 6 Скорость эмульгирования сценария №1	195
Рисунок 3. 7 Моделирование траектории сценария №2, зеленые стрелки представляют направление ветра, а большая синяя точка представляет местоположение разлива.....	196
Рисунок 3. 8 Бюджет легкой аравийской нефти в Сценарии №2.....	198
Рисунок 3. 9 Скорость эмульгирования сценария №2	198
Рисунок 4. 1 Карта Суэцкого залива, показывающая гипотетическое место разлива нефти в виде большой красной точки у порта Айн-Сухна	203
Рисунок 4. 2 Диаграмма розы ветров в исследуемом районе с 2015 по 2020 год	204

Рисунок 4. 3 Карты траекторий движения нефтяного пятна для Сценария №1, длинные красные стрелки представляют скорость и направление ветра, а короткие желтые стрелки - поверхностное течение.....	207
Рисунок 4. 4 Карты траекторий разлива нефти для сценария №2, длинные красные стрелки представляют скорость и направление ветра, а короткие желтые стрелки представляют поверхностный ток.....	209
Рисунок 4. 5 Скорость испарения (%).....	210
Рисунок 4. 6 Содержание эмульсионной воды (%).....	210
Рисунок 4. 7 Коэффициент дисперсии (%).....	211
Рисунок 5. 1 Карта Суэцкого залива, показывающая гипотетический источник разлива нефти в виде большой красной точки у южного входа в Суэцкий канал и порт Зайтят.....	215
Рисунок 5. 2 Интенсивное движение в Суэцком заливе и Суэцком канале, источник морского трафика [201].....	217
Рисунок 5.3 Положение нефтяных частиц для Сценария №1 (переменная скорость и направление ветра и морских течений). Черные точки представляют BGS, а красная точка - MRS). Источник разлива показан большой синей точкой.....	219
Рисунок 5.4 Испарение, выбрасывающиеся на берег, плавание и эмульгирование разлитой нефти в период моделирования сценария №1.	220
Рисунок 5.5 частиц нефти для сценария №2 (постоянная скорость ветра 4 м/с от северо-западного направления). Черные точки представляют BGS, а красная точка представляет MRS). Источник разлива показан в виде большой синей точки.	221

Рисунок 5. 6 Испарение, выбрасываются на берег, плавание и эмульгирование разлитой нефти в течение периода моделирования сценария №2.	222
Рисунок 5. 7 частиц нефти для сценария №3 (постоянная скорость ветра 4 м/с от направления N). Черные точки представляют BGS, а красная точка представляет MRS). Источник разлива показан в виде большой синей точки.....	223
Рисунок 5. 8 Испарение, выброс на берег, плавание и эмульгирование разлитой нефти в течение периода моделирования сценария №3.....	224
Рисунок 5. 9 частиц нефти для сценария 4 (постоянная скорость ветра 4 м/с от северо-восточного направления). Черные точки представляют BGS, а красная точка представляет MRS). Источник разлива показан в виде большой синей точки.....	225
Рисунок 5. 10 Испарение, выбрасывание, плавание и эмульгирование разлитой нефти в период моделирования сценария №4.....	226

Список таблиц

Таблица 1-1 Добыча сырой нефти на шельфе с 2012 по 2021 год [72]	139
Таблица 1-2 Крупные разливы танкеров с 1967 года (расположены в соответствии с объемом разлива) [58].....	142
Таблица 2-1 Характеристики легкой сырой нефти в Аравии (база данных библиотеки нефти ADIOS2)	187
Таблица 3-1 Параметры разлива нефти в исследуемом случае	192
Таблица 3-2 Сценарий №1 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	194
Таблица 3-3 Сценарий №2 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	197
Таблица 4-1 Параметры разлива нефти в тематическом исследовании 2	205
Таблица 4-2 Сценарий №1 Поведение и судьба разлива нефти с течением времени (метрические тонны).....	207
Таблица 4-3 Сценарий №2 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	209
Таблица 5-1 Сценарии моделей GNOME с различными параметрами	218
Таблица 5-2 Сценарий №1 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	220
Таблица 5-3 Сценарий №2 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	222

Таблица 5-4 Сценарий №3 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	224
Таблица 5-5 Сценарий №4 Поведение и судьба разлива нефти со временем (метрические тонны).....	226

Благодарности

Никакие слова не могут объяснить, насколько я благодарен **Аллаху** за то, что он направляет, помогает и благословляет меня во всех аспектах моей жизни.

Я хотел бы выразить искреннюю благодарность доценту кафедры Российского государственного гидрометеорологического университета, кандидату географических наук **Валерию Чанцеву** за его руководство, поддержку, рецензирование рукописей и тезисов конференций, а также ценные комментарии в качестве моего научного руководителя. Его опыт, поддержка и наставничество были неоценимы на протяжении всего моего академического пути и сыграли значительную роль в моем успехе, за то, что он поделился со мной своими знаниями и опытом, за его терпение и понимание, а также за его неустанные усилия, направленные на то, чтобы помочь мне расти как академически, так и лично. Его вклад в мой академический успех никогда не будет забыт, и для меня большая честь, что он был моим научным руководителем.

Данное исследование было бы невозможно без поддержки и гранта [EGY-6549/19] от Главного управления по делам миссий Министерства высшего образования Египта и российского правительства.

Я хотел бы выразить свою благодарность Российскому государственному гидрометеорологическому университету за любезное гостеприимство во время моего пребывания на кафедре океанографии. Я благодарен всем сотрудникам за их любезную помощь и за обучение на нескольких курсах для расширения моих знаний.

Я обязан большой поддержкой, искренней любовью и сердечной благодарностью моей семье (моей матери, жене и моим любимым детям Амани, Мохамеду и Рофану), которые поддерживали меня в трудные времена и оказывали мне всю потенциальную поддержку, необходимую для завершения моего исследования.

