

ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA

DINAMICHE DELLA COPERTURA GLACIALE ARTICA E ROTTE DI NAVIGAZIONE

STUDIO SULLA REGIONE ARTICA

L. Dianti, M. Guideri, R. Ivaldi, L. Papa



GENOVA 2015

ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA

DINAMICHE DELLA COPERTURA GLACIALE ARTICA E ROTTE DI NAVIGAZIONE

STUDIO SULLA REGIONE ARTICA

L. Dianti, M. Guideri, R. Ivaldi, L. Papa



GENOVA 2015

© Copyright, I.I.M. Genova 2015
Istituto Idrografico della Marina
Passo Osservatorio, 4 – 16135 Genova
Tel. 010 24431 Telefax: 010 261400
e-mail: maridrografico.genova@marina.difesa.it
sito web: www.marina.difesa.it

“Questo documento contiene dati protetti da Copyright. Qualsiasi riproduzione o adattamento in qualsiasi forma, anche parziale, ivi comprese elaborazioni numeriche o fotocopie, è vietata senza una preventiva autorizzazione scritta da parte dell'Istituto Idrografico della Marina.”

Stampato dall'Istituto Idrografico della Marina – Ufficio Editoriale – Novembre 2015

Indice

Introduzione	pag.	5
1. Premessa	“	7
2. Situazione pregressa e attuale delle dinamiche dei ghiacci artici	“	9
3. Scenari futuri della copertura glaciale e rotte artiche	“	26
4. Cenni sugli aspetti economici e geostrategici	“	32
Bibliografia	“	37

Introduzione

Lo studio fornisce una recente panoramica della dinamica della copertura glaciale artica in relazione allo sviluppo di nuove rotte di navigazione, con l'obiettivo di fornire uno strumento di conoscenza di base in una regione sempre più oggetto di interessi socio-economico a livello planetario.

Filo conduttore è il ghiaccio della banchisa artica secondo diversi punti di vista, da quello geografico, idrografico, oceanografico, dinamico, fino alla proiezione di scenari futuri con vaste aree libere dai ghiacci e aperte alle nuove rotte marittime.

Lo studio si inserisce nella crescente sensibilità verso i cambiamenti "ambientali", in linea con la conoscenza e la necessità di sviluppare strumenti che possano migliorare e mantenere in equilibrio ambiti molto fragili, caratterizzati da elevato dinamismo.

Elemento cardine dello studio è rappresentato dal clima con tutte le forzanti naturali e antropiche. Sempre più importante è, infatti, la consapevolezza di dover accelerare o decelerare su alcuni fattori per poter seguire in modo armonico questi cambiamenti che fanno parte di una ciclicità naturale. Laddove la natura è preponderante per caratteri geografici e climatici come nelle aree polari, è ormai diffuso che queste siano settori chiave per le variazioni climatiche globali. In Artico, infatti, le variazioni climatiche sono più rapide e più evidenti rispetto al resto del mondo: il riscaldamento ha un tasso che è quasi due volte quello della media globale, con forti influenze su sviluppo economico e sfruttamento delle risorse.

Elemento predominante della regione che circonda il Polo Nord è l'Oceano Artico, il più piccolo oceano del mondo caratterizzato da un'area pari a circa 15 milioni di chilometri quadrati, limitato da continenti e con una copertura glaciale permanente. L'Oceano Artico per posizione, caratteri fisiografici e natura del fondale, ricopre un ruolo chiave da un punto di vista sia oceanografico, sia climatico che geostrategico. L'Idrografia e lo sviluppo tecnologico, unitamente ad una limitata copertura glaciale, hanno dato nell'ultimo decennio un grande contributo nella conoscenza sia del bacino, sia dello sviluppo di modelli sempre più risolutivi per usi non solo strettamente connessi alle dinamiche ambientali, alla sicurezza della navigazione, ma anche ad aspetti geopolitici, con rivendicazioni territoriali da poco riformulate da parte di alcuni Stati della regione.

In sintesi, il progresso tecnologico è catalizzatore della conoscenza ormai consolidata sul concetto di Artico quale "motore di processi globali". Il contributo dello studio delle dinamiche della copertura glaciale degli ultimi decenni e il suo monitoraggio sono fondamentali per il ruolo di primo piano che la regione artica ha nello sfruttamento delle risorse connesso ai cambiamenti climatici. È quindi evidente quanto siano attuali le conoscenze dell'Artico e come, in uno scenario dove la presenza di ghiaccio resta preponderante, si affacci un profilo sempre più ricorrente di rotte commerciali di navigazione accessibili, seppur per limitati periodi.

IL DIRETTORE
Luigi SINAPI



Figura 1. regione artica (www.geology.com).

1. Premessa

Le regioni polari sono molto sensibili ai cambiamenti climatici. Dal punto di vista oceanografico l'Artico mostra nelle ultime decadi un aumento di temperatura quasi doppio rispetto al resto del globo, una dinamica climatica del ghiaccio marino significativamente variabile e uno scioglimento della calotta glaciale in Groenlandia preoccupante. Infatti, recentemente l'estensione del ghiaccio artico presenta andamenti negativi per tutti i mesi, più debole in inverno e più forte in settembre, la fine della stagione dello scioglimento. La tendenza alla diminuzione della copertura in settembre ha avuto un incremento di velocità negli ultimi dieci anni. Dal 1979 al 2001, il trend lineare nell'estensione del ghiaccio in settembre ricavata dalle osservazioni satellitari si attesta a -7.0% ogni decennio. Compreso il 2013, il dato rilevato è due volte più grande, arrivando a -14.0% al decennio, e le sette minori estensioni settembrine si sono tutte verificate negli ultimi anni, con il minimo storico registrato nel 2007 e l'11 settembre 2015 il quarto minimo.

La diminuzione dell'estensione spaziale della copertura di ghiaccio è stata accompagnata da forti riduzioni di spessore del ghiaccio, che sono spiegate principalmente dalle variazioni nella copertura dell'oceano di ghiaccio pluriennale (MYI – *Multi Year Ice*)¹. A metà degli anni '80, il ghiaccio pluriennale rappresentava il 70% della totale estensione della copertura glaciale durante il periodo invernale, mentre alla fine del 2012 era sceso a meno del 20%. Dato che il ghiaccio stagionale ha sostituito il ghiaccio pluriennale come tipo di ghiaccio dominante, l'Oceano Artico è diventato più vulnerabile ad eventi climatici che potrebbero innescare un *feedback* che ha il potenziale per promuovere una rapida transizione verso uno stato stagionale con un Artico libero dai ghiacci.

Appare chiaro come, nei prossimi decenni, l'Oceano Artico diventerà sempre più accessibile e più largamente utilizzato dalle nazioni artiche e non-artiche per la presenza di rotte commerciali e di abbondanti risorse naturali. A causa della significativa riduzione del ghiaccio, aree precedentemente non raggiungibili hanno iniziato ad essere utilizzate per scopi marittimi. Il previsto incremento delle attività legate allo sfruttamento di giacimenti di petrolio e gas naturale, alla pesca, al turismo e all'estrazione mineraria possono alterare l'importanza strategica della regione a causa degli investimenti e degli accresciuti interessi delle nazioni artiche e non-artiche.

Per stimare correttamente la risposta delle regioni artiche ai cambiamenti in atto e riuscire a formulare correttamente una previsione delle evoluzioni nei diversi scenari è indispensabile una adeguata comprensione delle retroazioni fra Artico e clima globale. Per far questo occorre correlare le osservazioni presenti con le osservazioni del passato. È necessario utilizzare modelli numerici dalle dinamiche consolidate e adeguatamente parametrizzate. Data la complessità del problema e della vasta letteratura internazionale, vengono presentati sinteticamente i caratteri fisici (idrografici, geologici e oceanografici) che condizionano la dinamica della copertura di ghiaccio sull'Oceano Artico, le possibili rotte artiche, e alcuni aspetti geostrategici, senza scendere nel dettaglio di caratteri fisico-scientifici specifici. A tal fine questo studio si sviluppa idealmente su 8 argomenti di riferimento contenuti nei 4 capitoli: un inquadramento generale, contenuto nella premessa, lo stato

¹ Ghiaccio marino pluriennale spesso 3 o più metri che ha un'età di almeno due periodi estivi; il *First Year Ice* (ghiaccio stagionale) è invece un ghiaccio sviluppatosi per non più di un inverno con uno spessore da 30 cm a 2 m (<http://seaiceatlas.snap.uaf.edu/glossary>).

dell'arte dei fondali marini e le coperture sedimentarie, la circolazione marina, e il ghiaccio marino, contenuti nel capitolo 2, la dinamica della copertura glaciale e le rotte artiche nel capitolo 3, e infine alcune considerazioni sui fattori economici e geostrategici derivanti anche dal Diritto del Mare (UNCLOS), capitolo 4.

La regione di studio è definita nei suoi limiti dalla pubblicazione *IHO S23 (1986)* e comprende l'Oceano Artico e i mari costituenti: Greenland Sea, Barents Sea, White Sea, Kara Sea, Laptev Sea, East Siberian Sea, Chukchi Sea, Beaufort Sea, Lincoln Sea, Hudson Bay, Hudson Strait, Baffin Bay, Davis Strait, Iceland Sea, Norwegian Sea e North Western Passages (Figg. 1 e 8). L'Oceano Artico è in collegamento con gli altri oceani attraverso lo Stretto di Bering con il Pacifico e lo Stretto di Fram, tra la Groenlandia nordorientale e le Isole Svalbard, con l'Atlantico (Figg. 1 e 3). L'Oceano Artico occupa una superficie pari a circa 15,551,000 km², gran parte appartenente alla Russia, rappresentando il 2.6 % della superficie totale degli oceani e un volume di circa 18,682,000 km³, meno di 1% rapportato al volume degli altri oceani (*Jakobsson, 2002; Stein, 2008*). E' circondato dai continenti eurasiatico e nord americano e da diverse isole per uno sviluppo costiero di oltre 45,000 km. L'Oceano Artico, infine, è il meno profondo dei maggiori oceani e dei mari adiacenti, con profondità media di circa 1,200 m (Fig. 2).

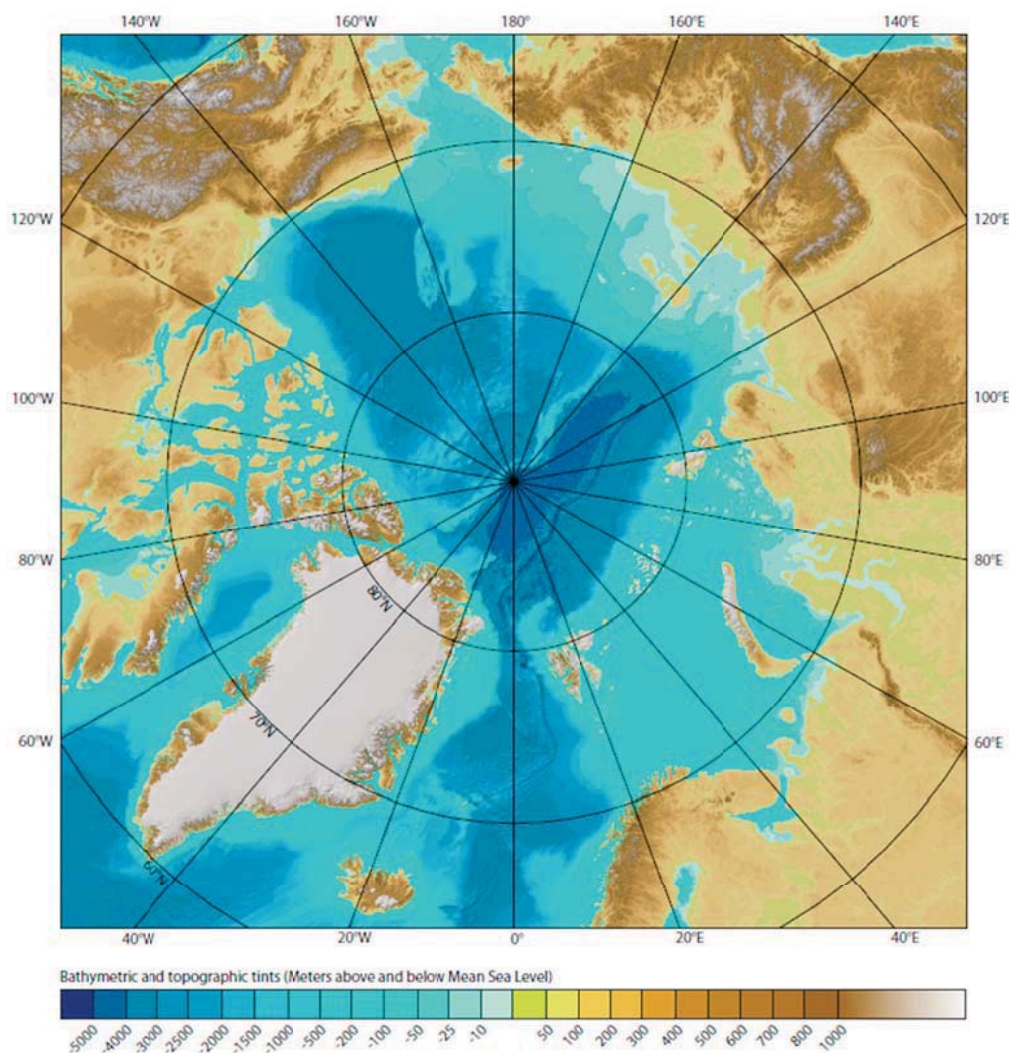


Figura 2. Mappa batimetrica dell'Oceano Artico da International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO - http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/maps/version3_0/).

2. Situazione pregressa e attuale delle dinamiche dei ghiacci artici

L'Oceano Artico si trova ad alte latitudini ed è circondato da continenti e dai più ampi mari di piattaforma con limitate relazioni sia con l'Oceano Pacifico che l'Oceano Atlantico se non attraverso gli stretti di Bering e di Fram e questo lo rende un mare tipo "mediterraneo", epicontinentale (*Jakobsson, 2002*). E' coperto da ghiaccio stagionale e permanente, è fortemente influenzato da enorme apporto fluviale equivalente al 10% globale, è regolato da forzanti stagionali (apporto fluviale, formazione di ghiaccio, luce del sole) e gran parte della superficie delle terre che lo circondano è occupata da permafrost² (*Stein, 2008*). Queste caratteristiche hanno grande influenza sull'ambiente dell'Oceano Artico, sulla tettonica e sui cambiamenti climatici globali.

La perenne copertura di ghiaccio marino lo rende un'area critica per la raccolta dei dati del fondale che risulta meno sviluppata malgrado l'importanza ricoperta nella ricostruzione delle dinamiche quaternarie sia del profondo bacino centrale sia delle aree meno profonde di piattaforma, dove grandi calotte glaciali si sono estese durante l'ultimo massimo glaciale (*Jakobsson et al., 2014a*). L'azione dei ghiacci sul fondale marino è stata registrata dal fondo stesso con forme erosive e deposizionali di avanzamenti e arretramenti dei ghiacci. L'uso di sistemi di mappatura del fondo marino da sottomarini e rompighiaccio durante gli ultimi decenni ha generato una considerevole quantità di dati geologici e geofisici di questo settore e ha permesso di incrementare le conoscenze non solo batimetriche, di forma e struttura del fondale, ma anche quelle idrodinamiche e della formazione e fusione del ghiaccio continentale e marino. Infatti la forma dei fondali, la dinamica dei ghiacci e l'idrodinamica sono correlate e questo è riscontrabile in quanto a grande scala temporale la tettonica controlla la fisiografia del bacino artico che a sua volta influenza ampiamente le correnti sia nelle modalità che nel settore di transito e nella sedimentazione.

L'apporto di acque dolci poi è essenziale per mantenere lo strato a bassa salinità dell'Oceano Artico centrale e quindi contribuisce significativamente alla forte stratificazione delle masse d'acqua superficiali, favorendo la formazione di ghiaccio marino. Variazioni nel bilancio di acque dolci dovrebbero influenzare l'estensione della copertura di ghiaccio marino. La fusione e formazione del ghiaccio marino risultano dal distinto cambiamento di albedo³ di superficie, del bilancio di energia, della struttura di temperatura e salinità delle masse d'acqua della parte superiore e dei processi biologici. Acque dolci e ghiaccio marino sono esportati dall'Oceano Artico nell'Atlantico settentrionale attraverso lo Stretto di Fram. La variazione in questi tassi di esportazione di acque dolci risulterebbe nei cambiamenti dell'Atlantico settentrionale come esempi di circolazione oceanica globale. L'interazione delle acque fredde artiche e del ghiaccio marino con le acque atlantiche relativamente calde e salate è importante per il rinnovo delle acque profonde che guidano la circolazione termoalina globale (*Brocker, 1997; Clark et al., 2002*).

² Strato di terreno o di roccia in cui la temperatura è stata costantemente inferiore a 0°C per diversi anni; esiste dove il riscaldamento estivo non raggiunge la base dello strato di terreno ghiacciato (<https://nsidc.org/cryosphere/glossary-terms/climatology-and-meteorology>).

³ Una quantità adimensionale che misura quanto bene una superficie riflette l'energia solare; varia tra 0 e 1; un valore pari a 0 significa che la superficie è un assorbitore perfetto, in cui tutta l'energia incidente viene assorbita, il valore 1 indica che la superficie è un riflettente perfetto, in cui tutta l'energia incidente viene riflessa e niente viene assorbito (<https://nsidc.org/cryosphere/glossary-terms/climatology-and-meteorology>).

