

## Физико-биологические условия для проектирования защитной одежды от охлаждения человека на воздухе и воде

*И. В. Черунова, Т. Ю. Лесникова*

*Донской государственный технический университет, г. Шахты, Россия*

**Аннотация:** В статье представлено обоснование и системный анализ для проектирования защитной одежды от холода, основным средством расчета и оценки конструкции которой является математическое моделирование. Представлены сведения о современных способах защиты человека от воздействия низкой температуры, сформированы отличия условий охлаждения человека в разных физических средах. На основе сформированного анализа данных о физиологических особенностях системы «Человек-Одежда-Среда» установлено воздействие на человека низких температур, которое приводит в действие систему терморегуляции. Представленные данные приводят к ограниченному уравновешиванию тепловых характеристик тела человека и равномерности тепловых потоков, направленных от человека в окружающую среду. Основываясь на факте различия в формировании различных режимов охлаждения и теплового баланса человека воздушной и водной холодных сред, формируется обоснование математических моделей для таких систем.

**Ключевые слова:** теплозащитная одежда, проектирование, моделирование, физико-биологические особенности человека, одежда в воде, охлаждение человека.

Человек в силу климатических и производственных причин вынужден жить и работать в условиях холода [1]. Это могут быть бытовые и профессиональные условия, в которых человек должен находиться длительное время. Существуют некомфортные температурные условия в закрытых помещениях [2]. Такой тип охлаждения может быть компенсирован с помощью внешних систем отопления [3], которые не имеют прямого сопряжения с человеком. В открытом холодном пространстве тепловой баланс человека ограничен собственной автономной системой. Она зависит частично от биологических возможностей его адаптации к холоду [4]. Однако риски охлаждения имеют большое влияние на здоровье. Современные исследования показали [5], что для различных групп населения в разных регионах наблюдается зависимость роста сердечных заболеваний от холода. При этом экономические интересы ряда европейских стран

---

направлены на освоение Арктического региона. Он может превратиться в крупнейший в Европе район инвестиций. Только в Баренцевом регионе планируется около 140 млрд. евро инвестиций [4]. Такие перспективы делают вопрос безопасности жизни человека в холоде особенно важным. Однако человек имеет два средства защиты от открытого холода: биологическую терморегуляцию и защитную одежду [6]. Тип и конструкция защитной одежды от холода определяется условиями её применения. Воздействие холода на человека может быть сформировано на воздухе и в воде. Безопасное пребывание человека в воде имеет большое значение для развития дайвинга [4], особенно в профессиональной деятельности. Согласно данным результатов совместных исследований Министерства инфраструктуры и окружающей среды вместе с Министерством экономики в Гааге о долгосрочном потенциале морских и прибрежных районов установлено, что программа развития и освоения территорий северных морей до 2050 года включает активное участие в мероприятиях дайверов разного класса [6]. Условия охлаждения человека в разных физических средах имеют как сходства, так и существенные различия. Более низкие температуры охлаждения характерны для воздушной среды. Основную защиту от конвективного холода человеку обеспечивает многослойная одежда [7]. Многочисленные исследования подчеркивают, что многослойные конструкции одежды могут быть громоздкими и неудобными [7]. Это влияет на производительность труда человека и увеличение их мышечного напряжения и нагрузки. Производительность и безопасность людей в Арктике может быть улучшена путем разработки новой высокотехнологичной одежды [6]. Это возможно при использовании передовых технологий адаптации температуры и влаги, изоляции и интеграции датчиков, которые могут обнаруживать критические уровни холодового стресса и комфорта [6,8]. При этом свойства защитной одежды от

---

конвективного холода имеют относительно стабильные показатели в связи меньшей влажностью системы по сравнению с одеждой в воде. Поэтому в одежде для защиты от холодного воздуха эффективно применяются дополнительные источники искусственного обогрева [9]. Однако их эффективность зависит от многих параметров в системе теплообмена человека со средой [10]. Для получения эффективной тепловой защиты человека необходимо установить требуемые характеристики мощности и площади нагреваемых деталей одежды. Однако условия эксплуатации одежды в охлаждающей среде связаны не только с тепловым воздействием, но и с деформацией самой одежды, что рассматривается в ряде научных работ [11]. В частности, под давление ветра или воды. Эти изменения необходимо учитывать при расчетах параметров конструкции защитной одежды и толщины ее материалов. Обозначенные задачи имеют большое значение для создания высокого уровня и надежности тепловой защиты человека. Для решения поставленных задач эффективным средством является использование численного моделирования. Сложность и специфика моделирования биотехнических систем заключается в том, что каждый компонент имеет собственную структуру и характеризуется большим количеством факторов [12].