Список литературы

1. Keramea P. et al. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges // J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 9, № 2. P. 181.
2. ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation Limited, Oil Tanker Spill Statistics. London, 2011.
3. Robert Perkins. Global oil demand to surpass pre-pandemic levels in 2022 as omicron fears subside: IEA // S&P Global Commodity Insights. 2022.
4. Zabbey N., Olsson G. Conflicts–oil exploration and water // Glob. challenges. Wiley Online Library, 2017. Vol. 1, № 5. P. 1600015.
5. Kakalis N.M.P., Ventikos Y. Robotic swarm concept for efficient oil spill confrontation // J. Hazard. Mater. Elsevier, 2008. Vol. 154, № 1–3. P. 880–887.
6. Mohammadiun S. et al. Intelligent Computational Techniques in Marine Oil Spill Management: A Critical Review // J. Hazard. Mater. Elsevier, 2021. P. 126425.
7. Fingas M. Oil Spills : Causes , Consequences , Prevention , and Countermeasures. 2016. № July 2016. 159–201 p.
8. Singha S. Offshore oil spill detection using synthetic aperture radar. University of Hull, 2014.
9. Kachel M.J. Threats to the marine environment: pollution and physical damage // Part. Sensitive Sea Areas IMO’s Role Prot. Vulnerable Mar. Areas. Springer, 2008. P. 23–36.
10. Gurumoorthi K. et al. Fate of MV Wakashio oil spill off Mauritius coast through modelling and remote sensing observations // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2021. Vol. 172. P. 112892.
11. Escobar H. Mystery oil spill threatens marine sanctuary in Brazil. American Association for the Advancement of Science, 2019.
12. Magris R.A., Giarrizzo T. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2020. Vol. 153. P. 110961.
13. Salomon M., Markus T. Handbook on marine environment protection: Science, impacts and sustainable management. Springer, 2018.
14. Daling P.S., Strom T. Weathering of oils at sea: model/field data comparisons // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 1999. Vol. 5, № 1. P. 63–74.

15. Fingas M.F. The evaporation of oil spills: Development and implementation of new prediction methodology // 2005 Int. Oil Spill Conf. IOSC 2005. 2005. № January 2005. P. 2659–2669.
16. Lončar G., Beg Paklar G., Janeković I. Numerical modelling of oil spills in the area of Kvarner and Rijeka Bay (The Northern Adriatic Sea) // J. Appl. Math. Hindawi, 2012. Vol. 2012.
17. Pradhan B., Das M., Pradhan C. Forecasting oil spill movement through trajectory modeling: a case study from Bay of Bengal, India // Model. Earth Syst. Environ. Springer, 2021. Vol. 7, № 2. P. 1107–1119.
18. Dietrich J.C. et al. Surface trajectories of oil transport along the Northern Coastline of the Gulf of Mexico // Cont. Shelf Res. Elsevier, 2012. Vol. 41. P. 17–47.
19. Mishra A.K., Kumar G.S. Weathering of Oil Spill: Modeling and Analysis // Aquat. Procedia. Elsevier B.V., 2015. Vol. 4, № Icwrcoc. P. 435–442.
20. Olita A. et al. Oil spill hazard and risk assessment for the shorelines of a Mediterranean coastal archipelago // Ocean Coast. Manag. Elsevier, 2012. Vol. 57. P. 44–52.
21. Lee M., Jung J.-Y. Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2015. Vol. 100, № 1. P. 297–303.
22. Saçu Ş., Şen O., Erdik T. A stochastic assessment for oil contamination probability: A case study of the Bosphorus // Ocean Eng. Elsevier, 2021. Vol. 231, № May. P. 1–13.
23. Zelenke B. et al. General NOAA operational modeling environment (GNOME) technical documentation. 2012.
24. Elizaryev A. et al. Numerical simulation of oil spills based on the GNOME and ADIOS // Int. J. Eng. Technol. Science Publishing Corporation Inc, 2018. Vol. 7, № 2. P. 24.
25. Yang Y. et al. Numerical simulation of oil spill in the Gulf of Mexico based on the GNOME and ADIOS // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publ, 2013. Vol. 295. P. 1535–1542.
26. Yapa P.D. et al. How does oil and gas behave when released in deepwater? // J. Hydro-Environment Res. Elsevier, 2012. Vol. 6, № 4. P. 275–285.
27. Chen F., Yapa P.D. A model for simulating deep water oil and gas blowouts-Part II: Comparison of numerical simulations with “Deepspill” field experiments // J. Hydraul. Res. Taylor & Francis, 2003. Vol. 41, № 4. P. 353–365.
28. Reed M., Rye H. A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1995. Vol. 1995, № 1. P. 61–66.

29. Aamo O.M., Reed M., Downing K. Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: sensitivity studies // International Oil spill conference. American Petroleum Institute, 1997. Vol. 1997, № 1. P. 429–438.
30. Spaulding M.L. et al. Application of three-dimensional oil spill model (WOSM/OILMAP) to hindcast the Braer spill // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 1994. Vol. 1, № 1. P. 23–35.
31. Daniel P. et al. Improvement of drift calculation in Mothy operational oil spill prediction system // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 2003. Vol. 2003, № 1. P. 1067–1072.
32. Spaulding M. et al. Application of an integrated blowout model system, OILMAP DEEP, to the Deepwater Horizon (DWH) spill // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2017. Vol. 120, № 1–2. P. 37–50.
33. Crowley D. et al. Modeling atmospheric volatile organic compound concentrations resulting from a deepwater oil well blowout–Mitigation by subsea dispersant injection // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2018. Vol. 136. P. 152–163.
34. McCay D.F. Development and application of damage assessment modeling: example assessment for the North Cape oil spill // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2003. Vol. 47, № 9–12. P. 341–359.
35. McCay D.F., Rowe J.J. Evaluation of bird impacts in historical oil spill cases using the SIMAP oil spill model // Arctic And Marine Oilspill Program Technical Seminar. Citeseer, 2004. Vol. 1. P. 421–452.
36. French-McCay D. et al. Comparative risk assessment of spill response options for a deepwater oil well blowout: Part 1. Oil spill modeling // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2018. Vol. 133. P. 1001–1015.
37. Gros J. et al. Simulating gas–liquid– water partitioning and fluid properties of petroleum under pressure: implications for deep-sea blowouts // Environ. Sci. Technol. ACS Publications, 2016. Vol. 50, № 14. P. 7397–7408.
38. Gros J. et al. Dynamics of live oil droplets and natural gas bubbles in deep water // Environ. Sci. Technol. ACS Publications, 2020. Vol. 54, № 19. P. 11865–11875.
39. Berry A., Dabrowski T., Lyons K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2012. Vol. 64, № 11. P. 2489–2501.
40. De Dominicis M. et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting–Part 1: Theory // Geosci. Model Dev. 2013. Vol. 6, № 6. P. 1851–1869.
41. Röhrs J. et al. The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills // Ocean Sci. Copernicus GmbH, 2018. Vol. 14, № 6. P. 1581–1601.