Dal momento che fattori come la circolazione termoalina globale, la copertura di ghiaccio marino e l'albedo terrestre hanno una grande influenza sul sistema climatico terrestre, variazioni climatiche in Artico potrebbero causare maggiori perturbazioni nell'ambiente globale. E' ampiamente riconosciuto che nel 1990 l'Artico sia stato sottoposto a un drammatico cambiamento (*Macdonald, 1996; Dickson et al., 2000; Morison et al., 2000; Morits et al., 2002; Serreze e Francis, 2006; Morison et al., 2007*). Nei decenni passati è stato osservato un significativo aumento dell'apporto fluviale siberiano associato a riscaldamento climatico e aumento delle precipitazioni nei bacini fluviali. Allo stesso tempo un aumento della quantità e temperature delle acque immesse in Artico, una riduzione della copertura del ghiaccio marino, fusione del permafrost e ritiro dei piccoli ghiacciai artici, sono evidenti. La riduzione della copertura di ghiaccio marino causa, a sua volta, un ridotto effetto albedo e la fusione del permafrost può rilasciare gas in atmosfera, con esiti positivi ad un ulteriore riscaldamento. Inoltre la fusione di ghiacciai e l'apporto fluviale aggiunge acqua dolce all'Oceano, incrementando il livello marino globale e rallentando probabilmente la circolazione termoalina globale.

Il ghiaccio marino artico, indicatore chiave delle variazioni climatiche, interessando riflettività superficiale, nuvolosità, umidità atmosferica, scambi di calore e umidità superficiale oceanica e correnti oceaniche, ha avuto un ritiro nell'ultimo trentennio come riconosciuto dalla comunità scientifica con allarme. Le variazioni osservate non includono solo una riduzione totale della superficie coperta dal ghiaccio marino, ma anche un incremento in durata della stagione di fusione (*Smith, 1998; Stabenow e Overland, 2001; Rigor et al., 2002; Sou e Flato, 2009*), una mancanza di ghiaccio pluriennale (*Nghiem et al., 2007*) e un generale decremento in spessore sull'Oceano Artico centrale (*Rothrock et al., 1999*). Sulla base di una simulazione con un modello climatico globale che accoppia atmosfera-ghiaccio-oceano (*Johannessen et al., 2004*) presentato recentemente con i dati aggiornati all'Arctic Dialogue 2013 a Bodo in Norvegia, nell'ambito di valutazione di nuove rotte di navigazione, si prevede che, alla fine di questo secolo, la copertura di ghiaccio estivo possa ridursi dell'80%, diventando l'Oceano Artico libero dai ghiacci durante l'estate.

In questo contesto la batimetria ha un ruolo chiave nella formazione di ghiaccio e nelle sue variazioni stagionali in quanto controlla il trasporto e la distribuzione di massa delle acque calde e fredde che regolano la formazione di ghiaccio marino e i processi di distruzione. Inoltre le dinamiche del ghiaccio marino forzate dai venti superficiali sono guidate dalla batimetria lungo alcune direzioni preferenziali come la Transpolar Drift.

Fondali marini e coperture sedimentarie

Una descrizione accurata della morfologia del fondale di questa regione risulta critica, infatti la raccolta dei dati in superficie da parte di navi è strettamente vincolata dalla copertura di ghiaccio e questo rende l'Oceano Artico meno conosciuto degli altri oceani. Il più recente contributo alla mappatura dei fondali del settore artico è fornito con gran dettaglio a livello generale dall'IBCAO (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean), modello digitale batimetrico nel settore a nord di 64°N di cui l'ultima versione, IBCAO Version 3.0 (Fig. 2), è caratterizzata da una griglia a maglia 0.5 km x 0.5 km (*Jakobsson, 2012*). L'obiettivo del progetto IBCAO si focalizza sulla creazione di una banca dati digitale omogenea per incrementare le conoscenze di profondità e forma del fondale del settore artico grazie all'impiego e integrazione di dati batimetrici, raccolti in questa area e ora disponibili o quelli più recenti e di nuova acquisizione, impiegando diversi sistemi, supporti e per vari

scopi quali quello militare, scientifico ed economico. Iniziato nel 1997 a San Pietroburgo (Russia) con le rappresentative delle nazioni circum-artiche oltre a Svezia e Germania, vede ora coinvolti 10 paesi (Canada, Danimarca, Germania, Islanda, Italia, Norvegia, Russia, Spagna, Svezia e Stati Uniti), con 24 istituzioni sostenuti dall'Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), l'International Arctic Science Committee (IASC), l'International Hydrographic Organization (IHO), la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), l'US National Geophysical Data Center (NGDC).

In particolare IBCAO è il risultato di un grande sforzo di integrazione di dati batimetrici eterogenei messi a disposizione dalle diverse nazioni circum-artiche (*Jakobsson, 2000; 2002; 2012*). Nel caso dell'ultima versione, ad esempio, sono stati validati e inseriti dati acquisiti con sistemi impiegati dai pescatori (dati single beam e sistema OLEX seabed mapping), i rilievi dei sottomarini della Marina Militare Statunitense (US Navy Submarines) e infine quelli delle navi da ricerca di vari paesi. L'area coperta da rilievi acustici multibeam ha avuto inoltre un incremento pari a 6% per la versione IBCAO 2.0 (*Jakobsson et al., 2008*) e a 11% per quella 3.0 (*Jakobsson et al., 2012*).

L'IBCAO 3.0 contiene le profondità estratte dall'Electronic Navigational Charts (ENCs) che sono state fornite dagli Uffici Idrografici dei diversi Paesi all'International Hydrographic Organization (IHO) per essere impiegati nei progetti di mappatura regionale affiliati alla General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) tra cui è annoverato l'IBCAO.

La recente versione dell'IBCAO è caratterizzata da un incremento di dati di nuova acquisizione come quelli per la mappatura ad alta risoluzione di alcuni settori scarpata continentale eseguita in accordo tra Canada, Danimarca e Stati Uniti per la definizione delle loro piattaforme continentali secondo l'articolo 76 dell'UNCLOS, fornendo gran dettaglio del settore meridionale della Groenlandia (Barrow Margin e Chukchi Cap).

I nuovi dati acustici multibeam hanno meglio definito i sistemi morfologici dei fondali marini per i modelli di circolazione e sedimentazione come i canyon che incidono la scarpata continentale e drenano acqua e sedimenti dai settori di piattaforma a quelli più profondi; inoltre l'incremento della quantità e qualità dei dati batimetrici ha evidenziato come alcuni dati di profondità acquisiti dai sottomarini nucleari andassero corretti per l'errore apportato dal sistema di navigazione inerziale o quello sistematico per le lacunose informazioni della velocità del suono impiegata come quelli Olex (*Jakobsson et al., 2012*).

Recenti studi presentati durante Arctic-Antarctic Seafloor Mapping Meeting 2011 a Stoccolma evidenziano i dati acquisiti in Artico da diverse istituzioni. Interessante risulta una ricerca nel settore dell'Arcipalego Artico Canadese con sistema di mappatura dei fondali e gestione dei dati con sistemi informativi disponibili:

Arctic Basemaps: <http://www.omg.unb.ca/Projects/Arctic/basemaps/index.html>;

Arctic Stripmaps: <http://www.omg.unb.ca/Projects/Arctic/stripmaps/index.html>;

Arctic Google Maps Interface: <http://www.omg.unb.ca/Projects/Arctic/google/index.html>.

I dati batimetrici, come già accennato, condizionano correnti e formazione di ghiaccio marino tanto che, in alcuni casi, il ghiaccio marino sembra "impronta" delle isobate regionali come è stato riscontrato nel Mare di Barents dal confronto delle immagini satellitari della copertura di ghiaccio con quelli batimetrici dell'IBCAO (*Nghiem et al., 2005*). Nel Mare di Bering invece la zona di massimo ghiaccio marginale è limitata approssimativamente al ciglio di piattaforma continentale (Pacifico settentrionale limitato

dagli archi insulari orientali e dalle regioni occidentali) che dirige le correnti superficiali oceaniche verso nord oltre il ciglio di piattaforma, dove acque calde ostacolano l'ulteriore avanzamento del limite dei ghiacci con fusione laterale e sotto superficiale. Il controllo batimetrico non è necessariamente ristretto a configurazioni locali e può essere visto attraverso l'estensione regionale che ricopre l'intero bacino Artico. Un'accelerazione nel trasporto di ghiaccio è dato, ad esempio, dalla presenza di dorsali che dividono il bacino come la Lomonosov Ridge (Figg. 3 e 4). Infine il ghiaccio viene portato fuori dal bacino principalmente attraverso lo Stretto di Fram verso il Mare di Groenlandia dove il ghiaccio si scioglie per le acque più calde (Fig. 1).

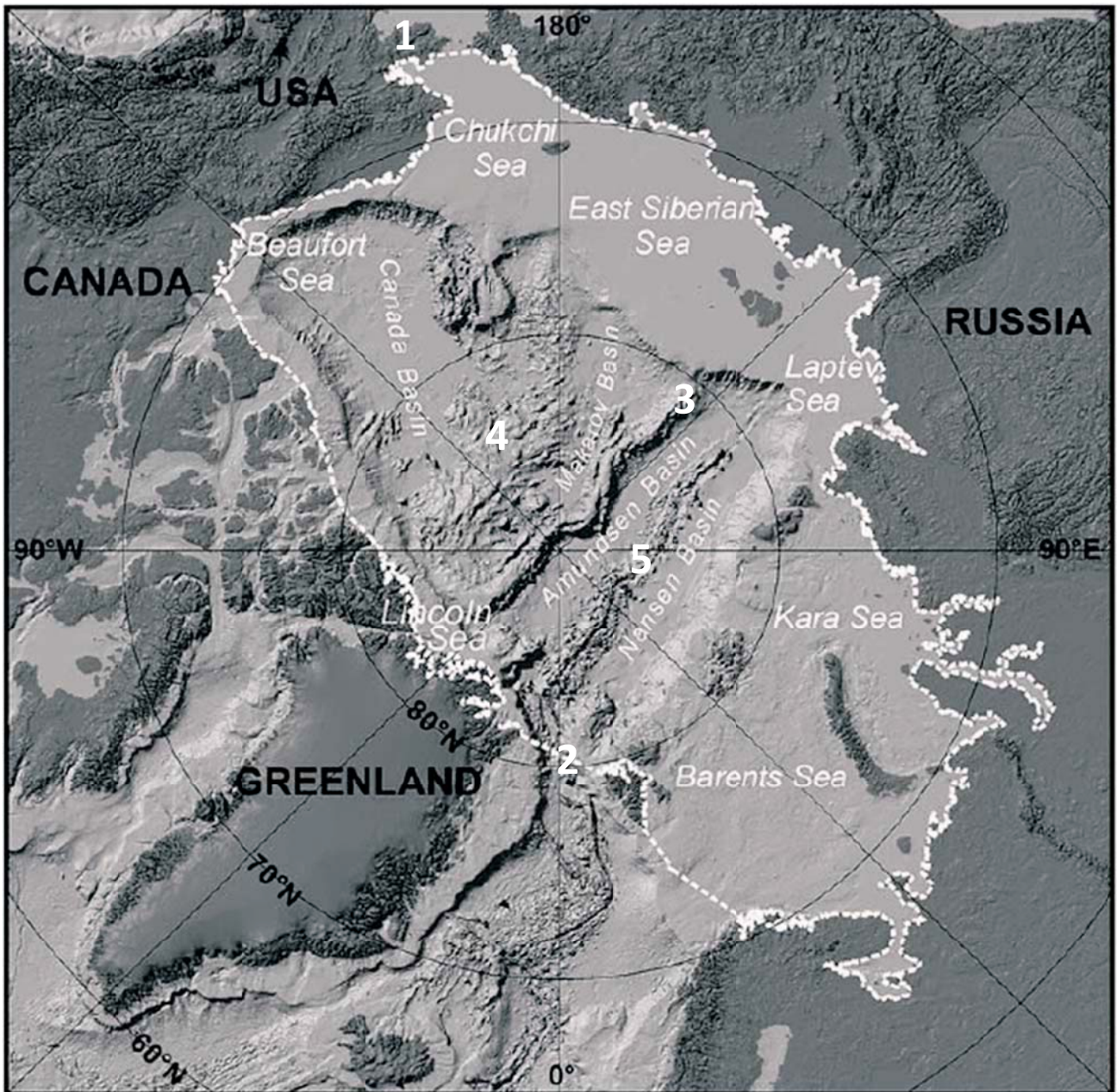


Figura 3. Lineamenti geografici dei mari marginali con indicati i principali bacini su modello digitale dell'IBCAO (Jakobsson et al., 2003a).

1: Stretto di Bering, 2: Stretto di Fram, 3: Lomonosov Ridge, 4: Amerasian Basin e 5: Eurasian Basin.

Il bacino dell'Oceano Artico è un insieme complesso di dorsali, bacini, piane abissali, abissi e piattaforme (Fig. 4).

L'area di piattaforma continentale (da costa al ciglio di piattaforma) ricopre quasi il 53 % (Jakobsson, 2002) dell'area totale dell'Oceano Artico (Fig. 5), comprendendo il bacino profondo dell'Oceano Artico e le estese piattaforme continentali dei mari di Barents, Kara, Laptev, East Siberian, Chukchi, Beaufort e White e quelle più strette a nord dell'Arcipelago Canadese e del Mare di Groenlandia.

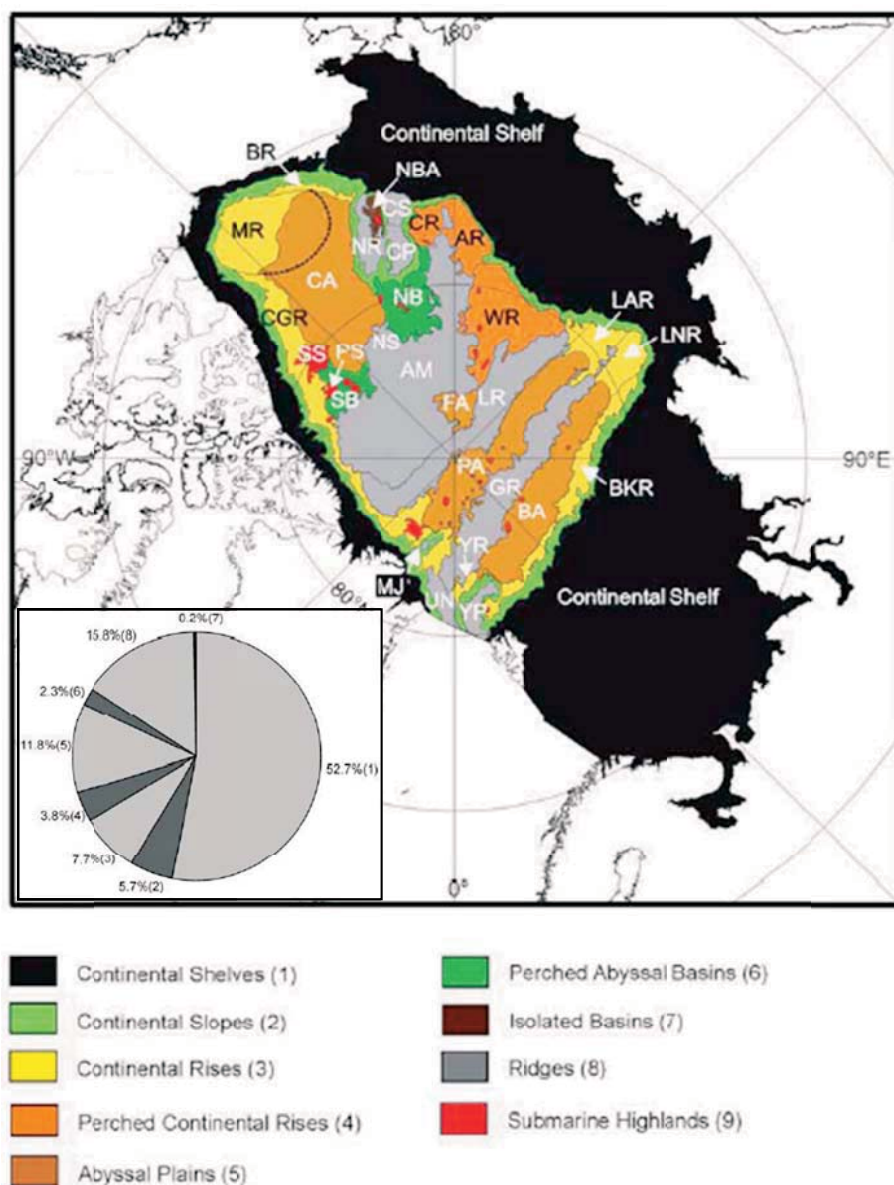


Figura 4. Province fisiografiche di primo ordine dell'Oceano Artico e numeri di riferimento in base alla superficie ricoperta (Jakobsson et al., 2003a).

Abbreviazioni usate: AM Alpha-Mendeleev Ridge system; AR, Arlis Perched Rise; BA, Barents Abyssal Plain; BR, Beaufort Rise; BKR, Barents/Kara Rise; CA, Canada Abyssal Plain; CGR, Canada-Greenland Rise; CP, Chukchi Plateau; CR, Chukchi Rise Perched; CS, Chukchi Spur; FA, Fletcher Abyssal Plain; GR, Gakkel Ridge; LAR, Lena/Amundsen Rise; LNR, Lena/Nansen Rise; LR, Lomonosov Ridge; MJ, Morris Jesup Rise; MR, Mackenzie Rise; NB Nautilus Basin; NBA, NB, Northwind Basin; NR, Northwind Ridge; NS, Nautilus Spur; PA, Pole Abyssal Plain; PS, Pearya Spur; SB, Stefansson Basin; SS, Sever Spur; UN, unnamed mid-ocean ridge segment; WR, Wrangel Perched Rise; YP, Yermak Plateau; YR, Yermak Rise.