Несмотря на большое многообразие современной одежды для защиты от холода, эффективность ее теплового эффекта остается в большой зависимости от правильного учета физиологии человека, свойств материалов и их изменений во время эксплуатации, а также от применения дополнительных искусственных средств терморегуляции [3].

Охлаждение организма в процессе производственной деятельности приводит к снижению работоспособности человек. Это может быть вызвано недостаточными или избыточными теплоизолирующими свойствами одежды

---

[11]. Анализ строения и биологических особенностей человека [13] позволил установить общую систему взаимодействия компонентов системы.

Для поддержки здоровья, хорошего самочувствия и высокой работоспособности требуется обеспечение температурной стабильности (гомеостаза) организма [14]. Нарушение температурного гомеостаза является следствием нарушения теплового баланса. Это приводит к напряжению механизмов терморегуляции и может оказывать существенное влияние на состояние различных функциональных систем человека (сердечно-сосудистой, нервной, дыхательной, эндокринной и др.) [15]. Определенная доля в поддержании теплового баланса принадлежит естественной физиологической терморегуляции. Она частично компенсирует воздействие неблагоприятных внешних температур. К таким механизмам можно отнести реакцию возникновения «гусиной кожи» при переохлаждении, сужение сосудов [16]. В холодной среде небольшое снижение потерь тепла тела человека происходит за счет уменьшения градиента температуры между поверхностью тела и среды. Это происходит в результате охлаждения рецепторов кожи, спазмов кровеносных сосудов и увеличения термического сопротивления тканей организма. С течением времени постепенно происходит адаптация организма человека к пониженным температурам, но выполнение физической работы препятствует этому процессу акклиматизации [17]. Эти ресурсы человека имеют ограничения ресурсов. Низкие температуры окружающей среды оказывают влияние и на функционирование внутренних органов. Тепловое состояние человека различают как оптимальное, допустимое, предельно допустимое и недопустимое [10]. В условиях холода у человека может развиваться максимальное допустимое тепловое состояние, которое угрожает ему замерзанием и потерей жизненных функций [17]. Показатели теплового состояния человека определяются с учетом затрат энергии при конкретном

---

виде деятельности. К показателям теплового состояния человека относятся следующие [13]: температура ректальная; средневзвешенная температура кожи; средняя температура тела; изменение теплосодержания; увеличение частоты ударов сердечных сокращений в минуту; влагопотери; теплоощущения; разность между температурой кожи груди и стопы. Температура кожи наиболее тесно связана с теплоощущениями человека и может служить информативным показателем о его тепловом состоянии [13,14,16]. На каждом квадратном миллиметре кожи имеется примерно 15 рецепторов, воспринимающих холод, один – реагирующий на тепло [13]. Их число значительно изменяется в зависимости от части тела человека. На туловище их заметно больше, чем на конечностях [14,15]. Через кожу температурный поток попадает внутрь и воздействует на организм человека, который адаптирован к работе в определенной температурной норме (в состоянии теплового баланса) [11]:

$$M + R = Q_{RAD} + Q_{CONV} + Q_{COND} + Q_{EVAP} + Q_{RESP} + L \pm D, \quad (1)$$

где  $M$  – энергетические затраты человека, Вт;  $R$  – внешняя тепловая нагрузка (солнечная радиация), Вт;  $Q_{RAD}$  – потери тепла радиацией;  $Q_{CONV}$  – потери тепла конвекцией, Вт;  $Q_{EVAP}$  – потери тепла испарением влаги, Вт;  $Q_{COND}$  – потери тепла кондукцией, Вт;  $Q_{RESP}$  – потери тепла вследствие нагревания вдыхаемого воздуха, Вт;  $D$  – дефицит или накопление тепла в организме, Вт;  $L$  – затраты тепла на механическую работу, Вт.