42. Dagestad K.-F. et al. OpenDrift v1. 0: a generic framework for trajectory modelling // *Geosci. Model Dev. Copernicus GmbH*, 2018. Vol. 11, № 4. P. 1405–1420.
43. Duran R. et al. Simulation of the 2003 foss barge-point wells oil spill: A comparison between BLOM and GNOME oil spill models // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2018. Vol. 6, № 3. P. 104.
44. Farzingohar M., Ibrahim Z.Z., Yasemi Mjjj. Oil spill modeling of diesel and gasoline with GNOME around Rajae Port of Bandar Abbas, Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2011.
45. Cheng Y. et al. SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2011. Vol. 62, № 2. P. 350–363.
46. Huynh B.Q. et al. Public health impacts of an imminent Red Sea oil spill // *Nat. Sustain. Nature Publishing Group*, 2021. Vol. 4, № 12. P. 1084–1091.
47. Beegle-Krause J. General NOAA oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model // *International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute*, 2001. Vol. 2001, № 2. P. 865–871.
48. Prasad S.J. et al. An assessment on oil spill trajectory prediction: Case study on oil spill off Ennore Port // *J. Earth Syst. Sci. Springer*, 2018. Vol. 127, № 8. P. 1–8.
49. Marzooq H., Naser H.A., Elkanzi E.M. Quantifying exposure levels of coastal facilities to oil spills in Bahrain, Arabian Gulf // *Environ. Monit. Assess. Springer*, 2019. Vol. 191, № 3. P. 1–16.
50. Lehr W. et al. Revisions of the ADIOS oil spill model // *Environ. Model. Softw. Elsevier*, 2002. Vol. 17, № 2. P. 189–197.
51. Samuels W.B. et al. Development of a global oil spill modeling system // *Earth Sci. Res. Citeseer*, 2013. Vol. 2, № 2. P. 52.
52. Toz A.C. Modelling oil spill around Bay of Samsun, Turkey, with the use of OILMAP and ADIOS software systems // *Polish Marit. Res.* 2017.
53. Celik M., Topcu Y.I. Use of an ANP to prioritize managerial responsibilities of maritime stakeholders in environmental incidents: An oil spill case // *Transp. Res. Part D Transp. Environ. Elsevier*, 2009. Vol. 14, № 7. P. 502–506.
54. Cakir E., Sevgili C., Fiskin R. An analysis of severity of oil spill caused by vessel accidents // *Transp. Res. Part D Transp. Environ. Elsevier*, 2021. Vol. 90. P. 102662.
55. Ye X. et al. A simulation-based multi-agent particle swarm optimization approach for supporting dynamic decision making in marine oil spill responses // *Ocean Coast. Manag. Elsevier*, 2019. Vol. 172. P. 128–136.

56. Riazi M.R. Oil Spill Occurrence, Simulation, and Behavior. CRC Press, 2021.
57. France-Press A. Diesel tanker sinks off Tunisia risking environmental disaster // The Gardian. 2022.
58. ITOPF. Oil Tanker Spill Statistics 2021 [Electronic resource]. 2021. URL: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/> (accessed: 22.04.2022).
59. Rob Schmitz. The EU will block most Russian oil imports as Hungary's Orbán fights off a total ban [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.npr.org/2022/05/30/1102083611/eu-agree-partial-russian-oil-embargo> (accessed: 03.08.2022).
60. Hanna R.G.M. Oil pollution on the Egyptian Red Sea coast // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 1983. Vol. 14, № 7. P. 268–271.
61. Hussein M.S. Assessment of the vulnerability of environmentally sensitive coasts to a large oil spill: the case of the northern part of the Gulf of Suez // Arab. J. Geosci. Springer, 2021. Vol. 14, № 18. P. 1–15.
62. Nasr P., Smith E. Simulation of oil spills near environmentally sensitive areas in Egyptian coastal waters // Water Environ. J. Wiley Online Library, 2006. Vol. 20, № 1. P. 11–18.
63. Omar M.Y. et al. Oil Spill Modeling at Sidi Kreir SUMED Oil Terminal, Alexandria, Egypt // International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development. Springer, 2019. P. 331–341.
64. Periáñez R. A Lagrangian oil spill transport model for the Red Sea // Ocean Eng. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 217, № April. P. 107953.
65. Omar M.Y. et al. A case study of the Suez Gulf: Modeling of the oil spill behavior in the marine environment // Egypt. J. Aquat. Res. 2021.
66. Toz A.C., Koseoglu B. Trajectory prediction of oil spill with Pisces 2 around Bay of Izmir, Turkey // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2018. Vol. 126. P. 215–227.
67. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Simulating oil spill movement and behavior: a case study from the Gulf of Suez, Egypt // Model. Earth Syst. Environ. Springer, 2022. Vol. 8, № 4. P. 4553–4562.
68. Abdallah I.M., Chantsev V.Y. Modeling marine oil spill trajectory and fate off Hurghada, Red Sea coast, Egypt // Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH), 2022. Vol. 26, № 6. P. 41–61.
69. Abdallah I.M. Chantsev V.Y. Simulation of Oil Spill Trajectory and Fate at the Southern Entrance of the Suez Canal, Red Sea, Egypt // Fundam. Appl. Hydrophys. 2023. Vol. 16, № 1. P. 63–79.