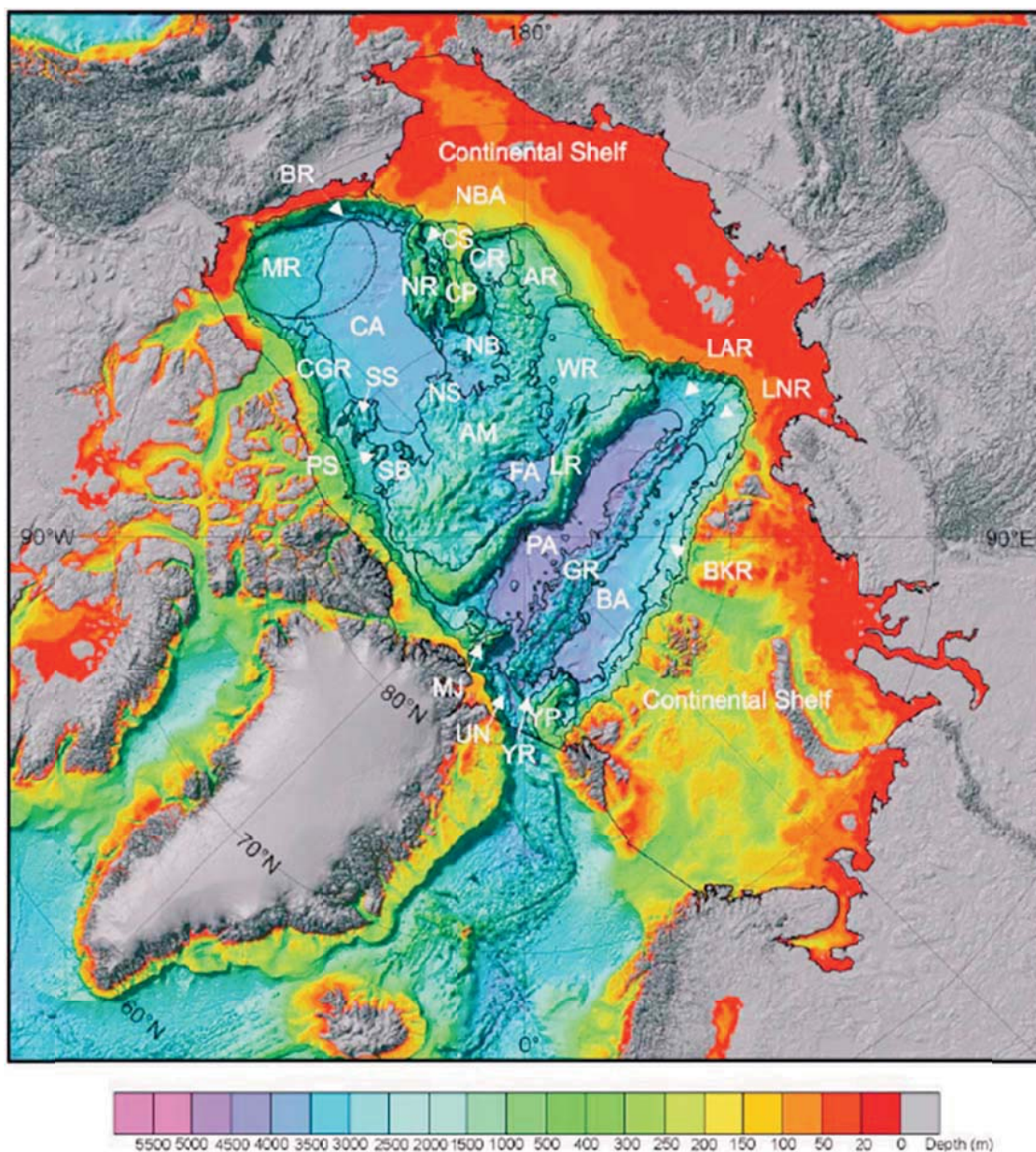


Figura 5. Limiti degli elementi fisiografici di primo ordine su modello digitale IBCAO (Jakobsson et al., 2003a). AM—Alpha-Mendeleev Ridge system; AR—Arlis Perched Rise; BA—Barents Abyssal Plain; BR—Beaufort Rise; BKR—Barents/Kara Rise; CA—Canada Abyssal Plain; CGR—Canada-Greenland Rise; CP—Chukchi Plateau; CR—Chukchi Perched Rise; CS—Chukchi Spur; FA—Fletcher Abyssal Plain; GR—Gakkel Ridge; LAR—Lena/Amundsen Rise; LNR—Lena/Nansen Rise; LR—Lomonosov Ridge; MJ—Morris Jesup Rise; MR—Mackenzie Rise; NB—Nautilus Basin; NBA—Northwind Basin; NR—Northwind Ridge; NS—Nautilus Spur; PA—Pole Abyssal Plain; PS—Pearya Spur; SB—Stefansson Basin; SS—Sever Spur; UN—unnamed mid-ocean ridge segment—WR—Wrangel Perched Rise; YP—Yermak Plateau; YR—Yermak Rise.

Il bacino centrale dell'Oceano Artico è suddiviso in due maggiori sottobacini: Eurasian (tra i 4000-4500 m) e Amerasian (circa 4000 m) dalla Lomonosov Ridge, una dorsale che si allunga tra Asia e America, la cui profondità ha fatto discutere a lungo gli oceanografi dato il suo impatto sulla circolazione e le proprietà delle masse d'acqua dell'Oceano Artico. Un canale e una soglia a circa 2500 m di profondità isolano masse d'acqua con proprietà differenti con un passaggio di flusso a 1870 m dal bacino Amerasian al bacino Eurasian.

In particolare l'Eurasian Basin è limitato dalle basse piattaforme dei mari di Barents, Kara, Laptev e dalla Groenlandia settentrionale, mentre l'Amerasian Basin è limitato, oltre che dalla Lomonosov Ridge (Fig. 5), dai mari East Siberian, Chukchi e Beaufort e dall'Arcipelago Artico Canadese. Questi bacini a loro volta sono suddivisi da dorsali: l'Eurasian Basin dalla Gakkel Ridge in Amundsen Basin e Nansen Basin mentre la complessa Alpha-Mendeleev Ridge suddivide l'Amerasian Basin in Canada Basin e Makarov Basin.

L'Oceano Artico (Figg. 3, 4, e 5) risulta pertanto significativo per il più ampio settore di piattaforma continentale rispetto agli altri oceani. In particolare i mari East Siberian e Laptev sono molto poco profondi (gran parte dei fondali si trova a profondità da 0-50 m) e con il Mare di Chukchi compongono la provincia meno profonda, ricoprendo il 22% della superficie dell'Oceano Artico, ma solo l'1% del suo volume (Stein, 2008). Questo implica che i suddetti settori siano molto sensibili alle variazioni eustatiche del livello del mare con conseguente problema di erosione e arretramento delle coste (Jakobsson *et al.*, 2014a).

Una stima dello spessore delle coperture sedimentarie che caratterizzano l'Oceano Artico è possibile da mappe generali di cui ne sono esempio il database da Divins (2003) con spaziatura del grigliato pari a 5', o le mappe di spessore dei sedimenti dell'Oceano Artico di Jackson e Oakey (1990), ottenute da dati di sismica a riflessione e rifrazione integrati da quelli sedimentologici o quelle più recenti di Grantz *et al.* (2010), dove vengono riportate nel dettaglio le sequenze sedimentarie o quella prodotta, nell'ambito cooperazione internazionale, da un gruppo di ricerca guidato dal Geological Survey of Canada (Fig. 6).

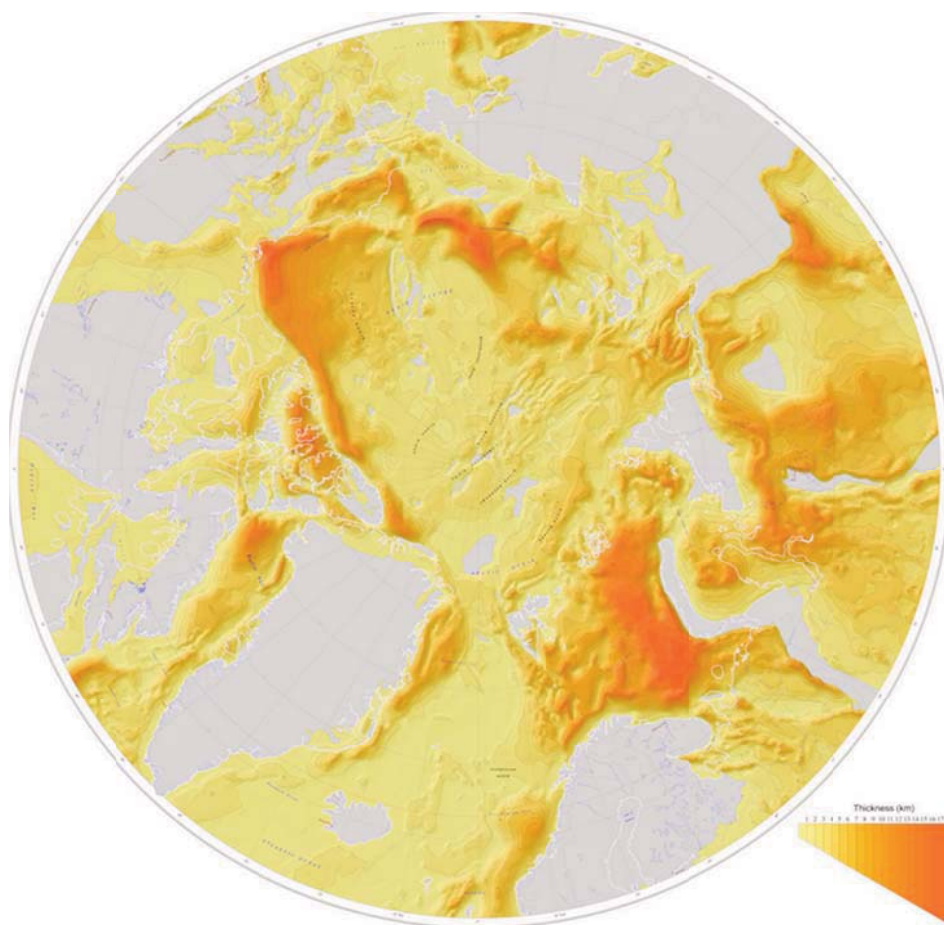


Figura 6. Spessore dei sedimenti dell'Oceano Artico. In giallo spessori di alcuni chilometri, in arancione spessori più elevati (scala 0-18 km con unità 1 km), in grigio aree continentali o non indagate, e in bianco la linea di costa. <http://www.vsegei.ru/en/intcooperation/temar-5000/>

Recenti risultati di studi geologici e geofisici riguardanti la storia glaciale e le dinamiche artiche (*Jakobsson et al., 2014a, 2014b*) hanno fornito importanti elementi, alcuni ancora oggetto di dibattito scientifico per i limitati dati disponibili, sia per le ricostruzioni paleoclimatiche e paleoceanografiche a breve e lungo termine, che per l'evoluzione artica della tettonica a placche, sia per il ruolo chiave ricoperto dell'Oceano Artico nei cambiamenti climatici globali e nei modelli previsionali.

In particolare dati stratigrafici del bacino hanno evidenziato come diversi siano stati i periodi di avanzamento e arretramento della calotta glaciale, con riscontri nei depositi di mare profondo, e come il periodo di ultimo glaciale, con massimo (*Last Glacial Maximum* - LGM) tra 26,000 - 19-20,000 anni fa, sia ben evidente nelle forme deposizionali ed erosive di tipo glaciale da cui sono state fornite alcune ipotesi ancora aperte sui caratteri e le dinamiche della calotta nel passato, base per i futuri scenari. Infatti la calotta, tipo piattaforma di ghiaccio (*ice shelf, marine based*), drenata da diversi *ice stream*⁴ ha lasciato sul fondo elementi che hanno permesso la delineazione della *grounding line* (limite di ghiaccio ancorato al fondo marino) durante l'ultimo massimo glaciale con un livello del mare più basso dell'attuale e gran parte dei settori di piattaforma continentale emersi. La presenza di alcune forme rende possibile ricostruzioni di quali fossero le dinamiche di avanzamento e arretramento come ad esempio il *grounding zone wedge*, cuneo di sedimenti lasciato sul fondale marino dalla calotta con arretramento discontinuo.

Attualmente la calotta che ricopre la Groenlandia è drenata da 4 principali *ice-stream* che interagiscono direttamente sul fondale marino insieme all'azione del ghiaccio marino e delle correnti che, in fase postglaciale, tendono a destabilizzarla e disintegrarla. I recenti depositi postglaciali olocenici (10,000 anni fa) costituiti essenzialmente da sedimenti fini (*soft fine-grained sediments*) di origine marina e continentale per il grande apporto dei corsi d'acqua, ricoprono i depositi glaciali con alti tassi di sedimentazione.

Esempio significativo sono i dati acustici delle sequenze sedimentarie riscontrate al largo dell'estuario del Fiume Yenesei nel Mare di Kara, dove lo spessore dei sedimenti recenti è caratterizzato da un tasso di sedimentazione di 2m/ky (*Dittmers et al., 2003*). L'apporto sedimentario dei corsi d'acqua nel periodo postglaciale viene quindi registrato dalle potenti coperture sedimentarie che caratterizzano il bacino Artico in corrispondenza delle foci fluviali. L'attuale carico solido fluviale dei corsi d'acqua che sfociano nell'Oceano Artico contribuisce notevolmente alle variazioni del fondale e delle coperture sedimentarie. In figura 7, tratta da *Stein (2008)* è mostrato in sintesi l'apporto fluviale nel bacino artico dove è evidente il grande contributo dei maggiori bacini idrografici quali quelli di Yenesei e Lena per la parte asiatica e MacKenzie per quella americana.

⁴ Una corrente di ghiaccio in uno strato di ghiaccio o calotta di ghiaccio che scorre più veloce del ghiaccio circostante (<https://nsidc.org/cryosphere/glossary-terms/climatology-and-meteorology>).

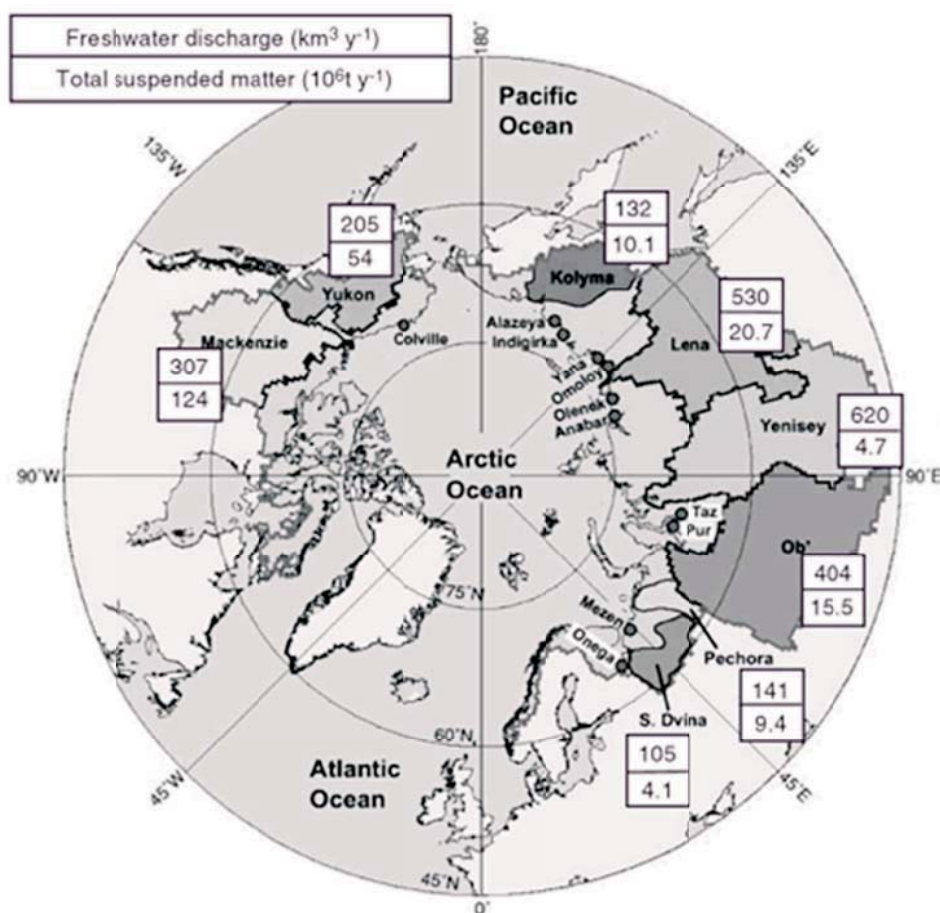


Figura 7. Bacini idrografici degli otto principali fiumi che sfociano nel bacino artico e carico annuale della portata liquida e solida (materiale sospeso totale). Con un punto sono indicate le foci di altri undici corsi d'acqua minori (Stein, 2008).