Теплоотдача из организма человека осуществляется в основном через кожу (83%) и слизистые оболочки, а регулируется за счет изменения циркуляции крови и изменения интенсивности потоотделения.

В зависимости от вида отдачи тепла организмом в состоянии покоя (при температуре среды около 20°C) теплоотдача в процентном отношении распределяется следующим образом: конвекция - 31,0%, излучение

(радиация) - 43,74%, испарение - 21,71%, нагревание пищи - 1,55%, нагревание воздуха в легких - 1,30%, потеря тепла с выделениями - 0,70% [13]. Потери тепла теплопроводностью описываются законом Фурье [18]. Потери тепла конвекцией осуществляются путем передачи тепла поверхностью тела или одежды человека движущемуся около него воздуху, что составляет около 25-30% общих теплотерь. Потеря тепла излучением многогранно исследована учеными [13,14 и другие] и имеет обратный процесс – поглощение лучистой энергии. Коэффициент испарения зависит от теплозащитных свойств одежды и скорости движения окружающего воздуха [18]. Однако охлаждение человека может быть вызвано не только холодным воздухом, но и холодной водой. При нахождении в водной среде на организм человека действуют особые факторы: давление и температура воды [19].

Условия погружения в воду связаны с пребыванием в необычной для человека окружающей среде. Наибольшая нагрузка на организм при нахождении человека под водой идет на систему дыхания и терморегуляцию организма [20]. Физические свойства воды отличаются от свойств воздушной среды. Плотность воды в 775 раз больше плотности воздуха, теплоемкость в 4 раза, теплопроводность в 25 раз больше, чем у воздуха. На различных глубинах вода имеет различную температуру. Обмен тепла между поверхностными и глубинными слоями воды происходит медленнее, чем в воздушной среде. Нагревается вода морей и океанов за счет солнечной энергии. Верхний слой воды толщиной 1 см поглощает 94% солнечного тепла. Плотность чистой воды без соли при 0°C при атмосферном давлении составляет 1000 кг/м<sup>3</sup>. В открытом океане диапазоны плотности примерно от 1021 кг/м<sup>3</sup> (у поверхности моря) до 1070 кг/м<sup>3</sup> (при давлении из 10,000 dBar), (Рис.1) [21].

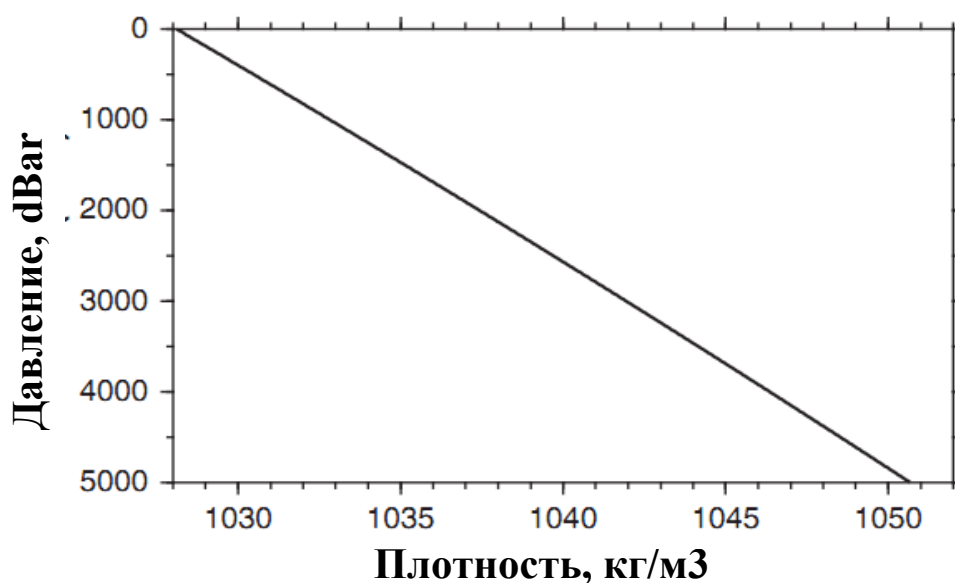


Рис. 1 - Возрастание плотности при давлении на участок воды, температурой  $0^{\circ}\text{C}$  и соленостью 0,35 на поверхности моря [21].