70. Asif M., Muneer T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies // *Renew. Sustain. energy Rev. Elsevier*, 2007. Vol. 11, № 7. P. 1388–1413.
71. Sönnichsen N. Global Oil Production 2021 [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/265203/global-oil-production-since-in-barrels-per-day/> (accessed: 09.10.2022).
72. of Ocean Energy Management. B. Outer Continental Shelf Oil and Gas Production [Electronic resource] // Bureau of Safety and Environmental Enforcement. 2018. P. 2. URL: <https://www.data.bsee.gov/Production/OCSProduction/Default.aspx> (accessed: 08.10.2022).
73. Li P. et al. Offshore oil spill response practices and emerging challenges // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2016. Vol. 110, № 1. P. 6–27.
74. Fingas M. Oil spill science and technology. Gulf professional publishing, 2016.
75. Chen J. et al. Oil spills from global tankers: Status review and future governance // *J. Clean. Prod. Elsevier*, 2019. Vol. 227. P. 20–32.
76. Nelson J.R., Grubestic T.H. Oil spill modeling: computational tools, analytical frameworks, and emerging technologies // *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ. SAGE Publications Sage UK: London, England*, 2019. Vol. 43, № 1. P. 129–143.
77. Chilvers B.L., Morgan K.J., White B.J. Sources and reporting of oil spills and impacts on wildlife 1970–2018 // *Environ. Sci. Pollut. Res. Environmental Science and Pollution Research*, 2021. Vol. 28, № 1. P. 754–762.
78. Zhang H.-Y., Ji Q., Fan Y. What drives the formation of global oil trade patterns? // *Energy Econ. Elsevier*, 2015. Vol. 49. P. 639–648.
79. Fingas M., Brown C. Review of oil spill remote sensing // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2014. Vol. 83, № 1. P. 9–23.
80. Rares S. Ships that changed the law: the Torrey Canyon disaster // *Lloyd’s Marit. Commer. law Q. Informa Law*, 2018. № 3. P. 336–347.
81. Yin L. et al. The long-term prediction of the oil-contaminated water from the Sanchi collision in the East China Sea // *Acta Oceanol. Sin. Springer*, 2018. Vol. 37, № 3. P. 69–72.
82. English E. et al. Estimating the value of lost recreation days from the Deepwater Horizon oil spill // *J. Environ. Econ. Manage. Elsevier*, 2018. Vol. 91. P. 26–45.
83. Li X. et al. A probabilistic framework for risk management and emergency decision-making of marine oil spill accidents // *Process Saf. Environ. Prot. Elsevier*, 2022.
84. Yang C. et al. Fluorous metal–organic frameworks with superior adsorption and hydrophobic

- properties toward oil spill cleanup and hydrocarbon storage // *J. Am. Chem. Soc. ACS Publications*, 2011. Vol. 133, № 45. P. 18094–18097.
85. White H.K. et al. Impact of the Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico // *Proc. Natl. Acad. Sci. National Acad Sciences*, 2012. Vol. 109, № 50. P. 20303–20308.
 86. Huettel M. Oil pollution of beaches // *Curr. Opin. Chem. Eng. Elsevier*, 2022. Vol. 36. P. 100803.
 87. Yang J. et al. Characterization analysis and identification of common marine oil spill types using hyperspectral remote sensing // *Int. J. Remote Sens. Taylor & Francis*, 2020. Vol. 41, № 18. P. 7163–7185.
 88. Nukapothula S. et al. Potential impact of the extensive oil spill on primary productivity in the Red Sea waters // *Cont. Shelf Res. Elsevier Ltd*, 2021. Vol. 222, № April. P. 104437.
 89. Graham W.M. et al. Oil carbon entered the coastal planktonic food web during the Deepwater Horizon oil spill // *Environ. Res. Lett. IOP Publishing*, 2010. Vol. 5, № 4. P. 45301.
 90. Asif Z. et al. Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 10, № 6. P. 762.
 91. Wang Y. et al. Temperature and salinity effects in modeling the trajectory of the 2011 Penglai 19-3 oil spill // *Mar. Georesources Geotechnol. Taylor & Francis*, 2017. Vol. 35, № 7. P. 946–953.
 92. Kakhkashan S. et al. Evaluation of marine sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons along the Karachi coast, Pakistan, 11 years after the Tasman Spirit oil spill // *Chemosphere. Elsevier*, 2019. Vol. 233. P. 652–659.
 93. Michel J. et al. Oil spill response-related injuries on sand beaches: when shoreline treatment extends the impacts beyond the oil // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2017. Vol. 576. P. 203–218.
 94. Bejarano A.C., Michel J. Oil spills and their impacts on sand beach invertebrate communities: A literature review // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2016. Vol. 218. P. 709–722.
 95. Prasad S.J. et al. Simulating the spatial and temporal distribution of oil spill over the coral reef environs along the southeast coast of Mauritius: A case study on MV Wakashio vessel wreckage, August 2020 // *J. Earth Syst. Sci. Springer*, 2022. Vol. 131, № 1. P. 1–10.
 96. Loya Y., Rinkevich B. Effects of oil pollution on coral reef communities // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1980. Vol. 3, № 16. P. 180.
 97. Guzman H.M., Kaiser S., Weil E. Assessing the long-term effects of a catastrophic oil spill on subtidal coral reef communities off the Caribbean coast of Panama (1985–2017) // *Mar. Biodivers. Springer*, 2020. Vol. 50, № 3. P. 1–19.

98. Fragoso ados Santos H. et al. Impact of oil spills on coral reefs can be reduced by bioremediation using probiotic microbiota // *Sci. Rep.* Nature Publishing Group, 2015. Vol. 5, № 1. P. 1–11.
99. Silva D.P. et al. Multi-domain probiotic consortium as an alternative to chemical remediation of oil spills at coral reefs and adjacent sites // *Microbiome*. Springer, 2021. Vol. 9, № 1. P. 1–19.
100. Edwards R., White I. The Sea Empress oil spill: environmental impact and recovery // *International Oil Spill Conference*. American Petroleum Institute, 1999. Vol. 1999, № 1. P. 97–102.
101. Wardlaw G.D. et al. Disentangling oil weathering at a marine seep using GC× GC: Broad metabolic specificity accompanies subsurface petroleum biodegradation // *Environ. Sci. Technol.* ACS Publications, 2008. Vol. 42, № 19. P. 7166–7173.
102. Boehm P.D. et al. Distribution and weathering of crude oil residues on shorelines 18 years after the Exxon Valdez spill // *Environ. Sci. Technol.* ACS Publications, 2008. Vol. 42, № 24. P. 9210–9216.
103. Fingas M. Introduction to Oil Chemistry and Properties // *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. 2015. 51–77 p.
104. Fingas M. Introduction to spill modeling // *Oil spill science and technology*. Elsevier, 2011. № February 2015. P. 187–200.
105. Hook S. et al. *Oil spill monitoring handbook*. Csiro Publishing, 2016.
106. Simecek-Beatty D., Lehr W.J. Extended oil spill spreading with Langmuir circulation // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2017. Vol. 122, № 1–2. P. 226–235.
107. Morales A.D., Rubio E.R., Martínez D.R. Numerical modeling of oil spills in the Gulf of Morrosquillo, Colombian Caribbean // *CT&F-Ciencia, Tecnol. y Futur.* 2022. Vol. 12, № 1. P. 69–83.
108. ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation Technical Information Papers [Electronic resource] // London, UK. 2012. URL: www.itopf.com.
109. Kotzakoulakis K., George S.C. *Advanced Oil Spill Modeling and Simulation Techniques // Oil Spill Occurrence, Simulation, and Behavior*. CRC Press, 2021. P. 225–264.
110. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // *Oil on the Sea*. Springer, 1969. P. 53–63.
111. Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface // *International oil spill conference*. American Petroleum Institute, 1971. Vol. 1971, № 1. P. 463–467.
112. Lardner R., Zodiatis G. Modelling oil plumes from subsurface spills // *Mar. Pollut. Bull.*