Gli studi morfologici e geologici dei fondali artici hanno avuto un grande incremento all'inizio degli anni 2000 sull'esempio del progetto dell'IBCAO e tra questi è da evidenziare l'IODP (*International Ocean Drilling Program*) Expedition 302, l'*Arctic Coring Expedition* (ACEX) (<http://www.ecord.org/exp/acex/302.html>). Nel settore artico, come già evidenziato, le forme del fondale sono il prodotto sia di tettonica che di processi erosivi e deposizionali soprattutto da parte dei ghiacci (continentali e marini) e delle correnti (Fig. 8).

Questi recenti ricerche hanno permesso di realizzare alcune ricostruzioni delle dinamiche del bacino Artico e di affermare come il Lomonosov Ridge sia una dorsale costituita di crosta continentale originatasi dal *rift* continentale avvenuto nel Paleocene-Eocene (64-56 My). Di conseguenza la parte Eurasiatica dell'Oceano Artico si è aperta dalla distensione lungo il Gakkel Ridge e il Lomonosov Ridge è diventato il margine continentale coniugato al margine continentale Eurasiatico nei mari di Barents e Kara. C'è continuità da est a ovest (Eurasia-America) ed è morfologicamente e geologicamente il prolungamento sommerso di entrambi i continenti. Il Gakkel Ridge non sembra invece avere connessione con alcun margine continentale, si sviluppa per circa 1800 km nell'Oceano Artico centrale ed è costituito di crosta oceanica con una lenta velocità di espansione. Le sequenze sedimentarie di copertura sono caratterizzate da valori pari a circa 6 km nel Canada Basin e circa 3 km nel Nansen Basin (Grantz et al., 1990; Jokat et al., 1995) e sono conferma di grandi spessori di sedimento nel settore Amerasian.

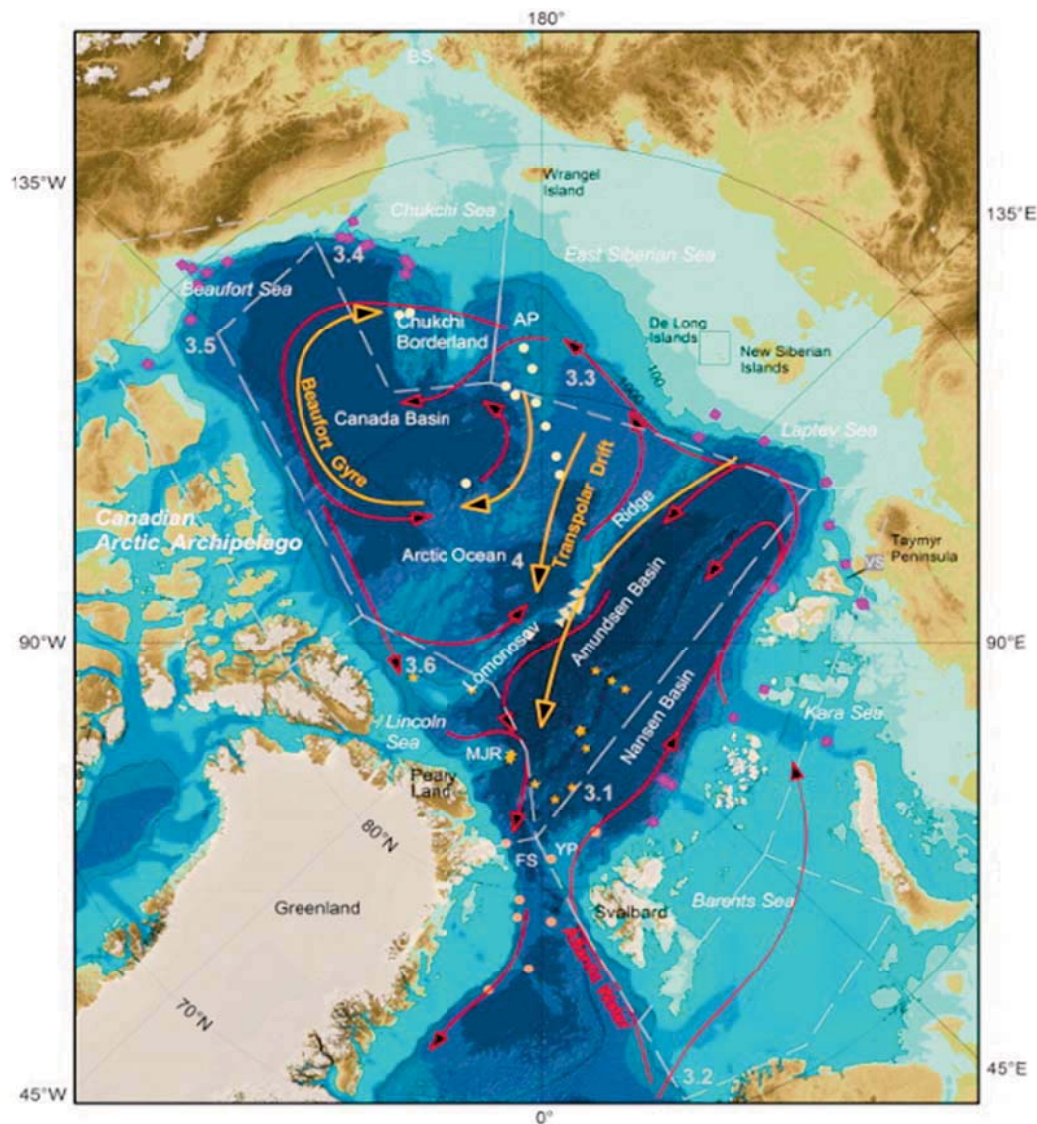


Figura 8. Immagine dei principali mari, bacini, e correnti della regione. I punti rappresentano alcuni siti di campionamento dei sedimenti, le frecce l'andamento generale della circolazione (Jakobsson et al., 2014a).

E' evidente come siano ancora molto aperte alcune discussioni scientifiche, dettate dalla disomogeneità delle conoscenze del settore artico e come, una valutazione dettagliata dei fondali marini necessiti dati ad alta risoluzione (dati geofisici calibrati da dati diretti) volti al raggiungimento dell'obiettivo preposto. Allo stato attuale delle conoscenze, ad esempio, si può affermare che la massima profondità dell'Oceano Artico, pari a 5700 m, è stata registrata nel Molloy Hole, Stretto di Fram (Freire et al., 2014). Alcuni settori artici di particolare interesse poi sono stati e sono oggetto di studi approfonditi sia per scopi scientifici che socio-economici. In questo contesto i dati marini geofisici e geologici sono utile ausilio nello studio delle geometrie dei fondali, nella discriminazione delle coperture sedimentarie/basamento (crosta oceanica/continentale) in rapporto alla struttura e tettonica del bacino non solo per scopi di esplorazione e sfruttamento delle risorse (trappole di idrocarburi, migrazione dei gas, gas idrati, noduli polimetallici), ma anche per la definizione della piattaforma continentale artica secondo quanto previsto dall'UNCLOS (Jakobsson et al., 2003b).

Circolazione marina

Diventando la regione artica sempre più accessibile per lunghi periodi di tempo, vi è una crescente necessità di migliorare la previsione delle condizioni di ghiaccio su scale temporali stagionali e più lunghe. Tuttavia, al fine di soddisfare questa esigenza, è necessaria una migliore comprensione dei ruoli della dinamica e della termodinamica del ghiaccio marino in relazione alla perdita di ghiaccio osservata.

Il complesso sistema di circolazione artica è in un delicato equilibrio. Negli anni recenti si sono registrati cambiamenti nel sistema artico, compresa una drammatica riduzione della copertura dei ghiacci e un indebolimento del sistema di circolazione conosciuto come Beaufort Gyre (indicato in figura 9 e di seguito descritto), riconducibili ai cambiamenti climatici.

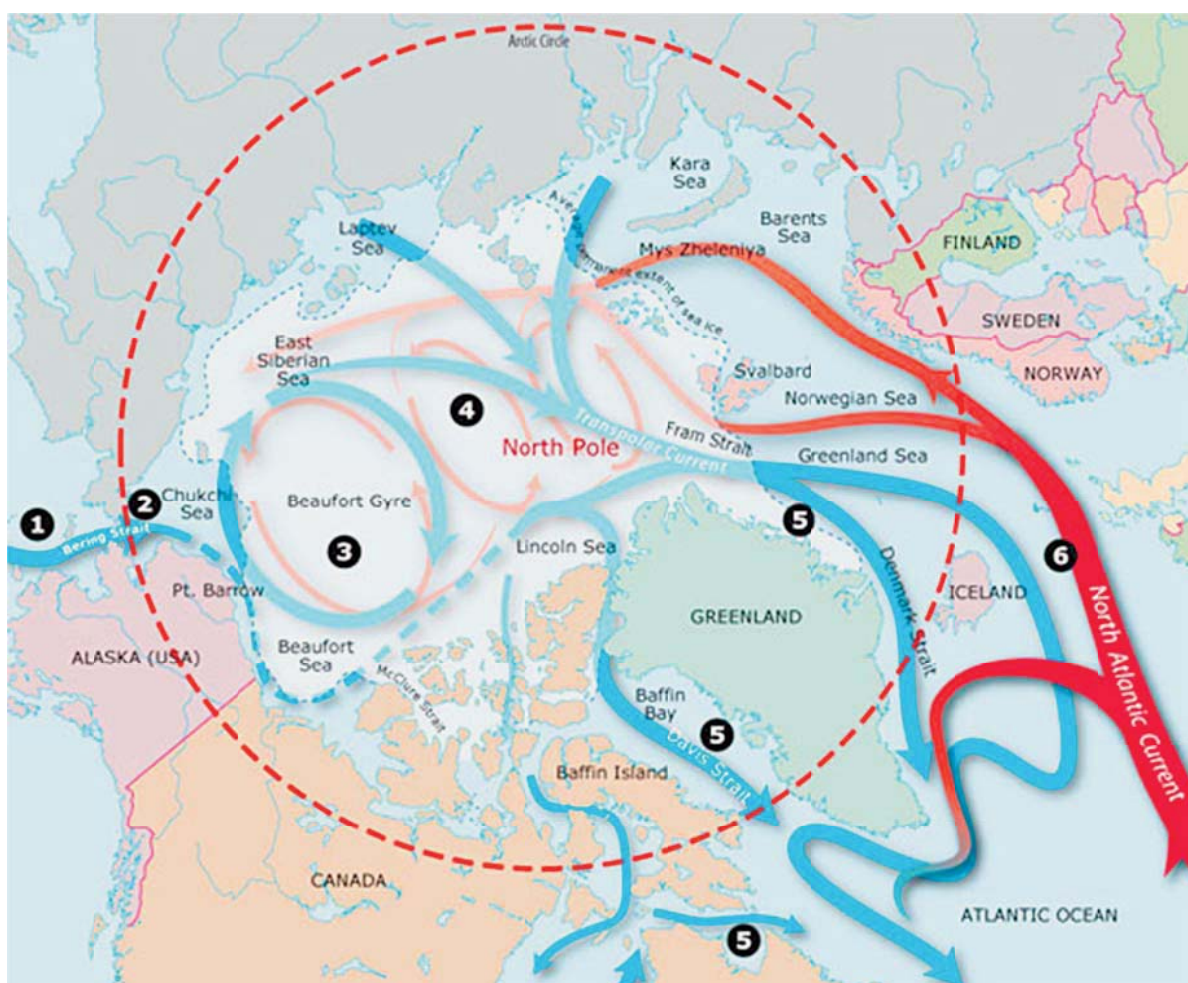


Figura 9. Circolazione generale dell'Oceano Artico (www.divediscover.whoi.edu/arctic/index.html); i numeri indicano le diverse componenti (vedi testo).

L'Oceano Artico influenza la vita non solo delle popolazioni residenti nei territori che vi si affacciano, ma anche degli abitanti del Nord America e dell'Europa. Conseguentemente, l'Oceano Artico e gli effetti dei cambiamenti in corso sono di estremo interesse e allo studio da parte degli oceanografi di ogni disciplina

Acque fredde e relativamente poco salate entrano nell'Oceano Artico attraverso lo Stretto di Bering tra l'Alaska e la Siberia (Fig. 9, 1).

In inverno, venti freddi provenienti dai territori ghiacciati dell'Alaska soffiano sul poco profondo Mare di Chukchi (Fig. 9, 2). L'aria fredda congela l'acqua e spinge il ghiaccio verso il mare aperto, lasciando nuove sacche di acqua di mare a disposizione per il congelamento: è questa la zona di produzione del ghiaccio. Durante il congelamento, l'acqua di mare rilascia sale nelle acque superficiali. Queste fredde acque salate diventano più dense e sprofondano, scivolando lungo la piattaforma continentale fino all'Oceano Artico Occidentale. Esse creano uno strato che giace sopra uno strato più profondo di acque più salate, più dense e più calde provenienti dall'Oceano Atlantico (Fig. 10).

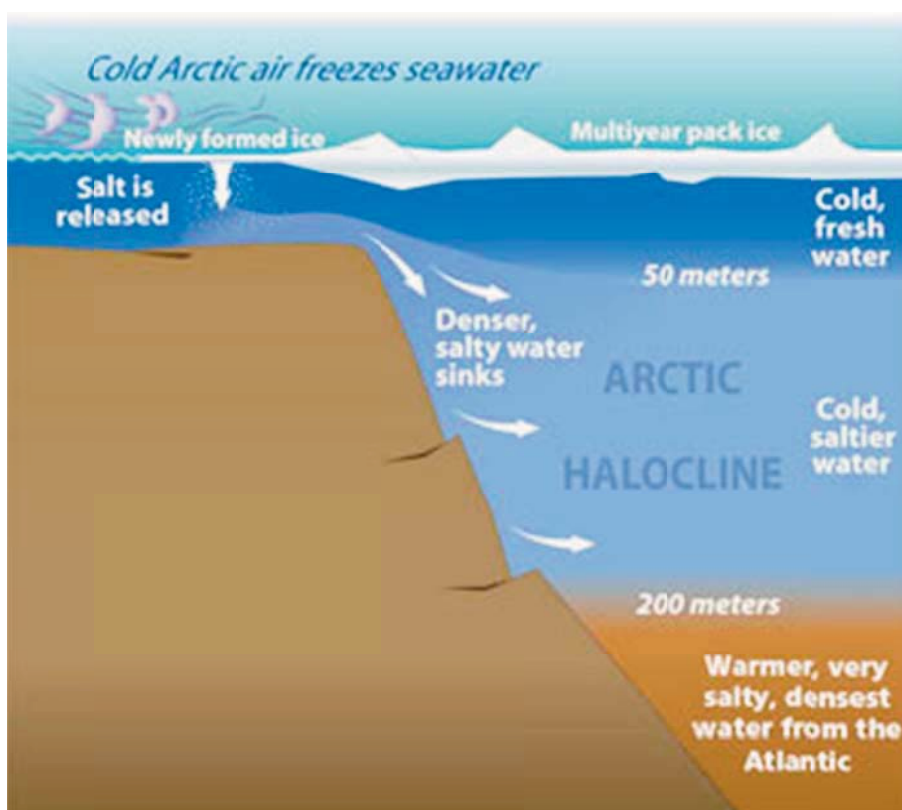


Figura 10. Zona di formazione del ghiaccio (www.divediscover.whoi.edu/arctic/index.html).

Una volta nel bacino dell'Oceano Artico, l'acqua è trascinata in un enorme corrente circolare innescata da forti venti chiamata Beaufort Gyre. Anche i grandi fiumi siberiani e canadesi scaricano in questa corrente circolare, creando una grande riserva di acqua relativamente dolce (Fig. 9, 3).

Periodicamente, i venti si spostano e la corrente circolare si indebolisce, permettendo a grandi quantità di acqua dolce di fuoriuscire e attraversare l'Artico mediante la corrente transpolare (Fig. 9, 4).

L'acqua esce dall'Oceano Artico attraverso diverse vie. Essa può fluire attraverso lo Stretto di Fram, tra la Groenlandia nord-orientale e le Isole Svalbard, diramandosi poi attorno a entrambi i lati dell'Islanda (Fig. 11). Può altresì scorrere intorno al lato ovest della Groenlandia attraverso Baia di Baffin e fuoriuscire dallo Stretto di Davis. Può anche passare attraverso un labirinto di isole canadesi e fuoriuscire dallo Stretto di Hudson (Fig. 9, 5).

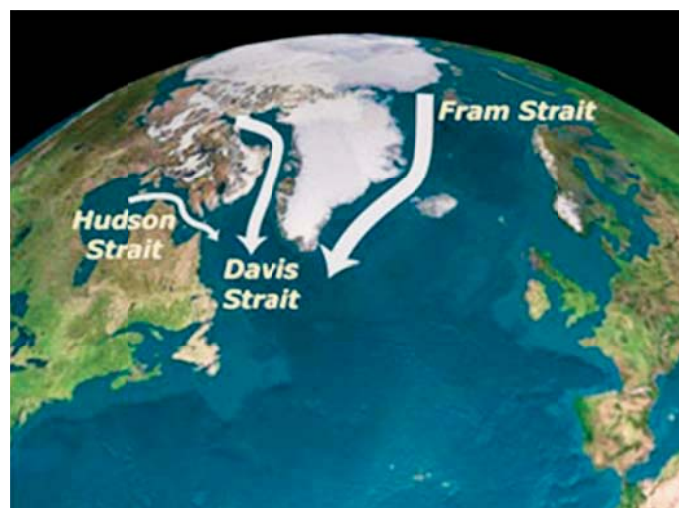


Figura 11. Uscita delle masse d'acqua dall'Artico (www.divediscover.whoi.edu/arctic/index.html).