На терморегуляцию организма в водной среде помимо температуры воды значительную роль оказывает неравномерное давление столба воды на отдельные части тела, особенно в вертикальном положении. В первую очередь это сказывается на кровообращении и дыхании. Если при охлаждении в воздушной среде скрытый период терморегуляции происходит в течение 30-40 мин., то в воде он не превышает 2-3 мин.

Критическая точка повышения теплопродукции в воде определяется при более высокой температуре среды ( $34-35^{\circ}\text{C}$ ) вместо  $28-29^{\circ}\text{C}$  на воздухе. Вода является лучшим проводником тепла, чем воздух. При экстремальном воздействии холодной воды (температура ниже  $20^{\circ}\text{C}$ ) для выживания, происходит ступенями увеличение скорости обмена веществ, благодаря холодным рецепторам в коже [19]. Движение человека в воде увеличивает потерю тепла через кожу.

Когда температура воды опускается ниже  $12^{\circ}\text{C}$  в организме человека наблюдается полная неспособность плавать и невозможность оставаться в воде дольше, чем 1 час [19]. Проводя анализ этих данных, следует отметить,

что диапазон возможностей терморегуляции человека очень ограничен и колеблется в пределах допустимого отклонения температуры тела лишь на  $1^{\circ}\text{C}$ , а влияние внешних температурных воздействий очень велико [13,14]. Анализ представленных данных о физиологических особенностях системы «Человек-Одежда-Среда» при воздействии на неё тепловых потоков различного характера позволил выявить следующее: воздействие на человека низких температур приводит в действие систему терморегуляции. Она активно поддерживается физиологическими и химическими процессами, усиливается собственная теплопродукция человека и скорость кровотока. Это приводит к ограниченному уравниванию тепловых характеристик тела человека и равномерности тепловых потоков, направленных от человека в окружающую среду.

Важную роль в спасении людей, попавших в воду, является их экипировка. При этом при попадании человека в воду меняется полностью вся система его жизнедеятельности, которая была предусмотрена на воздухе, что представлено в разработанных схемах ниже (Рис. 2, 3).

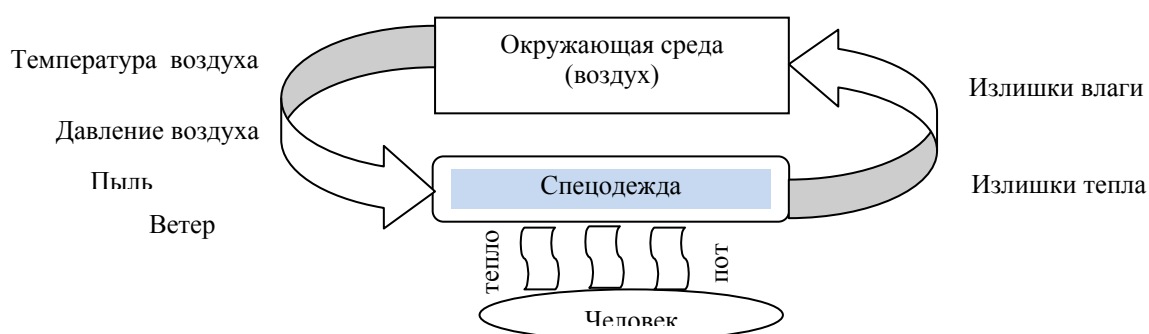


Рис. 2. – Система взаимосвязи факторов охлаждающей воздушной среды и одежды с человеком