- Elsevier, 2017. Vol. 124, № 1. P. 94–101.
113. Fingas M. Handbook of oil spill science and technology. John Wiley & Sons, 2014.
 114. Zafirakou A. Oil spill dispersion forecasting models // Monitoring of marine pollution. IntechOpen London, UK, 2018.
 115. Fingas M.F. A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation // J. Hazard. Mater. Elsevier, 1995. Vol. 42, № 2. P. 157–175.
 116. Fingas M.F. Studies on the Evaporation Regulation Mechanisms of Crude Oil and Petroleum Products // Adv. Chem. Eng. Sci. 2012. Vol. 2, № April. P. 246–256.
 117. Council N.R. Oil in the sea III: inputs, fates, and effects. National Academies Press (US), 2003.
 118. Xie H., Yapa P.D., Nakata K. Modeling emulsification after an oil spill in the sea // J. Mar. Syst. Elsevier, 2007. Vol. 68, № 3–4. P. 489–506.
 119. Horn M. Trajectory and Fate Modelling in Support of the ExxonMobil Eastern Newfoundland Offshore Exploration Drilling Project // RPS South Kingstown, RI, USA. 2018.
 120. Delvigne G.A.L., Sweeney C. Natural dispersion of oil // Oil Chem. Pollut. Elsevier, 1988. Vol. 4, № 4. P. 281–310.
 121. Reed M. et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 1999. Vol. 5, № 1. P. 3–16.
 122. Faksness L.-G., Brandvik P.J. Distribution of water soluble components from Arctic marine oil spills—a combined laboratory and field study // Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier, 2008. Vol. 54, № 2. P. 97–105.
 123. Spaulding M.L. A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling // Oil Chem. Pollut. 1988. Vol. 4, № 1. P. 39–55.
 124. Danchuk S., Willson C.S. Numerical modeling of oil spills in the inland waterways of the lower Mississippi river delta // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 2008. Vol. 2008, № 1. P. 887–891.
 125. Abianeh O.S., Chen C.P. Modelling of evaporation and dissolution of multicomponent oil droplet in shallow water // Adv. Comput. Methods Exp. Heat Transf. 2012. Vol. 12, № 75. P. 231.
 126. Ganjali S.T., Niknafs B.N., Khosravi M. Photooxidation of crude petroleum maltenic fraction in natural simulated conditions and structural elucidation of photoproducts // J. Environ. Heal. Sci. Eng. 2007. Vol. 4, № 1. P. 37–42.

127. Fernández-Varela R. et al. Monitoring photooxidation of the Prestige's oil spill by attenuated total reflectance infrared spectroscopy // *Talanta*. Elsevier, 2006. Vol. 69, № 2. P. 409–417.
128. Lee R.F. Photo-oxidation and photo-toxicity of crude and refined oils // *Spill Sci. Technol. Bull.* Elsevier, 2003. Vol. 8, № 2. P. 157–162.
129. McConkey B.J. et al. Natural sunlight induced photooxidation of naphthalene in aqueous solution // *Water. Air. Soil Pollut.* Springer, 2002. Vol. 136, № 1. P. 347–359.
130. Pérez Calderón L.J. Fate of spilled oil in marine sediments and the effects of chemical dispersant. University of Aberdeen, 2018.
131. Payne J.R., Clayton Jr J.R., Kirstein B.E. Oil/suspended particulate material interactions and sedimentation // *Spill Sci. Technol. Bull.* Elsevier, 2003. Vol. 8, № 2. P. 201–221.
132. Baawain M. et al. Recent progress in desalination, environmental and marine outfall systems // *Recent Prog. Desalination, Environ. Mar. Outfall Syst.* 2015. P. 1–347.
133. Poirier O.A., Thiel G.A. Deposition of free oil by sediments settling in sea water // *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 1941. Vol. 25, № 12. P. 2170–2180.
134. Owens E.H., Lee K. Interaction of oil and mineral fines on shorelines: review and assessment // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2003. Vol. 47, № 9–12. P. 397–405.
135. Lepo J.E. et al. The effect of amount of crude oil on extent of its biodegradation in open water-and sandy beach-laboratory simulations // *Environ. Technol.* Taylor & Francis, 2003. Vol. 24, № 10. P. 1291–1302.
136. Das N., Chandran P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview // *Biotechnol. Res. Int.* Hindawi Limited, 2011. Vol. 2011.
137. McGenity T.J. et al. Marine crude-oil biodegradation: a central role for interspecies interactions // *Aquat. Biosyst.* Springer, 2012. Vol. 8, № 1. P. 1–19.
138. Ławniczak Ł. et al. Microbial degradation of hydrocarbons—basic principles for bioremediation: a review // *Molecules*. MDPI, 2020. Vol. 25, № 4. P. 856.
139. Kostka J.E. et al. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in the deep sea // *Deep Oil Spills*. Springer, 2020. P. 107–124.
140. Socolofsky S.A. et al. The treatment of biodegradation in models of sub-surface oil spills: A review and sensitivity study // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2019. Vol. 143. P. 204–219.
141. Nelson J.R., Grubestic T.H. Oil spill modeling: Mapping the knowledge domain // *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* SAGE Publications Sage UK: London, England, 2020. Vol. 44, № 1. P. 120–136.