Acque calde e salate dell'Oceano Atlantico, originariamente appartenenti alla Corrente del Golfo, entrano nell'Oceano Artico e sono raffreddate mentre si muovono attraverso il Mar di Groenlandia e il Mar di Norvegia. Raffreddandosi affondano sotto le acque fredde e meno salate sino a profondità di diverse centinaia di metri. Infine, esse escono attraverso lo Stretto di Fram, l'unica via di uscita consentita alle acque profonde (Fig. 9, 6).

Ghiaccio marino

Gli effetti termodinamici che condizionano la dinamica della copertura glaciale avvengono principalmente tramite la radiazione, sia direttamente sulla superficie superiore del ghiaccio marino sia indirettamente sulla parte inferiore. Il trasferimento di calore sensibile dall'atmosfera al ghiaccio è notevolmente più piccolo. Dal momento che le tempistiche di inizio dello scioglimento e del congelamento influenzano l'albedo superficiale, esse influenzano la quantità di ghiaccio sciolto ogni estate. Così, le variazioni di lunghezza della stagione di scioglimento sono un elemento importante per capire le attuali tendenze del ghiaccio del mare Artico.

I dati che consentono una accurata valutazione dei cambiamenti nella stagione dello scioglimento sono acquisiti mediante misurazioni satellitari nella frequenza delle microonde, che consentono di determinare, insieme con le misurazioni di temperatura superficiale del mare (SST) e della radiazione solare assorbita, lo scioglimento e il congelamento dei ghiacci.

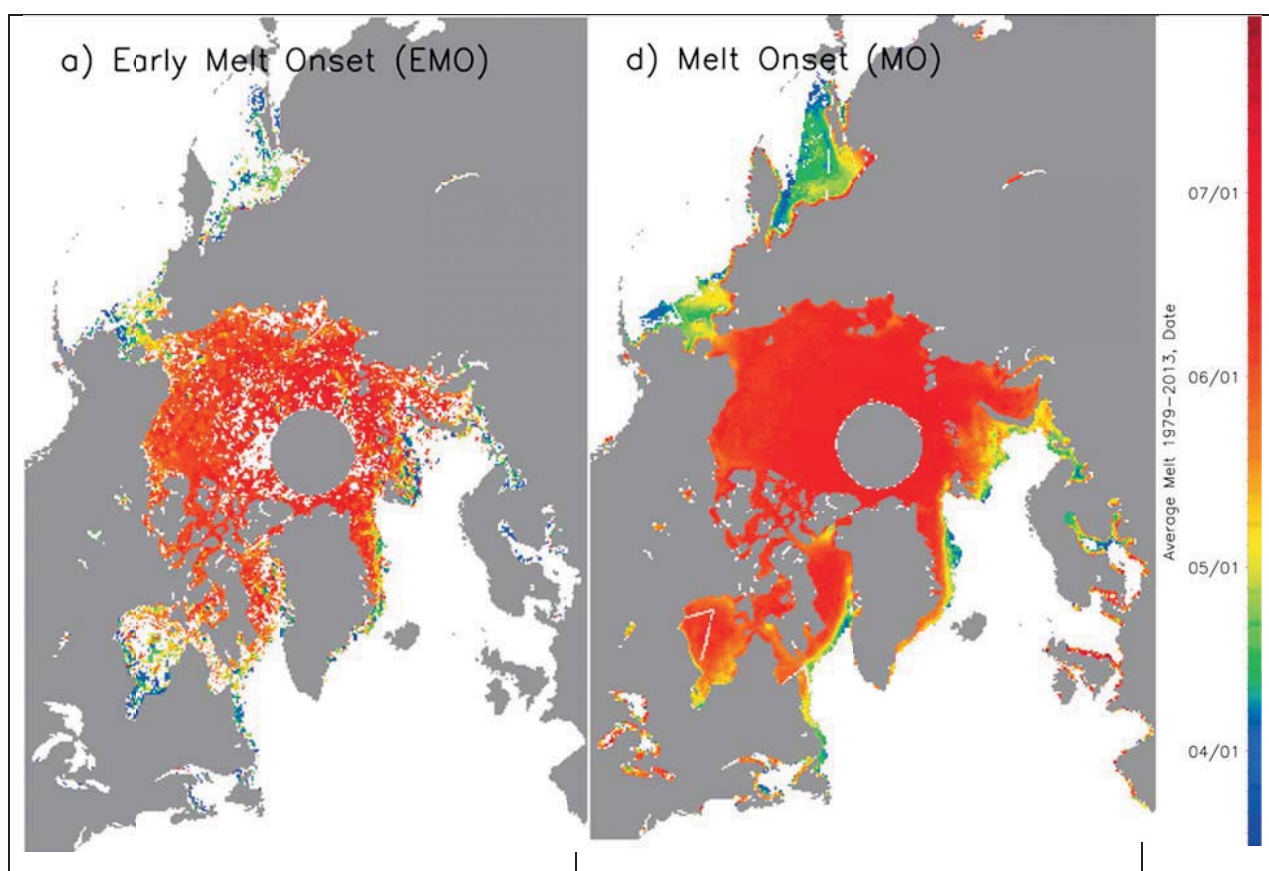
Per valutare il trend è importante individuare gli indicatori significativi per i processi di scioglimento e congelamento. Per lo scioglimento, sono calcolati il primo giorno di scioglimento (EMO) e l'inizio del periodo di scioglimento continuo (MO). Allo stesso modo, l'algoritmo identifica l'inizio del congelamento (EFO) e l'ultimo giorno di fusione, ossia l'inizio del congelamento continuo (FO). Le differenze tra EMO e MO, e EFO e FO sono indicative dei periodi di transizione stagionale. Le statistiche vengono calcolate per l'intero Artico e per 12 singole regioni.

Le immagini seguenti riassumono l'analisi a lungo termine dell'inizio dello scioglimento, del congelamento, e le lunghezze della stagione di fusione dal 1979 al 2013.

I risultati sono presentati sia per l'inizio dei periodi di fusione e congelamento (EMO e EFO), sia per i periodi di scioglimento continuo e congelamento continuo (MO e FO). È utile definire anche le lunghezze "interne" ed "esterne" della stagione di scioglimento, definite come (EFO meno MO) e (FO meno EMO), rispettivamente. Come previsto, vi è una forte dipendenza dalla latitudine nella tempistica degli indicatori, con le regioni meridionali che iniziano lo scioglimento in anticipo e il congelamento in ritardo. In generale, l'EMO si verifica circa 2 settimane prima rispetto al MO all'interno dell'Oceano Artico centrale e nei mari adiacenti e circa 3 settimane prima nelle zone di ghiaccio stagionale. L'EFO e il FO generalmente si verificano entro 2 settimane l'uno dall'altro, con un conseguente variazione della lunghezza della stagione di scioglimento che potrebbe differire di 1 mese tra la lunghezza interna ed esterna.

In generale, la lunghezza della stagione di scioglimento è compresa tra 5 e 7 mesi per le zone di ghiaccio stagionale, 2.5 mesi nell'Artico centrale, e 3-5 mesi nei mari di Beaufort, Chukchi, Siberiano Orientale, Laptev, e Kara. Considerando la totalità dell'Artico, vi sono più di 3 settimane di differenza tra le lunghezze interna ed esterna, che durano in media 112.9 ± 7.66 giorni e 138.0 ± 6.87 giorni, rispettivamente.

Di seguito vengono riportate la "Dinamica della formazione e fusione della copertura glaciale nel periodo 1979-2013" secondo i parametri EMO, MO, EFO, FO (Fig. 12).



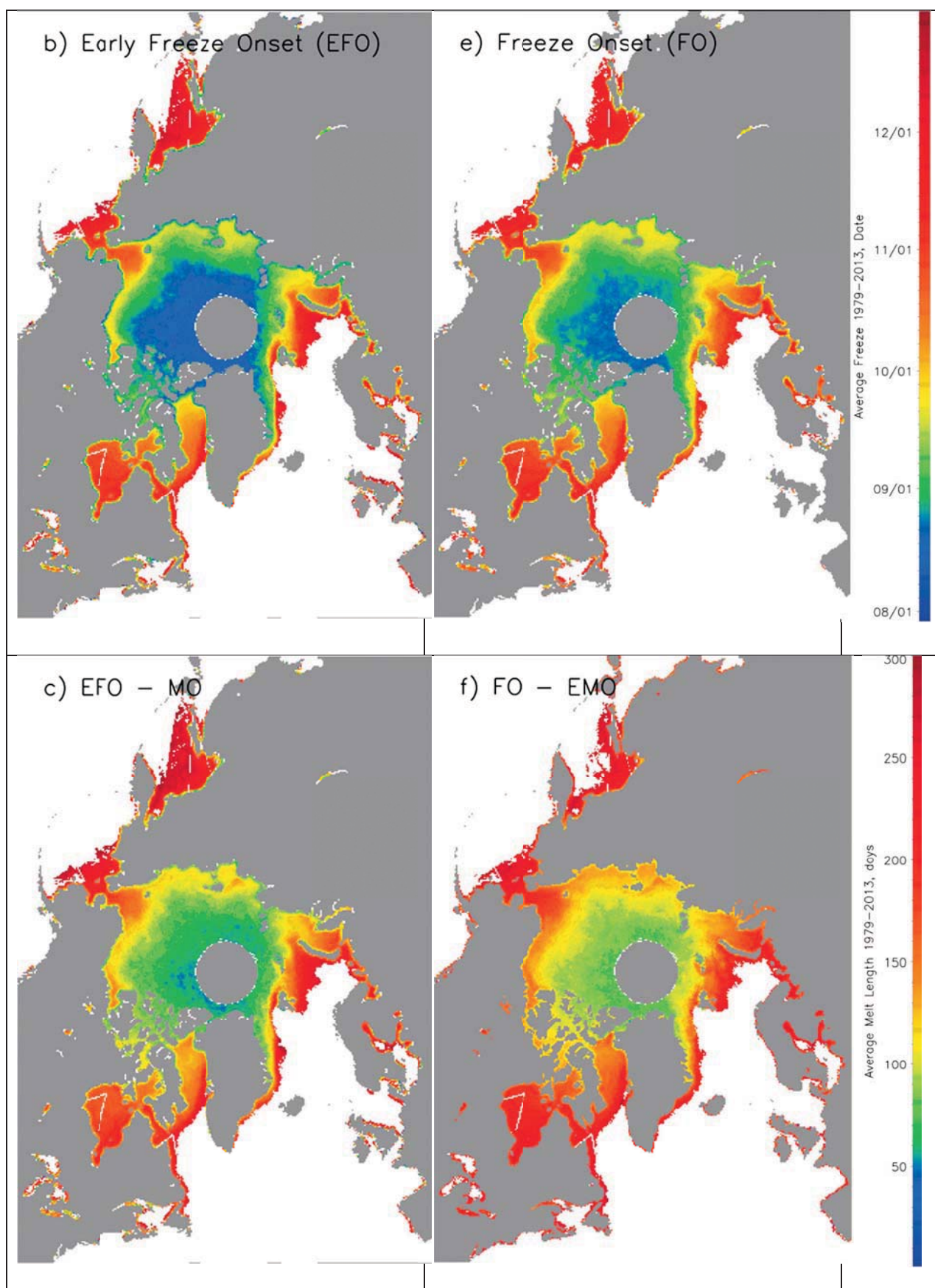


Figura 12. Dinamica della formazione (F) e fusione (M) della copertura glaciale nel periodo 1979-2013 secondo i parametri EMO, MO, EFO, FO (Stroeve et al., 2014).

All'interno della banchisa in progressivo accrescimento restano localmente isolati bracci di mare liberi dai ghiacci, dette polynya. Queste ultime sono una regione geograficamente fissa di acque libere dai ghiacci (o con spessore di ghiaccio marino più sottile rispetto alla media) isolate rispetto ad aree con *pack-ice* (banchisa) più spesso. Le polynya possono avere dimensioni variabili, interessare aree molto estese, ampiamente distribuite nel settore Artico (Figg. 13 e 14) e sono un'importante componente sia del sistema fisico che biologico nel mare coperto da ghiacci (Smith e Barber, 2007).



Figura 13. Mappa che mostra i paesi del settore artico con indicati i diversi tipi di copertura di ghiaccio marino (fast-ice o banchisa costiera e mobile ice) con evidenza delle polynya, aree di acque libere o con copertura di ghiaccio a limitato spessore rispetto alle aree adiacenti. <http://www.arctic-council.org/index.php/en/>

Da un punto di vista fisico le polynya sono aree di intensificazione di flussi aria-mare in inverno relativi alle vicine regioni coperte di ghiaccio. Da un punto di vista biologico le polynya che si presentano ciascun anno hanno un particolare significato biologico specialmente per i mammiferi marini e gli uccelli marini. Le polynya possono continuamente rilasciare calore in atmosfera con accumulo di più ghiaccio nelle aree circostanti per diverse

ragioni. Le due categorie tradizionali di polynya sono: *polynya* “calore latente”, in cui vento e correnti portano lontano il ghiaccio consolidato; e le *polynya* “calore sensibile” in cui il flusso di calore delle acque sub-superficiali più calde rallenta o elimina la formazione di ghiaccio (Smith et al., 1990). Il nome “calore latente” si riferisce al calore latente di fusione rilasciato quando l’acqua si trasforma in ghiaccio e il nome “calore sensibile” si riferisce al calore richiesto per mantenere la temperatura superficiale sopra il congelamento.

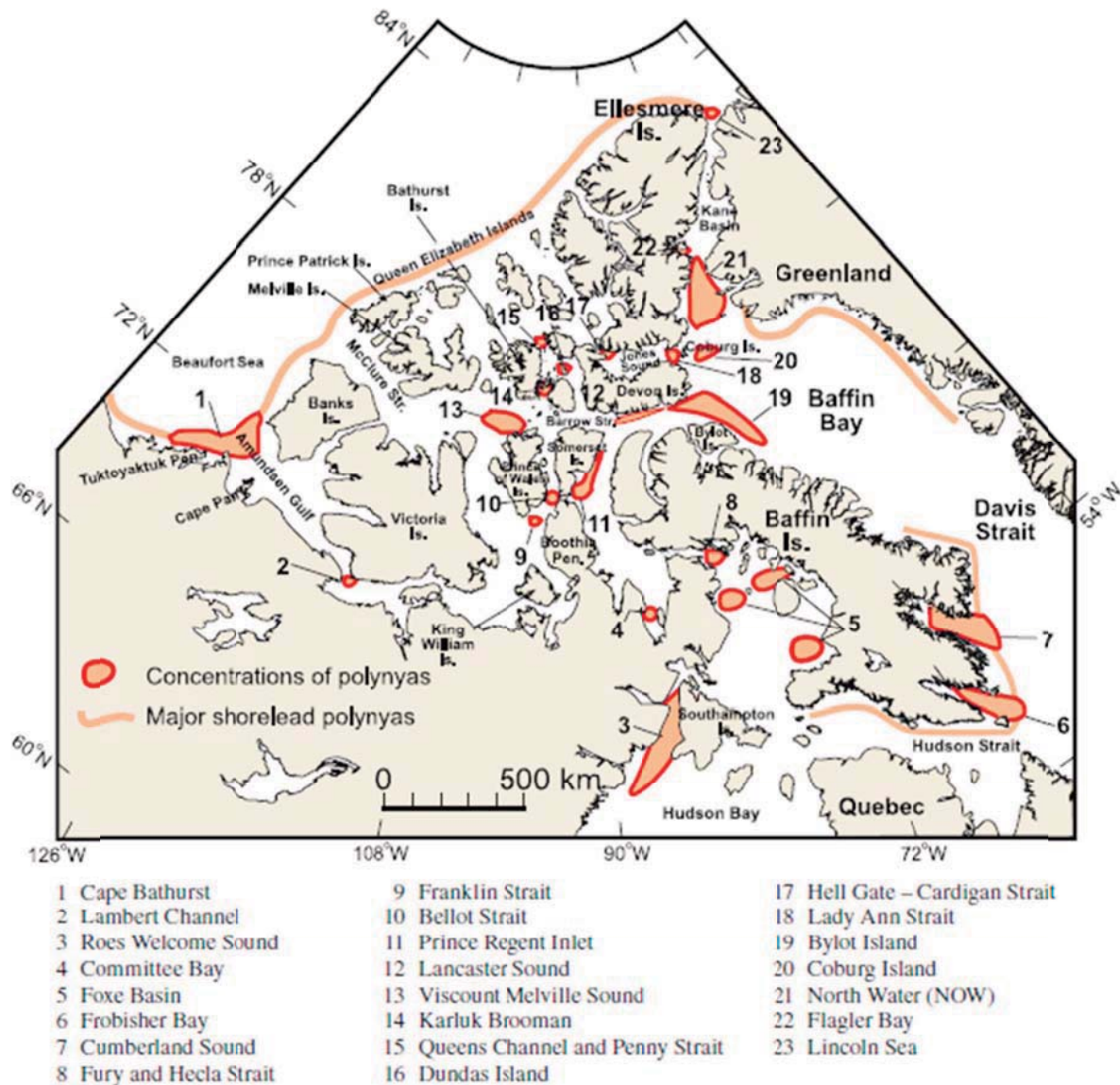


Figura 14. Mappa delle polynya conosciute nell’Arcipelago Artico canadese (Hannah et al., 2009, adattato da Barber e Massom, 2007; Stirling, 1981; la Karluk Brooman polynya è stata identificata da Schledermann, 1980; Brown e Nettlehip, 1981).