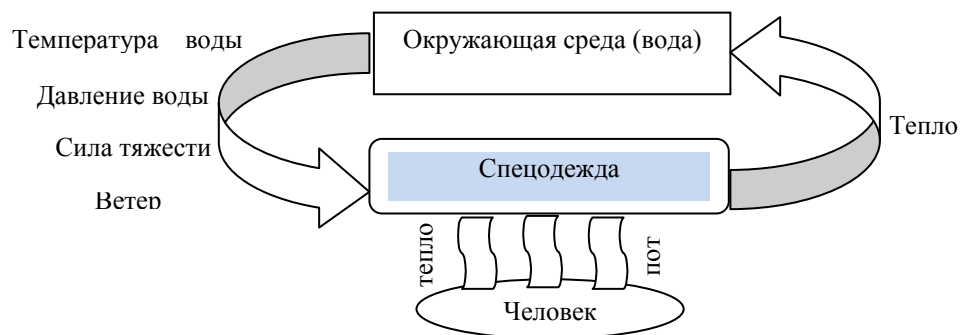


Рис. 3 – Система взаимосвязи факторов водной среды и одежды с человеком.

Для проектирования защитной одежды от холода основным средством расчета и оценки конструкции является математическое моделирование [11]. Сложность представленной биотехнической системы в части работы организма человека требует специальных подходов и ограничений.

Учитывая, что воздушная и водная холодная среда формируют разные режимы охлаждения и теплового баланса человека, математические модели для таких систем имеют свои особенности.

### Литература

1. Талыбов М.А., Сафаров Д.Т, Черунова И.В., Сирота Е.Н., Колесник С.А. Экспериментальные исследования для развития информационной базы минеральных вод материалы // Инженерный вестник Дона, 2014, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2536](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2536).
2. Cherunova I., S. Samarbakhsh and N. Kornev, 2016. CFD simulation of thermo- aerodynamic interaction in a system human cloth-environment under very low temperature and wind conditions. Proc. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, Greece, 5-10 June 2016. – Volume IV. - pp. 7703-7710.
3. Сирота Е.Н. Развитие технологий проектирования гидрокостюмов // Инженерный вестник Дона, 2016, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3696](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3696).



4. Ryti, N.R.I., Y. Guo and J.J.K. Jaakkola, 2016. A Systematic Review and Meta-Analysis. Environmental Health Perspectives. Global Association of Cold Spells and Adverse Health Effects, 124(1): pp.12-22.
  5. Lipponen P. 2015, Strategic Vision for the North: Finland's prospects for economic growth in the Arctic region. Confederation of Finnish Industries EK, Helsinki: p. 48
  6. Черунова И. В. Оптимизация параметров защитной одежды для защиты от холода // Дизайн и технологии. 2009. №11. С. 62-67.
  7. Jussila K. 2016. Clothing Physiological Properties of Cold Protective Clothing and Their Effects on Human Experience. Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology. Tampere University of Technology: pp.171
  8. Wang F., C.Gao, K.Kuklane and I.Holmér, 2010. A Review of Technology of Personal Heating Garments. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), 16(3): pp.387–404.
  9. Черунова И. В. Люди. Одежда. Окружающая среда // Охрана труда и социальное страхование. 2008. №6. С. 101-104.
  10. Kuklane K., I.Holmér , 2000. Ergonomics of Protective Clothing. Proceedings of 1st European Conference on Protective Clothing. National Institute for Working Life: p. 323
  11. Черунова И. В., Галузо Ю. А., Куренова И. В. Аспекты математических моделей теплового обмена с телом человека // Современные наукоемкие технологии. 2013. №8-1. С. 30-31.
  12. Holmér I. and K.Kuklane, 1998. Problems with cold work. Proceedings from an international symposium held in Stockholm, Sweden, November 16–20, Arbetslivsinstitutet & författarn: p. 282
  13. Zakharov V. M. and I. E. Trofimov, 2014. Homeostatic mechanisms of biological systems: Development homeostasis. Russian Journal of Developmental Biology, 45(Issue 3): pp. 105–116.
-