142. Remyalekshmi R., Hegde A.V. Numerical modeling of oil spill movement along north-west coast of India using GNOME // *Int. J. Ocean Clim. Syst.* SAGE Publications Sage UK: London, England, 2013. Vol. 4, № 1. P. 75–86.
143. Fingas M. Chapter 8 - Introduction to Spill Modeling / ed. Fingas M.B.T.-O.S.S. and T. (Second E. Boston: Gulf Professional Publishing, 2017. P. 419–453.
144. Zodiatis G. et al. Oil spill forecasting (prediction) // *J. Mar. Res.* Sears Foundation for Marine Research, 2017. Vol. 75, № 6. P. 923–953.
145. Chen H. et al. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout // *Ocean Eng.* Elsevier, 2015. Vol. 110. P. 227–243.
146. Daniel P. et al. Drift modeling of cargo containers // *Spill Sci. Technol. Bull.* Elsevier, 2002. Vol. 7, № 5–6. P. 279–288.
147. Carracedo P. et al. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system // *Mar. Pollut. Bull.* Elsevier, 2006. Vol. 53, № 5–7. P. 350–360.
148. French-McCay D.P. Oil spill impact modeling: Development and validation // *Environ. Toxicol. Chem.* 2004. Vol. 23, № 10. P. 2441–2456.
149. Etkin D.S. et al. Modeling of response, socioeconomic, and natural resource damage costs for hypothetical oil spill scenarios in San Francisco Bay. 2002.
150. Crowley D. et al. Modeling subsurface dispersant applications for response planning and preparation // *International Oil Spill Conference Proceedings.* American Petroleum Institute, 2014. Vol. 2014, № 1. P. 933–948.
151. Yapa P.D., Li Z. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development // *J. Hydraul. Res.* Taylor & Francis, 1997. Vol. 35, № 5. P. 673–688.
152. Reed M. et al. OSCAR2000: a multi-component 3-dimensional oil spill contingency and response model. 2000.
153. Spaulding M.L. et al. OILMAP: A global approach to spill modeling. 1992.
154. Lima J.A. et al. Development of oil spill scenarios for contingency planning along the Brazilian coast // *International Oil Spill Conference.* American Petroleum Institute, 2003. Vol. 2003, № 1. P. 947–953.
155. Belore R. The SL Ross oil spill fate and behavior model: SLROSM // *Spill Sci. Technol. Bull.* 2005.
156. Ju X. et al. Mathematical Physics Modelling and Prediction of Oil Spill Trajectory for a Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) System // *Adv. Math. Phys.* Hindawi, 2022. Vol.

2022.

157. Biglane K.E. A history of major oil spill incidents // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1969. Vol. 1969, № 1. P. 5–6.
158. Liu Z. et al. Research on transport and weathering of oil spills in Jiaozhou Bight, China // Reg. Stud. Mar. Sci. Elsevier, 2022. Vol. 51. P. 102197.
159. Lehr W. et al. A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 1984. Vol. 15, № 9. P. 326–329.
160. Elliott A.J. EUROSPILL: oceanographic processes and NW European shelf databases // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 1991. Vol. 22, № 11. P. 548–553.
161. Beegle-Krause C.J. GNOME: NOAA's next-generation spill trajectory model // Oceans' 99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008). IEEE, 1999. Vol. 3. P. 1262–1266.
162. Buranapratheprat A. Oil spill trajectory model testing in the upper Gulf of Thailand // Proceedings International Workshop on Environmental Sensitivity Index Mapping for Oil Spill in the Southeast Asian Seas. 2000. P. 142–152.
163. Chao X., Shankar N.J., Cheong H.F. Two-and three-dimensional oil spill model for coastal waters // Ocean Eng. Elsevier, 2001. Vol. 28, № 12. P. 1557–1573.
164. Bergueiro J.R. et al. Simulation of oil spills at the Casablanca platform (Tarragona, Spain) under different environmental conditions // J. Marit. Res. 2006. Vol. 3, № 1. P. 55–71.
165. Papadimitrakis J. et al. Simulating the fate of an oil spill near coastal zones: The case of a spill (from a power plant) at the Greek Island of Lesbos // Environ. Model. Softw. Elsevier, 2006. Vol. 21, № 2. P. 170–177.
166. Vethamony P. et al. Trajectory of an oil spill off Goa, eastern Arabian Sea: Field observations and simulations // Environ. Pollut. Elsevier, 2007. Vol. 148, № 2. P. 438–444.
167. Elhakeem A.A., Elshorbagy W., Chebbi R. Oil spill simulation and validation in the Arabian (Persian) Gulf with special reference to the UAE coast // Water. Air. Soil Pollut. Springer, 2007. Vol. 184, № 1. P. 243–254.
168. Díaz B., Pavón A., Gómez-Gesteira M. Use of a probabilistic particle tracking model to simulate the Prestige oil spill // J. Mar. Syst. Elsevier, 2008. Vol. 72, № 1–4. P. 159–166.
169. Guo W.J., Wang Y.X. A numerical oil spill model based on a hybrid method // Mar. Pollut. Bull. Elsevier, 2009. Vol. 58, № 5. P. 726–734.
170. Liao G., Li M. Numerical prediction of oil spill trajectory and fate in pearl river estuary // 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. IEEE,

2010. P. 2153–2157.
171. Liu Y. et al. Trajectory forecast as a rapid response to the Deepwater Horizon oil spill // *Monit. Model. Deep. Horiz. Oil Spill A Rec. Enterp. Geophys. Monogr. Ser.* 2011. Vol. 195. P. 153–165.
 172. Mariano A.J. et al. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill // *Dyn. Atmos. Ocean. Elsevier*, 2011. Vol. 52, № 1–2. P. 322–340.
 173. Cucco A. et al. A high-resolution real-time forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea) // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2012. Vol. 64, № 6. P. 1186–1200.
 174. Quang T.D., Don N.C., Ching C.Y. TRAJECTORY MODELING OF MARINE OIL SPILLS: CASE STUDY OF LACH HUYEN PORT, VIETNAM // *Lowl. Technol. Int. International Association of Lowland Technology*, 2013. Vol. 15, № 2. P. 41–55.
 175. Prabhu K., Kankara R.S. Development of matlab based system to simulate oil spill trajectory using GNOME model for Indian coast. 2014. P. 5–7.
 176. Liu X. et al. Modelling of oil spill trajectory for 2011 Penglai 19-3 coastal drilling field, China // *Appl. Math. Model. Elsevier*, 2015. Vol. 39, № 18. P. 5331–5340.
 177. Toz A.C., Koseoglu B., Sakar C. Numerical modelling of oil spill in New York Bay // *Arch. Environ. Prot.* 2016. Vol. 42, № 4.
 178. Yu F. et al. A hindcast method to simulate oil spill trajectories for the Bohai Sea, Northeast China // *Ocean Eng. Elsevier*, 2016. Vol. 124. P. 363–370.
 179. Lu J. et al. Modelling the transport of oil after a proposed oil spill accident in Barents Sea and its environmental impact on Alke species // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 2017. Vol. 82, № 1. P. 12010.
 180. Li X., Chen G., Zhu H. Modelling and assessment of accidental oil release from damaged subsea pipelines // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2017. Vol. 123, № 1–2. P. 133–141.
 181. Qiao F. et al. Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill // *Sci. Total Environ. Elsevier*, 2019. Vol. 685. P. 856–866.
 182. Soussi A. et al. An oil spill trajectory model: validation in the Mediterranean Sea // 2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE, 2019. P. 1–6.
 183. Zhen Z. et al. Trajectory and weathering of oil spill in Daya bay, the South China sea // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2020. Vol. 267. P. 115562.
 184. Prasad S.J. et al. Oil spill trajectory prediction with high-resolution ocean currents // *J. Oper. Oceanogr. Taylor & Francis*, 2020. Vol. 13, № 2. P. 84–99.