Le polynya si distinguono in polynya costiera (coastal polynya) e polynya oceanica. La maggior parte delle polynya costiere artiche sono calore latente. L’elevata produzione di ghiaccio nelle polynya costiere sulla piattaforma continentale nell’Oceano Artico è responsabile della formazione della *cold saline water* che contribuisce al mantenimento dell’alocline dell’Oceano Artico. Un’accurata determinazione delle polynya, includendo una stima del sottile spessore di ghiaccio, è essenziale per la stima di produzione di ghiaccio marino. Esistono studi che impiegano algoritmi e immagini di sensori a micro onde che permettono di individuare e stimare spessori di ghiaccio < 0.15 m (Tamura e Ohshima, 2011).

3. Scenari futuri della copertura glaciale e rotte artiche

La riduzione del ghiaccio artico continua ad essere un tangibile indicatore dei cambiamenti climatici globali. I record negativi nell'estensione dei ghiacci marini misurati in settembre 2007 e 2012 sottolineano una tendenza negativa nell'estensione e nello spessore dei ghiacci osservata sino dal 1979. A partire dagli anni '80, l'estensione del più datato e spesso ghiaccio pluriennale (*MultiYear Ice* – MYI) è diminuita del 15% ogni dieci anni. Anche se una naturale variabilità climatica ha provocato fluttuazioni interannuali nell'estensione del ghiaccio marino nella storia, l'attuale declino è da attribuire primariamente alle emissioni di gas serra causate dall'uomo in parte aggravato da fattori meteorologici. Recenti studi sulla misura dello spessore della copertura glaciale da rilievi elettromagnetici da aereo (2010-2015) sono, nella panoramica di sviluppo tecnologico, grande supporto ai modelli di previsione delle dinamiche di fratturazione della copertura glaciale e di origine di settori liberi dai ghiacci durante la stagione estiva. I modelli climatici di simulazione sono universalmente concordi nel prevedere una continua riduzione dei ghiacci nel corso del 21° secolo, sebbene con alcune significative differenze temporali (*Overland e Wang, 2013*). Inoltre, le recenti osservazioni satellitari indicano che molti simulazioni di modelli climatici sottostimano il reale ritmo di diminuzione dei ghiacci, forse a causa dell'incertezza delle osservazioni, della variabilità climatica e dei limiti nella comprensione di alcuni processi fisici come la deriva dei ghiacci.

Nonostante le incertezze dei modelli, queste simulazioni, insieme a tre decenni di osservazioni satellitari, consentono di combinare le proiezioni delle aree tecnicamente accessibili dell'Artico, la lunghezza della stagione di navigazione e la variabilità temporale per modellizzare le possibili rotte come funzione sia delle condizioni climatiche (ghiacci) che dei tipi di navi (*Buixadè Farré et al., 2014; Haas et al., 2015*). Le proiezioni più recenti sono basate sulla simulazione del ghiaccio marino per tre scenari di forzante climatico (4.5, 6.0 e 8.5 W/m²)⁵ e assumendo navi di classe Polar Class 3 (PC3), Polar Class 6 (PC6) e Open-Water (OW) con alta, media e nulla capacità rompighiaccio rispettivamente⁶. In questi studi, la prospettiva che il futuro uso marittimo dell'Artico avrà diverse modalità e finalità è riconosciuta con l'inserimento di navi di classe OW, particolarmente importanti perché costituiscono la stragrande maggioranza della flotta mondiale.

In qualunque scenario, le navi PC3 hanno accesso alla maggior parte delle regione artica durante tutto l'anno. L'analisi dei dati storici (1980-1999) riporta una media annuale di accessibilità del 54%, che si prevede salirà al 75% - 72% - 79% (RCP 4.5 - 6.0 - 8.5 rispettivamente) entro il 2030, con picchi del 84% - 82% - 87% di accessibilità durante il periodo luglio – ottobre (Fig. 15).

Per le navi PC6, i dati storici indicano una media annuale del 36%, che salirà al 45% - 44% - 48% con picchi del 66% - 64% - 71% in luglio-ottobre.

L'accesso per le navi OW è storicamente limitato al 23% della regione e si prevede che non possa salire oltre rispettivamente il 29% - 29% - 31% (RCP 4.5 - 6.0 - 8.5) entro il 2030.

⁵ Scenari adottati dall'IPCC Fifth Assessment Report, basati sul Representative Concentration Pathways (RCP), <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>

⁶ La "Polar Class" è definita dalla International Association of Classification Societies (IACS) nel "IACS Unified Requirements for Polar Ships", ed. 2011, http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Unified_requirements/PDF/UR_I_pdf410.pdf

In generale, le proiezioni indicano per questa classe di navi un incremento delle possibilità di accesso in estate nel corso del secolo, con maggiori aumenti negli scenari con forzante più intenso, e basso accesso nel corso dell'inverno per qualunque scenario. Questi risultati sottolineano un futuro con limitata operatività per le navi OW nell'Oceano Artico.

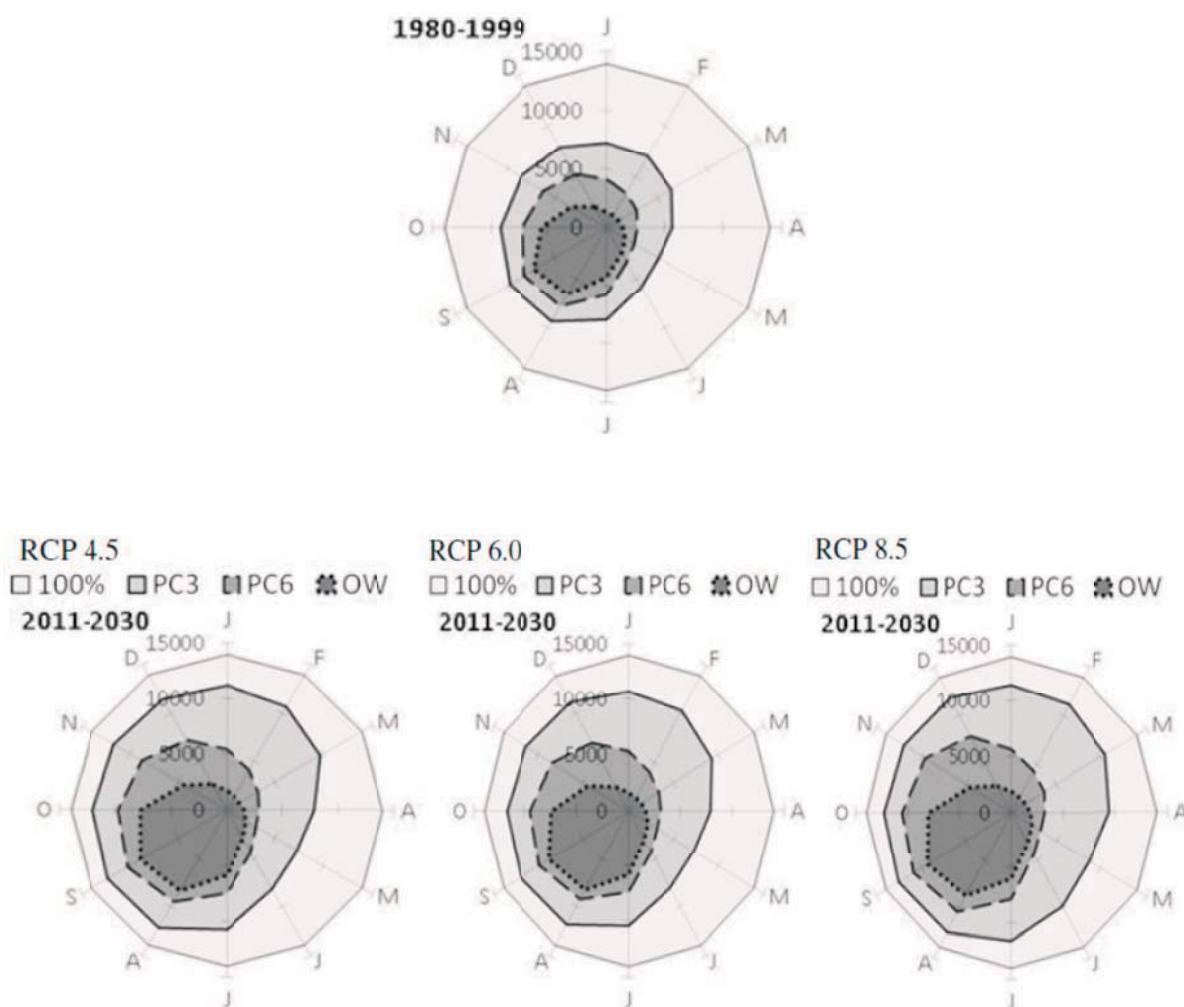


Figura 15. Superficie accessibile mensilmente per l'area artica (in migliaia di km²) per i tre scenari di forzante climatico (RCP, W/m² e le tre classi di navi (PC3, PC6, OW). Il cerchio esterno rappresenta una accessibilità del 100%. Come riferimento, sono riportati i dati storici (1980-1999) (Stephenson et al., 2013).

Entro il 2020, si prevede che lo Stretto di Bering sia in condizione di open water⁷ per 160 giorni l'anno, con ulteriori 35-45 giorni di copertura compresa tra 10% e 40% ("shoul-

⁷ Un'ampia zona di acque liberamente navigabili nella quale la presenza di ghiaccio marino è minore del 10% e non vi è presenza di ghiaccio di origine terrestre. (World Meteorological Organization Pub No. 259 Sea Ice Nomenclature)

der season”⁸). In questo scenario, la Rotta Marittima Settentrionale (Northern Sea Route – NSR, in alcuni casi indicata anche come Rotta di Nord Est) potrà avere sino a 30 giorni di open water e 45 giorni di *shoulder season* (Fig. 16).

Nella decade successiva (2020-2030), oltre ad un aumento dei periodi di navigabilità dello Stretto di Bering e della NSR, si prevede che la Rotta Transpolare (Transpolar Route – TPR) sarà aperta per 45 giorni l’anno, con una *shoulder season* di 60-70 giorni. La navigabilità del Passaggio a Nord Ovest (Northwest Passage – NWP) rimarrà limitata in questo periodo.

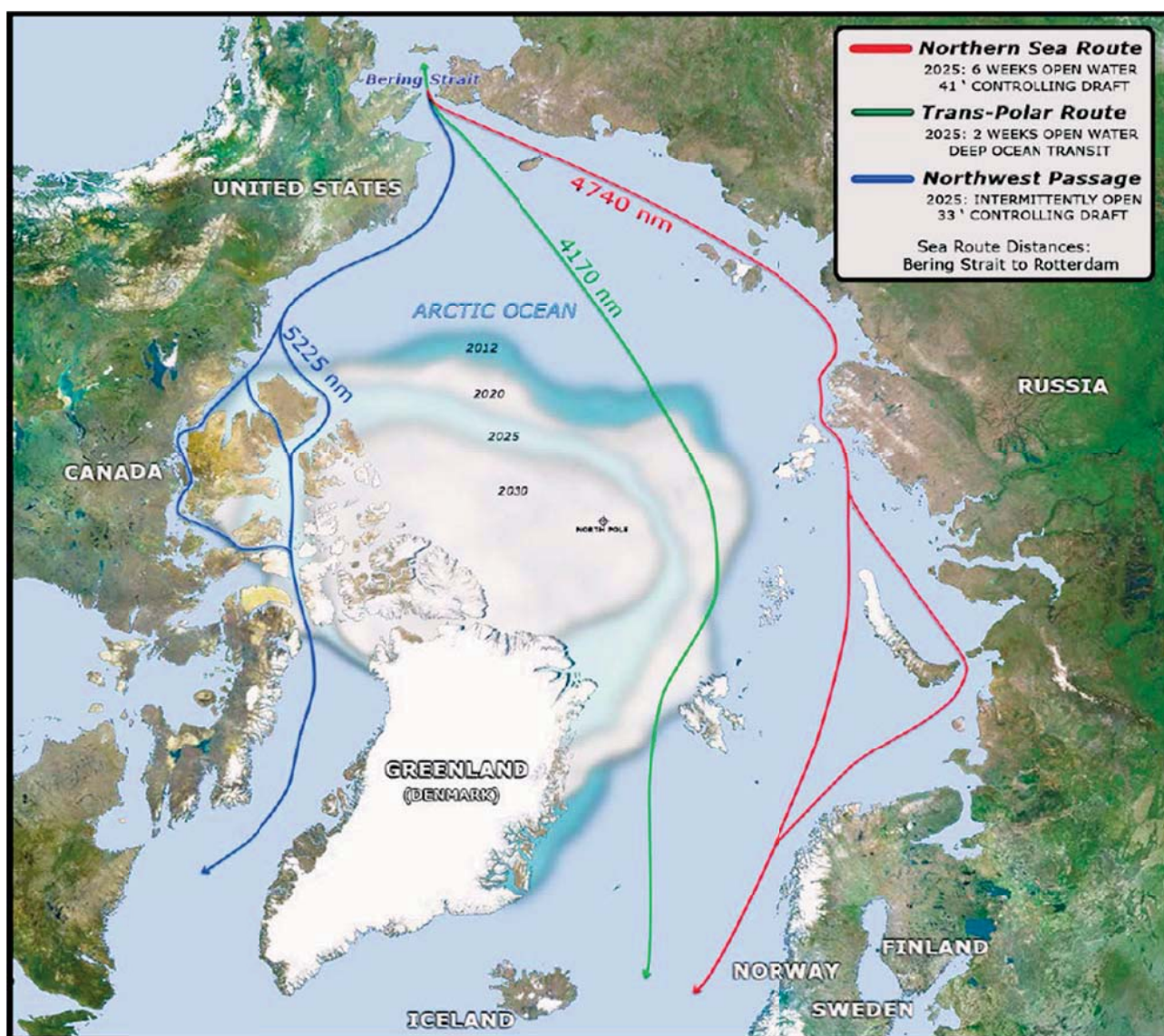


Figura 16. Previsione delle future rotte di transito artiche sovrapposte alla minima estensione prevista dei ghiacci (da: The United States Navy Arctic Roadmap for 2014 to 2030).

Dopo il 2030 si prevede che le condizioni ambientali saranno tali da consentire una sempre maggiore e più sicura presenza marittima nella regione. Le principali rotte di navigazione saranno consistentemente aperte, con un significativo incremento del traffico nei mesi estivi. Le

⁸ Secondo la definizione della U.S. Navy Task Force Climate Change (TFCC)

Rotta Marittima Settentrionale e Transpolare saranno percorribili per 130 giorni l'anno, con 75 giorni di condizioni di open water (*Humpert e Raspotnik, 2012*). Il Passaggio a Nord Ovest sarà maggiormente aperto durante la tarda estate e l'inizio dell'autunno.

La rotta di navigazione del Passaggio di Nord Ovest, definito nei suoi limiti dalla pubblicazione *IHO S23 (1986)*, essendo condizionata dalla copertura dei ghiacci, non ha un solo percorso seppur quella nota inizi, come mostrato in figura 17, all'imboccatura della Baia di Baffin (1), continui verso ovest attraverso Lancaster Sound (2) e M'Clure Strait (3) nel Parry Channel (4) con deviazione sud ovest a nord di Point Borrow (5), Alaska, e termini nello stretto di Bering (6).



Figura 17. Rotte di navigazione nel Passaggio di Nord Ovest.

I grafici della figura 18 rappresentano la situazione attuale e la previsione futura a breve, medio e lungo termine della navigabilità, indicata con le settimane di apertura, delle principali rotte artiche.

In merito alle 3 rotte citate, alcuni autori hanno paragonato il potenziale delle medesime di trasformare la navigazione marittima mondiale del 21° secolo, a quello delle rotte polari nel campo aereo avvenuto nel 20° secolo (*Smith e Stephenson, 2013*). In particolare, la TPR rappresenterebbe la migliore rotta diretta per i traffici trans-Artici, ma non ha ancora attratto significativi interessi commerciali in quanto la presenza di ghiacci pluriennali, le condizioni meteo-climatiche, e gli aspetti della ricerca e soccorso, sono rimasti finora un grosso ostacolo alla navigazione Artica; il trend di riscaldamento e la dinamica dei ghiacci potrebbe però trasformare questa regione in un oceano navigabile stagionalmente, in quanto l'Oceano Artico, come descritto, potrebbe già nel breve-medio termine essere libero dai ghiacci per periodi significativi.

Le rotte transartiche, comunque, non verrebbero utilizzate come sostitute delle rotte esistenti (o non solo), ma come supplemento che porterà a capacità maggiori ed a volumi di traffico in aumento (nell'ottica dell'apertura di nuove linee di comunicazioni per paesi in forte crescita, come la Cina). Delle 3 rotte, la TPR è la più breve (ed implica anche limitate controversie ed incertezze legali, rispetto alle altre Rotte), mentre la NWP e la NSR sono da considerarsi costiere: la TPR rappresenta una rotta medio-oceanica che transita attraverso o vicino il Polo Nord; a causa dei fattori climatici e delle condizioni del ghiaccio, essa non segue una singola specifica rotta ma viene utilizzata secondo una moltitudine di percorsi navigabili.