14. Schellen L. 2010. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition. *Indoor Air*, 20(4): pp. 273-283.
15. Lehmuskallio E .2001. Cold protecting emollients and frostbite. Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Medicine, University of Oulu, National Defence College in Santahamina, Helsinki: p. 96
16. Manto M. 2014. Abnormal Copper Homeostasis: Mechanisms and Roles in Neurodegeneration. *Toxics*, issue 2: pp. 27-345.
17. Leonard W.R. 2010. Measuring human energy expenditure and metabolic function: Basic principles and methods Article in *Journal of anthropological sciences*. *Journal of Anthropological Science*, 88: pp. 221-230.
18. ALEXIOU S. 2014. The effect of water temperature on the human body and the swimming effort *Journal Biology of Exercise*, 10 (2): pp. 9-23.
19. Kurazumi, Y., L.Rezgals and A. K. Melikov. 2014. Convective Heat Transfer Coefficients of the Human Body under Forced Convection from Ceiling. *Journal of Ergonomics*. 4(1): pp. 7-11.
20. Aguilera-Arzo M., A.Alcaraz and V.M. Aguilera, 2003. Heat loss and hypothermia in free diving: Estimation of survival time under water. *Journal of Physics*, 71(4): pp. 333-337.
21. Talley, L., G. Pickard, W. Emery and J. Swift, 2011. *Physical Properties of Seawater*. *Descriptive Physical Oceanography*, Academic Press, pp: 29.

### References

1. Talybov M.A., Safarov D.T, Cherunova I.V., Sirota E.N., Kolesnik S.A. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2014, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2536](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2536).

2. Cherunova I., S. Samarbakhsh and N. Kornev, 2016. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, Greece, 5-10 June 2016, Volume IV: pp. 7703-7710.
  3. Sirota E.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3696](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3696).
  4. Rytö, N.R.I., Y. Guo and J.J.K. Jaakkola, 2016. Global Association of Cold Spells and Adverse Health Effects, 124(1): pp.12-22.
  5. Lipponen P. 2015, Confederation of Finnish Industries EK, Helsinki: p. 48
  6. Cherunova I. V. Dizayn i tekhnologii. 2009. №11. pp. 62-67.
  7. Jussila K. 2016. Clothing Physiological Properties of Cold Protective Clothing and Their Effects on Human Experience. Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology. Tampere University of Technology: pp.171
  8. Wang F., C.Gao, K.Kuklane and I.Holmér, 2010. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), 16(3): pp.387–404.
  9. Cherunova I. V. Lyudi. Okhrana truda i sotsial'noe strakhovanie. 2008. №6. pp.101-104.
  10. Kuklane K., I.Holmér, 2000. Ergonomics of Protective Clothing. Proceedings of 1st European Conference on Protective Clothing. National Institute for Working Life: p. 323
  11. Cherunova I. V., Galuzo Yu. A., Kurenova I. V. Modern high technologies. 2013. №8-1. pp.30-31.
  12. Holmér I. and K.Kuklane, 1998. Problems with cold work. Proceedings from an international symposium held in Stockholm, Sweden, November 16–20, Arbetslivsinstitutet & författarna: p. 282
  13. Zakharov V. M. and I. E. Trofimov, 2014. Russian Journal of Developmental Biology, 45(Issue 3): pp. 105–116.
  14. Schellen L. 2010. Indoor Air, 20(4): pp. 273-283.
-



15. Lehmuskallio E .2001. Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Medicine, University of Oulu, National Defence College in Santahamina, Helsinki: p. 96
16. Manto M. 2014. Abnormal Copper Homeostasis: Mechanisms and Roles in Neurodegeneration. Toxics, issue 2: pp. 27-345.
17. Leonard W.R. 2010. Journal of Anthropological Science, 88: pp. 221-230.
18. Alexiou S. 2014. Journal Biology of Exercise. 10 (2): pp. 9-23.
19. Kurazumi, Y., L.Rezgals and A. K. Melikov. 2014. Journal of Ergonomics. 4(1): pp. 7-11.
20. Aguilera-Arzo M., A.Alcaraz and V.M. Aguilera, 2003. Journal of Physics, 71(4): pp. 333-337.
21. Talley, L., G. Pickard, W. Emery and J. Swift, 2011. Descriptive Physical Oceanography, Academic Press, pp: 29.