185. Lawan M.S. Oil Spill Trajectory and Fate Modelling at the Bahamas Caribbean: Theoretical Framework // *J. Env. Pollut. Manag.* 2020. Vol. 2. P. 206.
186. Hosseinpour V., Farzingohar M., Kabiri K. Physical Parameters Impact on Oil Spill Trajectory By GNOME Around Siri Island // *J. Environ. Sci. Stud.* 2020. Vol. 5, № 4. P. 3150–3154.
187. Balogun A.-L.L. et al. Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS // *Environ. Pollut. Elsevier*, 2021. Vol. 268. P. 115812.
188. Naz S. et al. Marine oil spill detection using synthetic aperture radar over Indian Ocean // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2021. Vol. 162. P. 111921.
189. Pradhan B., Das M., Pradhan C. Trajectory modelling for hypothetical oil spill in Odisha offshore, India // *J. Earth Syst. Sci. Springer*, 2022. Vol. 131, № 4. P. 1–15.
190. Grubestic T.H., Nelson J.R. Estimating potential oil spill trajectories and coastal impacts from near-shore storage facilities: A case study of FSO Nabarima and the Gulf of Paria // *Int. J. Disaster Risk Reduct. Elsevier*, 2022. Vol. 78. P. 103117.
191. Akinbamini O.E., Anifowose B., Obioma E.C. Oil Spill Modeling for the Mariner Oil Field, East of Shetland, United Kingdom, North Sea // *J. Environ. Eng. American Society of Civil Engineers*, 2022. Vol. 148, № 8. P. 4022037.
192. Rasul N. The Red Sea: The Formation, Morphology, Oceanography and Environment of a Young Ocean Basin // 2015. *springer*, 2015. 1–28 p.
193. Eladawy A. et al. Estimating the Mean Circulation and Water Exchange of the Gulf of Suez-Red Sea via a Validated One-Way Atmospheric-Hydrodynamic Coupled Model // *Earth Syst. Environ. Springer International Publishing*, 2018. Vol. 2, № 2. P. 213–231.
194. Barakat A.O. et al. Application of petroleum hydrocarbon chemical fingerprinting in oil spill investigations—Gulf of Suez, Egypt // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 2002. Vol. 7, № 5–6. P. 229–239.
195. France-Press A. Record Cargo Shipped Through Egypt’s Suez Canal Last Year // *VOAnews*. 2022.
196. Kostianaia E.A. et al. Oil Pollution in the Northern Red Sea: A Threat to the Marine Environment and Tourism Development // *Environ. Remote Sens. Egypt. Springer Nature*, 2020. P. 329–362.
197. Hanna R.G.M. An approach to evaluate the application of the vulnerability index for oil spills in tropical Red Sea environments // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 1995. Vol. 2, № 2–3. P. 171–186.
198. Mittal H.V.R. et al. Hazard assessment of oil spills along the main shipping lane in the Red

Sea // Sci. Rep. Nature Publishing Group, 2021. Vol. 11, № 1. P. 1–14.

199. O'Rourke D., Connolly S. Just oil? The distribution of environmental and social impacts of oil production and consumption // *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. Vol. 28. P. 587–617.
200. Bashat H. Challenges of oil spill response in Egyptian coastal zone overlooking the mediterranean and the red sea // *2005 Int. Oil Spill Conf. IOSC 2005.* 2005. P. 11498–11504.
201. MarineTraffic. Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic [Electronic resource]. 2022. URL: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:32.1/centery:30.4/zoom:8> (accessed: 15.04.2022).
202. Shehadeh M. et al. A study of the behavior of oil spill from an offshore rig in Red Sea region // *North Africa Technical Conference and Exhibition. OnePetro*, 2012.
203. Johansen O. The Halten Bank experiment-observations and model studies of drift and fate of oil in the marine environment // *Proceedings of the 11th Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Techn. Seminar. Environment Canada.* 1984. P. 18–36.
204. Simecek-Beatty D., Lehr W.J. Trajectory modeling of marine oil spills // *Oil spill environmental forensics. Academic Press, Burlington, MA*, 2007. P. 405–418.
205. Lebreton L.C.-M., Franz T. Trajectory analysis of deep sea oil spill scenarios in New Zealand waters // *Greenpeace, New Zealand*, Pg. 2013. Vol. 3.
206. Jones R.K. A simplified pseudo-component oil evaporation model // *Proc. Twent. Arct. Mar. Oilspill Progr. Tech. Semin. Environ. Canada, Emergencies Sci. Div. Ottawa, Canada.* 1997. P. 43–61.
207. Lyman W.J., Reehl W.F., Rosenblatt D.H. Handbook of chemical property estimation methods. Washington, DC (USA); American Chemical Society, 1990.
208. Stiver W., Mackay D. Evaporation Rate of Spills of Hydrocarbons and Petroleum Mixtures // *Environ. Sci. Technol.* 1984. Vol. 18, № 11. P. 834–840.
209. Eley D.D., Hey M.J., Symonds J.D. Emulsions of water in asphaltene-containing oils 1. Droplet size distribution and emulsification rates // *Colloids and surfaces. Elsevier*, 1988. Vol. 32. P. 87–101.
210. Thorpe S.A., Humphries P.N. Bubbles and breaking waves // *Nature. Nature Publishing Group*, 1980. Vol. 283, № 5746. P. 463–465.
211. Holthuijsen L.H., Herbers T.H.C. Statistics of breaking waves observed as whitecaps in the open sea // *J. Phys. Oceanogr.* 1986. Vol. 16, № 2. P. 290–297.
212. Toba Y. et al. Study of the air-sea boundary processes at the Shirahama Oceanographic Tower Station // *Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Ann. B.* 1971. Vol. 14. P. 519–531.