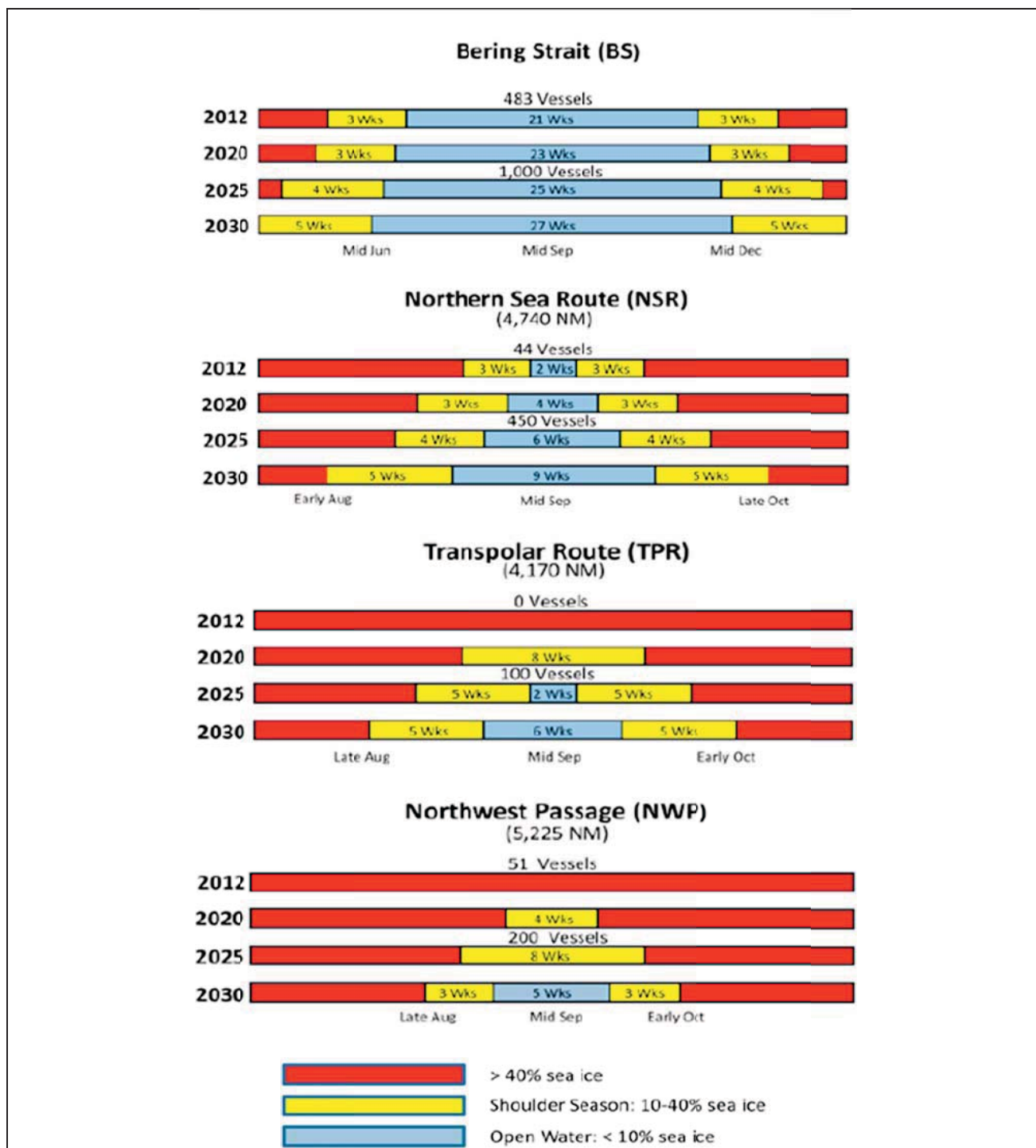


Figura 18. Disponibilità delle rotte artiche. Proiezioni sui transiti a cura dell'Office of Naval Intelligence (Wks = weeks) (The United States Navy Arctic Roadmap for 2014 to 2030).

In generale, alcuni studi prevedono nello scenario di medio termine che durante i mesi invernali e primaverili le condizioni del ghiaccio lungo la NSR e la TPR rimarranno rigide e il numero degli iceberg e del ghiaccio galleggiante alla deriva, che rappresenta uno dei maggiori pericoli per la navigazione, potrebbe aumentare, soprattutto nella fase iniziale della stagione dello scioglimento, in cui il ghiaccio si spacca e inizia a muoversi alla deriva attraverso l'Oceano Artico.

La 'sfida' della navigazione lungo la TPR non è quindi considerata principalmente quella tecnologica, ma quella economica, basata però sulla triade responsabilità, viabilità, affida-

bilità; i vantaggi economici vengono calcolati in base al percorso più breve ed al risparmio sui costi: il risparmio in termini di distanza lungo la rotta Artica TPR potrebbe essere fino ad un massimo del 41% paragonato alle tradizionali rotte attraverso il Canale di Suez. Navigazioni a 17 nodi dal Giappone all'Europa impiegano circa 27 giorni, quando ce ne vorrebbero solo 16 attraverso la TPR. In questo è da considerare che le compagnie di navigazione, secondo alcune nuove policy, potrebbero in luogo di risparmi di tempo, decidere di ottenere risparmi di carburante e riduzioni di emissioni, adottando andature lente, a bassa velocità (per esempio, riducendo la velocità del 40% sulla rotta tra Giappone ed Europa del Nord).

In sintesi però, allo stato attuale la combinazione di una carenza di affidabilità e della variabilità dei tempi di percorrenza lungo le rotte artiche rappresenta il maggiore ostacolo allo sviluppo della TPR, che potrebbe faticare ad entrare a far parte del sistema di navigazione marittima globale; alcune organizzazioni richiedono infatti significativi miglioramenti nei sistemi di monitoraggio; la strumentazione relativa a comunicazioni satellitari, di risposta alle emergenze, nonché i sistemi di osservazione e previsione meteomarina e dello stato dei ghiacci da parte degli stati costieri, sono considerati da alcuni insufficienti; per motivi tecnici ed ambientali, le comunicazioni, la navigazione e la ricerca e soccorso, restano una impresa difficile lungo la TPR, ed in aggiunta la mancanza ad oggi di infrastrutture e servizi a supporto delle attività marittime nell'Artico amplifica i dubbi sulla sicurezza (vedi anche la maggiore distanza dai cosiddetti porti rifugio, e le potenziali difficoltà a raggiungerli, a causa della presenza di iceberg o ghiaccio alla deriva).

D'altra parte, oltre il NWP, che transita perlopiù in acque ristrette e interne canadesi, e con profondità limitate, anche la NSR è soggetta a restrizioni, poiché le navi devono transitare attraverso alcuni stretti e passaggi poco profondi del Mar di Kara e Laptev: navi troppo grandi per passare per i Canali di Panama o Suez risultano troppo grandi anche per navigare lungo la NSR; mentre la TPR, per questi aspetti, presenta meno restrizioni e pericoli, e le navi devono transitare per un solo varco, quello costituito dallo Stretto di Bering (con profondità dai 30 ai 49 m).

In conclusione, alcuni studi evidenziano come la navigazione con navi da carico possa essere maggiormente attuabile in futuro nell'Oceano Artico rispetto a navi di linea, poiché le prime, tra i vari fattori, seguono tabelle di marcia meno rigide; inoltre, la navigazione artica nella realtà potrebbe invero essere utilizzata solo o quasi per raggiungere specifiche destinazioni, e costituita da traffico marittimo di tipo locale, finendo potenzialmente per restare un fattore di nicchia.

4. Cenni sugli aspetti economici e geostrategici

Lo sviluppo futuro delle rotte marittime artiche non dipenderà solo dalle più favorevoli condizioni climatiche, ma sarà influenzato da un duraturo cambiamento della sfera di influenza nei campi economico, geografico e politico. Le rotte artiche rappresentano infatti un nuovo collegamento tra i mercati di Europa ed Asia, proprio quando le rotte attraverso i Canali di Panama e Suez stanno raggiungendo la saturazione della capacità di traffico marittimo, e dall'Asia si assiste al continuo incremento di richiesta di materie prime e idrocarburi (vedasi la Cina, che è anche il maggior paese esportatore al mondo, e che per quasi metà del Prodotto Interno dipende dalla navigazione marittima, per la quale sta cercando nuove linee di comunicazione; per questo alcuni esperti sostengono che l'incremento del traffico marittimo attraverso l'Artico rappresenta una necessità geopolitica del paese asiatico).

A fianco all'importanza economica e strategica delle vie di comunicazione, è da ricordare come la regione artica abbia acquisito grande interesse ed importanza dopo la fine della Guerra Fredda, con la riduzione della minaccia militare ed anzi l'avvio di processi di cooperazione e dialogo, promossi da tutti gli Stati che insistono sulla regione (vedasi l'Arctic Council), e che le risorse stimate del sottosuolo in Artico (gas naturali e idrocarburi) ammontano a circa il 25% delle risorse mondiali, senza considerare che anche le risorse idriche sono ingenti, e assumono sempre di più un'importanza strategica (*Martino, 2013; Maslowski et al., 2012*). Il fatto che le condizioni e la situazione dei ghiacci stiano cambiando più velocemente di quanto si fosse previsto inizialmente, non fa che aumentare ancor più l'attenzione dei paesi artici e non artici sulla regione, che sempre più velocemente sembra diventare cruciale per gli sviluppi economici e geopolitici futuri (*Massonnet et al., 2012*).

L'Arctic Council è il foro di cooperazione intergovernativo, stabilito dal 1996 tra gli otto paesi artici (Canada, Danimarca-Groenlandia, Finlandia, Islanda, Norvegia, Svezia, Russia, Stati Uniti); per quanto sopra riportato, anche paesi molto lontani geograficamente guardano all'Arctic Council con grande interesse (l'Italia è dal 2013 un paese Osservatore), in quanto il cambiamento climatico, accanto al progressivo aprirsi di attività economiche e linee di comunicazione, sembrano aver trasformato l'Artico da ultima frontiera a centro degli interessi scientifici e geopolitici. I vari fattori economici, geografici, ambientali e militari si intrecciano portando a disegnare un nuovo sistema regionale che è ancora difficile da prevedere.

La situazione è infatti molto diversa rispetto a quella della regione antartica: l'Artico è un Oceano circondato da terre (come il Mediterraneo), mentre l'Antartide è un continente circondato da Oceani; sono presenti molte isole, ed è ricco di risorse del sottosuolo; le controversie territoriali sulle isole in Artico sono state sostanzialmente risolte e chiuse, mentre in Antartide sono aperte diverse questioni e rivendicazioni sulla sovranità; non esiste nella regione artica uno specifico regime internazionale, mentre esiste per la regione antartica, stabilito dal Trattato Antartico di Washington; detto Trattato stabilisce che in Antartide si svolgano solo attività pacifiche, e nessuna di carattere militare, mentre in Artico vi possono essere rischi o possibilità di attività di tipo militare; la regione artica è stata sempre abitata da popolazioni indigene, mentre nessuna popolazione abitava o abita in Antartide.

In merito alle enormi risorse naturali stimate esistere nel sottosuolo, i paesi di maggior riferimento sarebbero l'Alaska, per il petrolio, e la Russia, per il gas; anche Canada Groenlandia e Norvegia avrebbero a disposizione enormi quantità di riserve da sfruttare. Si rileva inoltre che il 90% delle risorse regionali si troverebbero all'interno delle attuali e consolidate delimitazioni territoriali, situazione questa che assicura una certa stabilità nella regione, e

comporta in prospettiva che più forse dello sfruttamento delle risorse è il controllo delle rotte di comunicazione a preoccupare maggiormente. Infatti, sebbene vi siano alcuni disaccordi sui confini settentrionali della piattaforma euroasiatica, Russia e Norvegia per esempio hanno risolto una lunga controversia sui confini del Mare di Barents, come anche Canada e Stati Uniti hanno raggiunto degli accordi sulla navigazione ed i traffici marittimi nel Passaggio di Nord Ovest, che li aveva visti contrapposti per lungo tempo; tutti i paesi sembrano quindi intenzionati a dirimere le controversie in modo pacifico, e questo risulta anche dagli atti e accordi internazionali finalizzati negli ultimi anni, primo fra tutti la Dichiarazione di Ilulissat (Groenlandia, 2008) tra i 5 Stati costieri dell'Oceano Artico, che enfatizza la cooperazione pacifica tra i 5 Stati, e stabilisce che la Convenzione ONU sul Diritto del Mare (UNCLOS, Montego Bay, principale riferimento legale per l'Oceano Artico) costituisce un'adeguata struttura per la cooperazione internazionale e per la risoluzione pacifica delle controversie in Artico; per questo non si ritiene necessario lo sviluppo di un nuovo regime internazionale per governare l'Oceano Artico.

Altri accordi recenti e significativi, sono stati quello per la Ricerca e Soccorso in Artico, firmato dagli Stati del Consiglio Artico nel 2011, e quello per la Cooperazione sull'inquinamento marino, nel 2013, che dimostrano la volontà di incrementare la sicurezza e la protezione dell'ambiente nella regione. La crescente importanza del Consiglio Artico, e il crescente interesse per la regione, è confermata anche dal fatto che il numero di nazioni e organizzazioni che hanno chiesto lo status di Osservatore nel Consiglio è in aumento.

Nello specifico del diritto internazionale del mare, è da rilevare che, oltre ad alcune controversie relative alle delimitazioni della piattaforma continentale, esistono alcune questioni o interpretazioni aperte in merito alla navigazione in zone coperte da ghiacci (regolate comunque dall'articolo 234 della UNCLOS), in merito al passaggio degli stretti (passaggio in transito), e il passaggio inoffensivo in acque territoriali, senz'altro rilevanti per le Rotte di Nord Ovest (NWP) e di Nord Est (NSR); norme e articoli che si collegano e la cui applicazione può non essere chiara e certa (*Scovazzi, 2009; Scovazzi e Papanicopolu, 2009*). Per tornare alla NSR, trattata al precedente capitolo 3, questa transita per le coste settentrionali della Russia, attraverso i Mari di Kara, Laptev, Siberiano Orientale, e Chuckchi, gli stretti attraversati, formati da territori e isole Russe (a partire dallo Stretto di Kara, che collega il Mare di Barents al Mare di Kara) furono dichiarati dall'Unione Sovietica come acque interne, ed in seguito tale navigazione appositamente regolata con specifiche norme stabilite dal paese (norme confermate dalla Russia, e contestate dagli Stati Uniti).

Per completare il quadro normativo internazionale, si applicano parimenti in Oceano Artico la convenzione SOLAS (Convention for the Safety of Life at Sea), la MARPOL (Convention for the Prevention of Pollution from Ships, con particolare riferimento alle 'Special Areas', dove vengono applicati criteri più restrittivi), e la STCW (Convention on Standards of Training Certification and Watchkeeping); in ambito IMO, inoltre, si fa specifico riferimento in questo caso anche alla Risoluzione che tratta delle PSSA (Particularly Sensitive Sea Areas), zone sensibili per le quali è necessaria una protezione particolare, dovuta per motivi ecologici, scientifici, socio-economici, nonché per i fattori idrografici, e meteo-oceanografici.

Su questo è bene ricordare anche che i dati idrografici e batimetrici nella regione risultano ancora scarsi o inadeguati per la gran parte delle superficie marina (solo l'11% dell'area risulterebbe mappata con sistemi *multibeam*), per cui l'IMO e l'IHO oltre a incoraggiare l'esplorazione e la raccolta di nuovi dati (l'IHO ha creato una Commissione Regionale Artica,

ARHC), raccomandano le navi, specie lungo le rotte costiere, di seguire rotte conosciute e dove i fondali sono stati verificati, evitando di navigare nelle aree non rilevate in modo adeguato.

Riguardo invece le estensioni o pretese relative alla piattaforma continentale, è prevista dalla UNCLOS la facoltà di dichiarare un'ampiezza di 200 NM, estendibile ulteriormente fino a 350 NM in base alle caratteristiche ed estensione della piattaforma stessa, per cui gli Stati artici hanno svolto ricerche e rilievi per supportare rivendicazioni che arrivino sino al centro dell'Oceano Artico; in effetti, in relazione al tipo di piattaforma, uno scenario futuro potrebbe vedere solo minime aree, al centro dell'Artico, restare di carattere internazionale (Fig. 19).