213. Ding L., Farmer D.M. Observations of breaking surface wave statistics // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. Vol. 24, № 6. P. 1368–1387.
214. W. Lehr, Simecek-Beatty D. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms // *Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier*, 2000. Vol. 6, № 3–4. P. 247–253.
215. Wessel P., Smith W.H.F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // *J. Geophys. Res. Solid Earth. Wiley Online Library*, 1996. Vol. 101, № B4. P. 8741–8743.
216. Lea D.J. et al. Assessing a new coupled data assimilation system based on the Met Office coupled atmosphere–land–ocean–sea ice model // *Mon. Weather Rev.* 2015. Vol. 143, № 11. P. 4678–4694.
217. Nour H.E. et al. Assessment of sediment quality using different pollution indicators and statistical analyses, Hurghada area, Red Sea coast, Egypt // *Mar. Pollut. Bull. Elsevier*, 2018. Vol. 133. P. 808–813.
218. Abo-Taleb H. et al. Biodiversity of Calanoida Copepoda in Different Habitats of the North-Western Red Sea (Hurghada Shelf) // *Water. MDPI*, 2020. Vol. 12, № 3. P. 656.
219. Ghallab A. et al. Distribution and Diversity of Living Natural Resources from the Most Northern Red Sea Islands, Egypt: I-Hard and Soft Corals // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH)*, 2020. Vol. 24, № 5. P. 125–145.
220. Independent E. Repeated Red Sea oil spills forces Environment Minister to take action. 2017.
221. Mohamed T.A.A., Mohamed A.M. Some ecological factors affecting coral reef assemblages off Hurghada, Red Sea, Egypt. Alexandria: National Oceanography and Fisheries, 2005.
222. El Saman M.I. Global warming and decadal trends of sea surface temperature in Hurghada, Red Sea, Egypt // *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH)*, 2022. Vol. 26, № 3. P. 247–259.
223. Dhaka A., Chattopadhyay P. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills // *J. Environ. Manage. Elsevier*, 2021. Vol. 288. P. 112428.
224. Dong J. et al. Climate Change Impacts on Coastal and Offshore Petroleum Infrastructure and the Associated Oil Spill Risk: A Review // *J. Mar. Sci. Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 10, № 7. P. 849.
225. Frihy O.E. et al. The role of fringing coral reef in beach protection of Hurghada, Gulf of Suez, Red Sea of Egypt // *Ecol. Eng. Elsevier*, 2004. Vol. 22, № 1. P. 17–25.
226. Keramea P. et al. Operational Modeling of North Aegean Oil Spills Forced by Real-Time

Met-Ocean Forecasts // J. Mar. Sci. Eng. MDPI, 2022. Vol. 10, № 3. P. 411.

227. Yildiz S. et al. Modelling of possible tanker accident oil spills in the Istanbul Strait in order to demonstrate the dispersion and toxic effects of oil pollution // Environ. Monit. Assess. Springer, 2021. Vol. 193, № 8. P. 1–19.
228. Mahdy A. et al. Status of Seagrass community in Northern Protected Islands, Hurghada, Red Sea, Egypt // Aquat. Sci. Fish Resour. Suez University, Faculty of Fish Resources, 2021. Vol. 2. P. 1–8.
229. Das K., Mukherjee A.K. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India // Bioresour. Technol. Elsevier, 2007. Vol. 98, № 7. P. 1339–1345.
230. Pacwa-Płociniczak M. et al. Environmental applications of biosurfactants: recent advances // Int. J. Mol. Sci. Molecular Diversity Preservation International (MDPI), 2011. Vol. 12, № 1. P. 633–654.
231. Dave D., Ghaly A.E. Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis // Am. J. Environ. Sci. Citeseer, 2011. Vol. 7, № 5. P. 423.
232. Fathalla E.M. Degradation of crude oil in the environment: toxicity arising through photochemical oxidation in the aqueous phase. Citeseer, 2007.
233. Hafez R.M., Madney I. Suez Canal Region as an economic hub in Egypt location analysis for the mass real estate appraisal process // HBRC J. Taylor & Francis, 2020. Vol. 16, № 1. P. 59–75.
234. I Khedr A. et al. Water Quality Assessment of the northern part of Suez Gulf (Red Sea, Egypt), using Principal Component Analysis. // Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH), 2019. Vol. 23, № 4. P. 527–538.
235. Bozkurtoğlu Ş.N.E. Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning // Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 123, № 1–2. P. 57–72.
236. Zeinstra-Helfrich M., Murk A.J. Effects of Oil Properties and Slick Thickness on Dispersant Field Effectiveness and Oil Fate // Deep Oil Spills. Springer, 2020. P. 155–169.
237. Suez Canal Authority. About Suez Canal [Electronic resource]. 2019. URL: <https://www.suezcanal.gov.eg/English/About/SuezCanal/Pages/NewSuezCanal.aspx> (accessed: 22.04.2022).
238. Hamed M. et al. Physico-chemical characteristics of Suez Bay water during 2006-2007 // Egypt. J. Aquat. Biol. Fish. The Egyptian Society for the Development of Fisheries and Human Health (ESDFHH), 2010. Vol. 14, № 1. P. 43–57.

239. General Authority for Red Sea Ports. Zytyat port- [Electronic resource]. 2020. URL: <http://www.rspa.gov.eg/port-zytyat.html> (accessed: 25.04.2022).
240. Le Hénaff M. et al. Surface evolution of the Deepwater Horizon oil spill patch: combined effects of circulation and wind-induced drift // Environ. Sci. Technol. ACS Publications, 2012. Vol. 46, № 13. P. 7267–7273.
241. Reed M., Turner C., Odulo A. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories // Spill Sci. Technol. Bull. Elsevier, 1994. Vol. 1, № 2. P. 143–157.
242. Kim T.-H. et al. Analysis of the contribution of wind drift factor to oil slick movement under strong tidal condition: Hebei Spirit oil spill case // PLoS One. Public Library of Science San Francisco, USA, 2014. Vol. 9, № 1. P. e87393.
243. Lee K.-H., Kim T.-G., Cho Y.-H. Influence of Tidal Current, Wind, and Wave in Hebei Spirit Oil Spill Modeling // J. Mar. Sci. Eng. MDPI, 2020. Vol. 8, № 2. P. 69.
244. Authority E.M. Climatic Atlas of Egypt: Cairo // Egypt, Egypt. Meteorol. Authority, Minist. Transp. Commun. 1996.
245. Abdallah A. Monitoring Environmental Changes in El-Ain El-Sokhna Area, Gulf of Suez, Egypt // Nine conference for geographical and GIS Department, Faculty of Arts, Alexandria University. 2007.