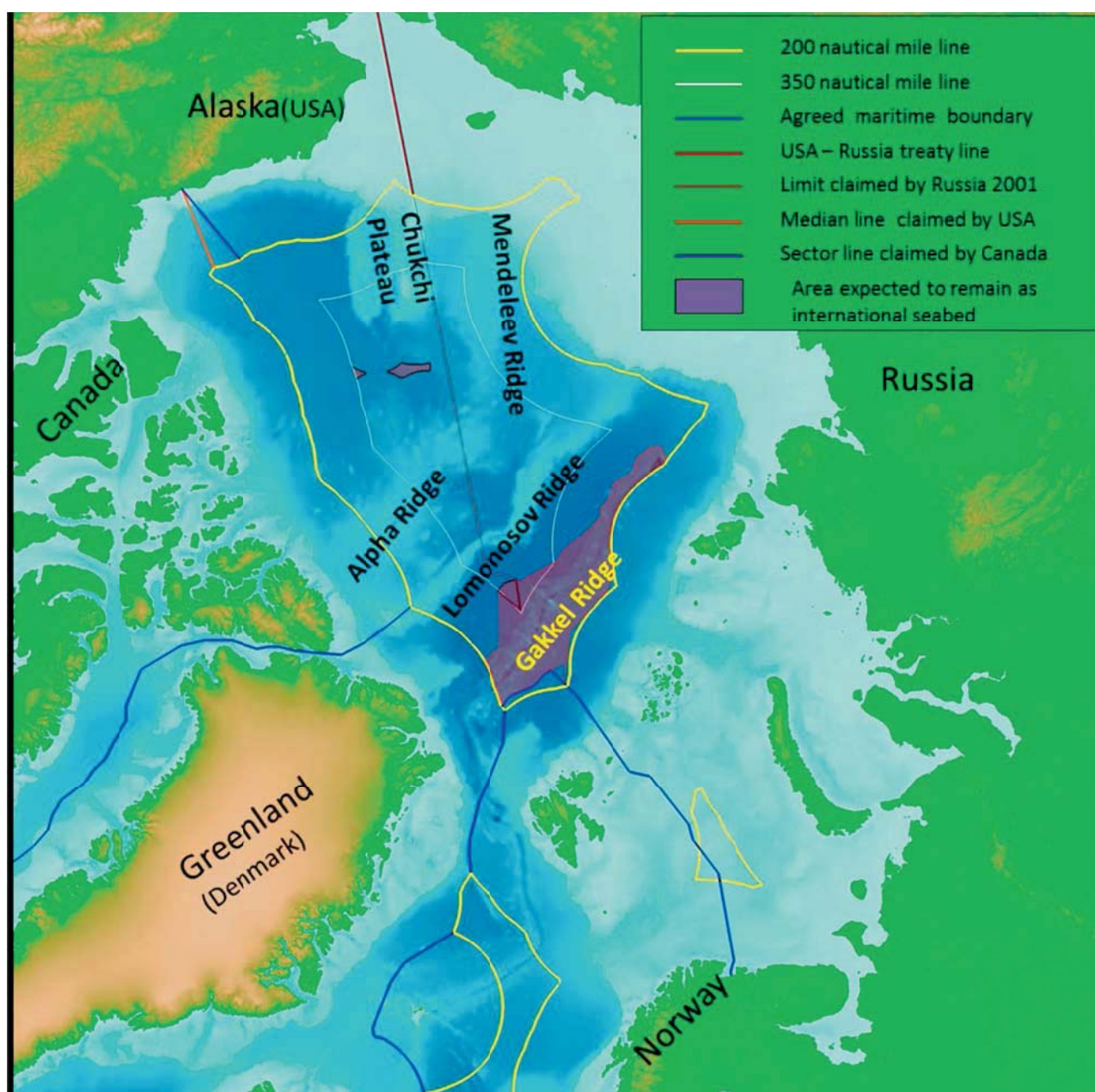


Figura 19. Mappa che descrive il possibile scenario delle aree marittime che potrebbero restare fondali internazionali (i due piccoli poligoni ed uno più grande viola) dopo che la Commissione sui Limiti della Piattaforma Continentale avrà completato il processo sulle delimitazioni (Brekke, 2014).

Su queste basi per esempio Russia, Canada, Danimarca reclamano vaste aree corrispondenti alla più estesa dorsale sottomarina che attraversa l'Artico, la Dorsale di Lomonosov, che dalle Nuove Isole Siberiane raggiunge le Isole Artiche Canadesi (dividendo la regione in una parte euroasiatica ed una asiatico-americana). Su questo tipo di rivendicazioni, ancorché vi siano stati nel passato alcune tensioni e contestazioni, e la stampa abbia enfatizzato alcune azioni particolari o eclatanti, pare invero che i paesi artici si siano mossi o si stiano muovendo tramite mutui accordi, per addivenire a soluzioni concordate (vedi il caso della Russia e Norvegia, lo sviluppo di programmi di acquisizione e ricerca, e di elaborazione di una Carta Batimetrica Internazionale dell'Oceano Artico – IBCAO); questo corrisponde infatti allo spirito della Dichiarazione di Ilulissat (2008), con cui si è cercato di evitare tensioni o un regime competitivo di aspirazioni territoriali. Per riepilogare, comunque, si stima che il 90% delle risorse del sottosuolo siano all'interno delle 200 NM di piattaforma (ovvero di fondali già di giurisdizione degli Stati), e che altre aree di interesse possano essere principalmente in corrispondenza della piattaforma del Chukchi, e della Dorsale di Lomonosov.

Per concludere con gli aspetti legali, sembra quindi molto improbabile che vi possano essere forti tensioni, o instabilità politica, o rischi sul piano diplomatico o militare, legati a rivendicazioni marittime; vi possono essere invece, sul piano della navigazione e dello svolgimento di attività marittime, delle situazioni dubbie o delle problematiche connesse a controversie in corso sulle linee di base ed acque interne, come nel caso di limiti non definiti e stabiliti della piattaforma continentale, ed in genere ove esistano questioni pendenti sulle delimitazioni, specie nei casi dove vi sia, o possa essere intervenuta, una legislazione nazionale in fatto di ambiente o navigazione.

Quanto agli aspetti militari, come accennato in merito al diverso quadro internazionale rispetto l'Antartide, la regione artica non sembra certo esente dallo sviluppo di tale dimensione. Infatti, l'attenzione risulta esserci anche da parte della NATO, che si è presentata più volte come l'istituzione più adatta a occuparsi delle questioni strategiche regionali (anche perché l'Arctic Council non ha dimensioni militari); per ora comunque il suo ruolo pare ancora lontano, stante anche che il Canada si è sempre opposto ad un coinvolgimento della NATO nell'Artico.

Secondo alcuni analisti, non c'è dubbio che l'Oceano Artico si stia trasformando in un percorso navigabile a tutti gli effetti, e la Rotta Transpolare (TPR) è quella che forse più delle altre ha il potenziale di mutare la navigazione marittima del 21° secolo. Questo ha implicazioni economiche e geopolitiche rilevanti, tant'è che ad un recente forum dell'Arctic Council, l'apertura fisica ed economica dell'Artico è stata paragonata alla scoperta delle Americhe. Questo presenta davanti a tutti dei nuovi scenari, che in questo momento storico la comunità internazionale e soprattutto i leaders dei paesi artici dovranno gestire con grandi capacità e lungimiranza.

Bibliografia

- Barber, D.G., Massom, R.A., 2007. The role of sea ice in Arctic and Antarctic polynyas. In: Smith, W.O., e Barber, D.G., (eds.), *Polynyas: Windows to the world*. Elsevier Oceanographic Series 74, Amsterdam: Elsevier, 1–54.
- Brekke, H., 2014. The limits of the continental shelf in the Arctic Ocean. The Norwegian Scientific Academy for Polar Research, News Letter 12.
- Broecker, W.S., 1997. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance? *Science*, 278, 1582-1588.
- Brown, R.G.B., Nettleship, D.N., 1981. The biological significance of polynyas to Arctic colonial seabirds. In: Stirling, I., e Cleator, H., (eds.), *Polynyas in the Canadian Arctic*. Occasional Paper Number 45. Ottawa: Canadian Wildlife Service. 59–65.
- Buixadé Farré A., Stephenson S.R., Chen L., Czub M., Dai Y., Demchev D., Efimov Y., Graczyk P., Grythe H., Keil K., Kivekäs N., Kumar N., Liu N., Matelenok I., Myksvoll M., O'Leary D., Olsen J., Pavithran.A.P. S., Petersen E., Raspotnik A., Ryzhov I., Solski J., Suo L., Troein C., Valeeva V., van Rijckevorsel J. & Wighting J.(2014). Commercial Arctic shipping through the Northeast Passage: routes, resources, governance, technology, and infrastructure. *Polar Geography*, 37:4, 298-324, DOI: 10.1080/1088937X.2014.965769.
- Clark, P.U., Pisias, N.G., Stocker, T.F., Weaver, A.J., 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, 415, 863-869.
- Dickson, R. R., Osborn, T.J., Hurrell, J.W., Meincke, J., Blindheim, J., Adlandsvik, B., Vinje, T., Alekseev, G., Maslowski, W., 2000. The Arctic Ocean Response to the North Atlantic Oscillation. *American Meteorological Society*, 13, 2671-2696.
- Dittmers, K., Niessen, F., Stein, R., 2003. Holocene sediment budget and sedimentary history for the Ob and Yeneseu Estuaries. In: Stein, R., Fahl, K., Fütterer, D.K., Galimov, E.M., Stepanets O.V. (Eds.), *Siberian river run-off in the Kara Sea: characterization, quantification, variability, and environmental significance*. P. *Marine Science*, 6, 457-484.
- Freire, F., Gyllencreutz, R., Jafri, R.H., Jakobsson, M., 2014. Acoustic evidence of a submarine slide in the deepest part of the Arctic, the Molloy Hole. *Geo-Marine Letters*, 34, 315-325.
- Grantz, A., May, S.D., Taylor, P.T., Lawver, L.A., 1990. Canada Basin. In: Grantz A., Johnson L. e Sweeney J.F. (Eds.), *The Geology of North America (Vol. L): The Arctic Ocean Region*: Boulder, Geol. Soc. Am., 379-402.
- Grantz, A., Scott, R.A., Drachev, S.S., Moore, T.E., Valin Z.C., 2010. Sedimentary Successions of the Arctic Region.
<http://www.datapages.com/AssociatedWebsites/GISOpenFiles/GrantzArcticMaps.aspx>
- Haas C., Howell S.E.L. (2015). Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*, 42, 7673–7680, doi:10.1002/2015GL065704.
- Hannah, C.G., Dupont, F., Dunphy, M., 2009. Polynyas and Tidal Currents in the Canadian Arctic Archipelago. *Arctic*, 62 (1), 83-95.
- Humpert, M., Raspotnik, A., 2012. The Future of Arctic Shipping Along the Transpolar Sea Route. *Arctic Yearbook* 2012, 281-307.
- IHO S23, 1986. Limits of Oceans and Seas. International Hydrographic Organization, Spec. Pub., 23, 190-215.
- Jackson, H.R., Hoakey, G.N., 1990. Sedimentary thickness map of the Arctic Ocean, Plate 5. In: Grantz, A., Johnson, L., Sweeney, J.F., (eds.), *The Arctic Region, The Geology of North America DNAG v. L*.
- Jakobsson, M., 2002. Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 3: 5, 10.1029/2001GC000302.

- Jakobsson, M., Andreassen, K., Bjarnadóttir, L.R., Dove, D., Dowdeswell, J.A., England, J.H., Funder, S., Hogan, K., Ingólfsson, Ó., Jennings, A., Krog Larsen, N., Kirchner, N., Landvik, J.Y., Mayer, L., Mikkelsen, N., Möller, P., Niessen, F., Nilsson, J., O'Regan, M., Polyak, L., Nørgaard-Pedersen, N., Stein, R., 2014a. Arctic Ocean glacial history. *Quat. Sci. Rev.*, 92, 40-67.
- Jakobsson, M., Cherkis, N., Woodward, J., Coakley, B., Macnab, R., 2000. A new grid of Arctic bathymetry: A significant resource for scientists and mapmakers. *EOS Trans. AGU*, 81(9), pp. 89, 93, 96.
- Jakobsson, M., Grantz, A., Kristoffersen, Y., Macnab, R., 2003a. Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor. *GSA Bull.*, 115: 11, 1443-1455.
- Jakobsson, M., Ingólfsson, H., Long, A.J., Spielhagen, R.F., 2014b. The dynamic Arctic. *Quat. Sc. Rev.*, 1-8.
- Jakobsson, M., Macnab, R., Mayer, L.A., Anderson, R., Edwards, M., Hatzky, J., Schenke, H.W., Johnson, P., 2008. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07602, doi: 10.1029/2008GL033520.
- Jakobsson, M., Mayer, L., Armstrong, A., 2003b. Analysis of data relevant to establishing outer limits of continental shelf under Law of the Sea Article 76. *International Hydrographic Review*, 4: 1, 1-8.
- Jakobsson, M., Mayer, L., Coakley, B., Dowdeswell, J. A., Forbes, S., Fridman, B., Hodnesdal, H., Noormets, R., Pedersen, R., Rebecco, M., Schenke, H.W., Zarayskaya Y.A., Accettella, D., Armstrong, A., Anderson, R. M., Bienhoff, P., Camerlenghi, A., Church, I., Edwards, M., Gardner, J. V., Hall, J. K., Hell, B., Hestvik, O. B., Kristoffersen, Y., Marcussen, C., Mohammad, R., Mosher, D., Nghiem, S. V., Pedrosa, M. T., Travaglini, P. G., Weatherall, P., 2012. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. *Geophysical Research Letters*, 39, L12609, doi: 10.1029/2012GL052219.
- Johannessen, O.M., Bengtsson, L., Miles, M.W., Svetlana I. Kuzmina, S.I., Semenov, V.A., Alekseev, G.V., Nagurnyi, A.P., Zakharov, V.F., Bobylev, L.P., Pettersson, L.H., Hasselmann, K., Catle, H.P., 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus*, 56 (A), 328–341.
- Jokat, W., Weigelt, E., Kristoffersen, Y., Rasmussen, T., Shöne, T., 1995. New insights into the evolution of the Lomonosov Ridge and the Eurasian Basin. *Geophysical J. Int.*, 122, 378-392.
- Macdonald, R., 1996. Awakenings in the Arctic. *Nature*, 380, 286-287.
- Martino, L., 2013. Sicurezza e sviluppi energetici: il futuro è dell'Artico. *Informazioni della Difesa*, 6, Supplemento, 234-241.
- Maslowski, W., J. Clement Kinney, M. Higgins, Robert, A., 2012. The Future of Arctic Sea Ice." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 625 - 654.
- Massonnet, F., Fichet, T., Goosse, H., Bitz, C., Philippon-Berthier, G., Holland, M., Barriat, P.Y., 2012. Constraining Projections of Summer Arctic Sea Ice. *The Cryosphere Discuss*, 6, 2931-2959.
- Morison, J., Aagaard, K., Steele, M., 2000. Recent environmental changes in the Arctic: A review. *Arctic*, 53: 4, 359–371.
- Morison, J., Wahr, J., Kwok, R., Peralta-Ferriz, C., 2007. Recent trends in Arctic Ocean mass distribution revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters*, 34, L07602, doi:10.1029/2006GL029016.
- Moritz, R.E., Bitz, C.M., Steig, E.J., 2002. Dynamics of recent climate change in the Arctic. *Science*, 297, 1497-502.
- Divins D.L., 2003. Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas. NOAA, National Geophysical Data center, Boulder, CO.
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/sedthick/sedthick.html>

- Nghiem, S.V., Rigor, I.G., Perovich, D.K., Clemente-Colo, P., Weatherly, J.W., Neumann, G., 2007.* Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophysical Research Letters*, 34, L19504, doi:10.1029/2007GL031138.
- Nghiem, S.V., Van Woert, M.L., Neumann, G., 2005.* Rapid formation of a sea ice barrier east of Svalbard. *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2004JC002654.
- Overland, J. E., Wang, M., 2013.* When Will the Summer Arctic be Nearly Sea Ice Free?. *Geophysical Research Letters*, 40: 10, 2097–2101.
- Rigor, I.G., Wallace, J.M., Colony, R.L., 2002.* On the Response of Sea Ice to the Arctic Oscillation. *Journal of Climate*, 15, 2648-2663.
- Rothrock, D.A., Yu, Y., Maykut., G.A., 1999.* Thinning of the Arctic Sea-Ice Cover. *Geophysical Research Letters*, 26:23, 3469-3472.
- Schledermann, P., 1980.* Polynyas and prehistoric settlement patterns. *Arctic*, 33: 292–302.
- Scovazzi, T., 2009.* Legal Issues Relating to Navigation Through Arctic Waters. *The Yearbook of Polar Law*, 1, ISSN 1876-8814, 371-382.
- Scovazzi, T., Papanicolopulu, I., 2009.* Report on the Political, Legal and Administrative Issues of Operating the Aurora Borealis in the Arctic and Antarctic Regions. *European Research Icebreaker Consortium (ERICON)*.
- Serreze, M.C., Francis, J.A., 2006.* The Arctic on the fast track of change. *Royal Met. Soc.*, 65-69.
- Smith, D.M., 1998.* Observation of perennial Arctic sea ice melt and freeze-up using passive microwave data. *J. Geophys. Res.*, 103, 27,753-27,769.
- Smith, W.O., Barber, D.G., 2007.* Polynyas: Windows to the world. *Elsevier Oceanographic Series*, 74, Amsterdam: Elsevier, 458 p.
- Smith, S.D., Muench, R.D., Pease, C.H., 1990.* Polynyas and leads: An overview of physical processes and environment. *Journal of Geophysical Research* 95:9461–9479.
- Smith, L.C., Stephenson, S.R., 2013.* New Trans-Arctic Shipping Routes Navigable by Midcentury. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110: 13.
- Sou, T., Flato, G., 2009.* Sea Ice in the Canadian Arctic Archipelago: Modeling the Past (1950–2004) and the Future (2041–60). *Journal of Climate*, 22, 2181–2198.
- Stabeno, P., Overland, J., 2001.* Bering sea shifts toward an earlier spring transition. *Eos, Trans AGU*, 82: 9, 317-321.
- Stein, R., 2008.* Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, and Paleoenvironment. Elsevier, ISBN: 978-0-444-52018-0.
- Stirling, I., 1980.* The biological importance of polynyas in the Canadian Arctic. *Arctic*, 33, 303–315.
- Stephenson, S.R., Smith, L.C., Brigham, L.W., Agnew, J.A., 2013.* Projected 21st-century changes to Arctic marine access. *Climatic Change*, 118, 885-889.
- Stroeve, J. C., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., Barret, A., 2014.* Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1216-1225.
- Tamura T., Ohshima, K.I., 2011.* Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas. *Journal Geophysical Research*, 116, C07030.